

Enseñanza de la teoría general de la relatividad en la escuela secundaria: por qué, qué y cómo

Teaching general relativity theory in high school: why, what and how

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Irene Arriassecq^{1,2}, Esther Cayul¹ e Ileana M. Greca³

¹ECienTec, Facultad de Ciencias Exactas, CIC-UNCPBA, Paraje Arroyo Seco, (7000) Tandil, Buenos Aires. Argentina.

²CONICET

³Universidad de Burgos. España.

E-mail: irenearr@exa.unicen.edu.ar

(Recibido el 23 de junio de 2017; aceptado el 20 de noviembre de 2017)

Resumen

En este trabajo, que forma parte de una investigación más amplia, se aborda la problemática de enseñar la teoría general de la relatividad en la escuela secundaria, aun cuando dicha teoría es escasamente abordada incluso en las carreras de grado de física. Se analiza qué aspectos de la misma deberían ser abordados en ese nivel educativo, por qué y cómo podría lograrse desde una perspectiva que integra los marcos teóricos de la *enseñanza para la comprensión* y de naturaleza de la ciencia. Se analiza el enfoque de la teoría en diversos libros de texto de nivel secundario, universitario y de divulgación desde la perspectiva "Física primero" y los resultados obtenidos en una encuesta realizada a alumnos del último año de la escuela secundaria, con el objetivo de identificar el interés de los mismos por algunos tópicos de física vinculados con la teoría general de la relatividad, o fenómenos que la misma explica. A partir del análisis de los textos, de los resultados de la encuesta y contemplando los diseños curriculares, se proponen tópicos generativos, metas y desempeños de comprensión esperados, tanto para gravitación, como para la teoría general de la relatividad, que podrían promover la comprensión de aquellos aspectos centrales de la teoría que implican rupturas epistemológicas respecto de la mecánica clásica y que, al mismo tiempo, son indispensables para comprender fenómenos de interés actual para la física, la tecnología y, fundamentalmente, para los adolescentes.

Palabras clave: Teoría general de la relatividad; Enseñanza secundaria; Enseñanza para la comprensión; Naturaleza de la Ciencia.

Abstract

In this work, which is part of a wider research, the problem of teaching the General Theory of Relativity in secondary school is addressed, even though this theory is scarcely addressed even in physics degree courses. It analyzes what aspects of it should be addressed in secondary level, why and how it could be achieved from a perspective that integrates the theoretical frameworks of the Teaching for Understanding and the Nature of Science. The approach of the General Theory of Relativity is analyzed in several secondary, university and divulgation textbooks from the perspective "Physics First" and the results obtained in a survey made by students of the last year of secondary school, in order to identify the interest for some topics of physics linked to the General Theory of Relativity, or phenomena that it explains for this theory. From the analysis of the texts, the results of the quiz and the curricular designs, generative topics are proposed as well as goals and expected performances for both Gravitation and the General Theory of Relativity that could promote the understanding of main theory aspects that involve epistemological ruptures with Classical Mechanics and are indispensable for understanding phenomena of current interest for physics, technology and, fundamentally, for teenagers.

Keywords: General theory of relativity; Secondary school; Teaching for understanding; Nature of science.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo nos proponemos argumentar sobre la relevancia de abordar la teoría general de la relatividad (TGR) en el nivel de enseñanza secundario, describir el marco teórico construido para diseñar una propuesta didáctica, tanto para ser utilizada por los docentes como por los alumnos, e identificar los tópi-

cos generativos que serán vertebradores en la transposición didáctica de una teoría tan compleja como lo es la TGR.

Los resultados que se vienen obteniendo desde hace varios años en astrofísica y cosmología, y que se divulgan permanentemente en los medios de comunicación masiva, motivan a los estudiantes de carreras científicas a aprender acerca de la TGR. Christensen y Moore (2012) sostienen que, actualmente, una serie de libros de texto innovadores posibilitan satisfacer esa demanda. Nuestra experiencia docente nos indica que los alumnos de las escuelas secundarias también están interesados por los mismos fenómenos, pero, lamentablemente, no existen libros de texto didácticos para ese nivel educativo que contemplen los hallazgos más recientes, interesantes y divulgados fuera del ámbito escolar. Y los que sí los contemplan, lo hacen desde el punto de vista de la divulgación, sin profundizar demasiado en aspectos conceptuales.

Para comprender los nuevos conocimientos científicos referidos, por ejemplo, a la cosmología y la astrofísica que se han desarrollado durante la última década, es necesario comprender en profundidad conceptos de la TGR. Por ejemplo, la expansión del universo, la materia oscura, los agujeros negros y, desde hace no más de un año, la medición de ondas gravitatorias que constituyen una nueva contrastación empírica de la propia TGR. Incluso este año se otorgó el Premio Nobel de Física a tres investigadores por sus aportes al Proyecto LIGO que realizó las primeras mediciones de dichas ondas. Los medios de comunicación de diversos países dedicaron tiempo y esfuerzo a difundir la noticia. Recurrieron a astrofísicos que intentaron que los ciudadanos comprendieran de qué se trataba ese hallazgo, por qué conmocionó tanto a la comunidad de físicos y astrónomos, qué implicaba para la ciencia y fuera de ella y, no menos importante desde la perspectiva de la naturaleza de la ciencia (NdC), por qué transcurrieron 100 años desde que fueron predichas por Einstein hasta que lograron detectarse.

Como es lógico suponer, al día siguiente del anuncio varios alumnos fueron a consultar con su profesor de Física¹: “*Profe ... ¿Qué es eso de las ondas gravitatorias?...*” Los mismos alumnos que se han interesado, además, en películas tales como “*Interestelar*” y han consultado también a sus profesores respecto de conceptos físicos mencionados en la misma. Si se tiene en cuenta que en la formación de grado los docentes no cursan materias que contemplen estos temas y que son escasos los textos didácticos que abordan la teoría de la relatividad –TER– (Arriasecq y Greca, 2007), es posible inferir que, lamentablemente, el docente no tendrá respuestas sólidas y se perderá una gran oportunidad para mantener el interés de los alumnos por la física y utilizar un recurso interesante como son las películas de ciencia-ficción.

Hasta aquí ya serían argumentos más que suficientes para proponer la incorporación de algunos tópicos de la TGR en el nivel secundario. Sin embargo, existen otras razones para la incorporación de la TGR y son las de índole curricular. En los últimos treinta años se han realizado reformas en los currículos de ciencias para el nivel medio en varios países. En el caso de la Física, se han incorporado temas que se encuadran en las denominadas física moderna y física contemporánea. Los diseños curriculares de Argentina para la escuela secundaria orientada a las ciencias naturales también contemplan los consensos internacionales al incorporar en sexto año “*Física Clásica y Moderna*” y, en los tópicos de física moderna, el aporte de Einstein mediante la teoría de la relatividad (Diseño Curricular para la Educación Secundaria, 2011). Respecto de la TGR, su comprensión es indispensable para abordar posteriormente aspectos básicos de la física de los agujeros negros, relevante para la comprensión de modelos cosmológicos de la astrofísica actual, tema propuesto en “*Filosofía e Historia de la Ciencia y la Tecnología*” en sexto año de la modalidad Ciencias Naturales.

II. MARCO TEÓRICO

Desde la perspectiva de NdC, en investigaciones anteriores (Arriasecq y Greca, 2004; Arriasecq y Greca, 2007; Arriasecq y Greca, 2012), se ha abordado la discusión acerca de qué elementos deberían ser tomados en consideración para presentar la TER desde una perspectiva histórica, epistemológica y socialmente contextualizada de acuerdo con ciertos consensos alcanzados en la didáctica de las ciencias. Consideramos que un objetivo prioritario es que los estudiantes de educación secundaria logren adquirir una mejor comprensión de la NdC, la cual se considera ya una parte esencial de la educación científica (Acevedo Díaz, 2008). La NdC es un metaconocimiento sobre la ciencia, que proviene del análisis interdisciplinar realizado por los especialistas en historia, filosofía y sociología de la ciencia, pero también por algunos científicos. Esta rama de la didáctica de las ciencias abarca una diversidad de aspectos, tales como qué es la ciencia, cómo es su funcionamiento interno y externo, cómo se construye y desarrolla el conocimiento que produce, cuáles son los métodos que son empleados para validar y difundir este conocimiento, cuáles son los valores implicados en las actividades científicas, cuáles son las características de

¹ Hecho real de una clase de la segunda autora de este trabajo.

la comunidad científica, cuáles y cómo son los vínculos con la tecnología, cuales son las relaciones de la sociedad con el sistema tecnocientífico y viceversa, cuales las aportaciones de éste a la cultura y al progreso de la sociedad (Acevedo Díaz, 2008).

Como sugiere Solbes (2013), la incorporación de ciertos contenidos conceptuales, procedimentales y actitudinales de física moderna y contemporánea, entre ellos la TER, podrían generar actitudes positivas en los alumnos respecto a la aplicación/utilidad de los desarrollos científicos y tecnológicos a la vida cotidiana. También sostiene que al mostrar las implicaciones sociales se podría favorecer la participación y la responsabilidad social de la ciudadanía en la toma de decisiones de carácter científico–tecnológico, basada en el análisis crítico que proporciona el conocimiento científico. Consideramos que los mismos argumentos son válidos para la TGR

Si se considera relevante enseñar TGR en la escuela secundaria, la siguiente cuestión es cómo hacerlo. Históricamente, la TGR no se ha enseñado siquiera a los estudiantes de nivel universitario porque ha sido considerada extremadamente difícil. La TGR se basa en los conceptos de geometría diferencial, expresados a menudo en el lenguaje del cálculo tensorial. Es decir, se requiere utilizar un nivel de matemáticas más complejo del que manejan la mayoría de los estudiantes de una carrera de grado.

Sin embargo, Christensen y Moore (2012) sostienen que casi todos los textos universitarios de relatividad general publicados en el siglo XXI se apartan del enfoque matemático y se focalizan en la física conceptual. Este tipo de texto sigue la tendencia denominada “enfoque física primero” (“physics–first approach” en inglés). Este enfoque fue propuesto por Hartle (2003), y su texto “Gravity” es el más representativo. Se focaliza en abordar los conceptos principales de la TGR pero en un nivel matemático que no supere el de primero y segundo año de carreras de grado. El aspecto más destacable del texto es la propuesta de gran cantidad de ejemplos de fenómenos astronómicos y cosmológicos que se explican con la TGR. Aunque el libro de Hartle enfatiza fuertemente los conceptos físicos, en los últimos capítulos del libro proporciona toda la matemática requerida para entender las ecuaciones de Einstein. Sin embargo, lo más interesante del texto es que ha sido diseñado para que la matemática, en una primera aproximación, pueda ser omitida.

Sin bien el “enfoque física primero” se ha extendido a nivel universitario en universidades de diversos países, consideramos que puede implementarse en las clases de escuela secundaria si se lo aborda desde un marco teórico adecuado. Las autoras de este trabajo investigan en el abordaje de TER en la escuela secundaria desde hace más de una década. En diversos trabajos, se indagaron las principales dificultades que surgen en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la TER para la escuela secundaria en la República Argentina y, a partir de los resultados obtenidos, se elaboró, implementó y evaluó una propuesta didáctica con un abordaje contextualizado histórica y epistemológicamente y fundamentado conceptual, psicológica y didácticamente. También se diseñó material escrito (destinado a docentes y a alumnos) para su enseñanza con la intención de propiciar un aprendizaje significativo en el marco de la de la *enseñanza para la comprensión* (Arriasecq y Greca, 2002, 2004, 2007, 2012; Arriasecq, Seoane, Cayul, Greca, 2016; Arriasecq, Greca y Cayul, 2017). Partiendo de estos resultados hemos comenzado a desarrollar un proyecto similar para la enseñanza de la TGR en la escuela secundaria con el objetivo que los alumnos comprendan los hallazgos astronómicos y las comprobaciones experimentales de modelos cosmológicos actuales.

Según la *enseñanza para la comprensión* (EpC; Wiske, 1999), la comprensión es la capacidad de un sujeto de utilizar lo que 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, 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? La respuesta a la segunda pregunta, implica clarificar lo que deben comprender los alumnos de los tópicos seleccionados, mediante la formulación de metas de comprensión explícitas, y establecer los desempeños de comprensión que son las actividades que los alumnos deben lograr realizar y por medio de los cuales demuestran que han alcanzado las metas de comprensión propuestas. En este trabajo nos centramos en dar respuestas a la primera y a la segunda pregunta. En el contexto de un trabajo de investigación más amplio que se está realizando, se abordarán las restantes.

III. METODOLOGÍA

Los tópicos que vale la pena comprender, desde el punto de vista del marco teórico de EpC, se seleccionaron a partir de una revisión bibliográfica que incluyó:

- los diseños curriculares vigentes en la Argentina;

- el texto “Gravity” (op. cit.) para analizar qué aspectos se consideran relevantes desde el punto de vista científico;
- un texto de divulgación, “100 años de relatividad” (Harari y Mazzitelli, 2007) escrito por astrofísicos, interesados en que la teoría de la relatividad sea difundida más allá del ámbito científico;
- un texto de nivel secundario, “Física Conceptual” (Hewitt, 2007) que en estudios previos (Arriassecq y otros, 2016) ha sido mencionado por los docentes como el texto más utilizado tanto por ellos como por sus estudiantes en el abordaje de contenidos físicos. Además, el libro “Física Conceptual” tiene las mismas características que el texto “Gravity” ya que ambos abordan a la Física desde el punto de vista conceptual.

Se identificaron los conceptos de la TGR abordados en los textos, el orden en que se presentan, si se los relaciona y compara con los conceptos de gravitación en mecánica clásica, en qué fenómenos de la astronomía o la cosmología se hace énfasis, cuál es la importancia otorgada a las contrastaciones empíricas de la teoría y los tiempos que demandó a la ciencia lograrlo y si mencionan cuestiones tecnológicas desarrolladas a partir de la teoría.

También se tuvo en cuenta los resultados obtenidos en una encuesta (anexo 1) realizada a cincuenta y siete alumnos de sexto año de una escuela pública de Tandil (Argentina), que finalizaban el nivel secundario, luego de haber abordado el tema gravitación y haber visto la película “Interestelar”².

El objetivo de esta encuesta era investigar, por un lado, si la película –que como investigadores consideramos que puede ser un recurso valioso– despierta también el interés de los alumnos. Además, se pretende identificar cuáles son los conceptos de la TGR abordados en la película que generan más interés en los alumnos. Por último, se intenta identificar cómo han conceptualizado ciertas nociones de la MC que son necesarios para comprender de manera significativa algunos conceptos vinculados con la TGR.

IV. RESULTADOS

A. Libros de texto

El texto “Gravity”, pensado para alumnos de grado e incluso posgrado, introduce la TGR de manera diferente a la forma clásica de los libros de ese nivel. Su autor propone:

1) Explorar primero y deducir después: las soluciones físicas más relevantes de la ecuación de Einstein se presentan primero y sin deducción. Por ejemplo, la noción de espacio–tiempo cuyas consecuencias observacionales serán exploradas por el estudio de lo que ocurre con los rayos de luz en él. Esto permite a los alumnos “zambullirse” dentro de los fenómenos físicos tan rápido como sea posible. Posteriormente, y dependiendo del nivel educativo que en el que se esté trabajando, se introduce la ecuación de Einstein y se resuelve para mostrar de donde se originan esas geometrías. Aquellos docentes y alumnos que tengan el tiempo suficiente para trabajar todo el texto, tendrían la posibilidad de comprender tanto la importancia de las soluciones como el camino que lleva a ellas. Sin embargo, aquellos que no tienen el tiempo suficiente, habrán comprendido, al menos, algunos de los fenómenos básicos para los cuales es importante la noción de espacio–tiempo curvo.

2) Abordar solo los ejemplos más simples: las soluciones más simples de la ecuación de Einstein son las más relevantes desde el punto de vista físico. Por ejemplo, se discuten los agujeros negros con masa y momento angular pero no se considera su carga; se analizan las cosmologías homogéneas e isotrópicas pero no las anisotrópicas; se describen estrellas esféricas pero sin considerar la rotación.

3) Introducir conceptos matemáticos nuevos solo cuando sean necesarios: solamente son necesarias unas pocas herramientas matemáticas para entender la geometría del espacio tiempo y el movimiento de los rayos de luz. Nociones básicas de métricas, de cuadvectores y de superficies geodésicas suelen ser suficientes para la mayoría de los conceptos que se desarrollan en todos los capítulos del texto. Por ejem-

² La película “Interestelar”, estrenada en el año 2014, fue escogida para trabajar la TGR en el aula por diversos motivos. Aborda varias cuestiones físicas (agujeros negros, agujeros de gusano, dilatación del tiempo, gravitación, mareas, etc.). A la vez es atractiva para los alumnos (ganadora del Oscar por sus efectos especiales, dirigida por Nolan el mismo director de la saga de Batman) como puede observarse en los resultados de la encuesta. Sin embargo, el factor más importante es que la película fue inspirada en el trabajo de Kip Thorne, físico conocido por sus numerosas contribuciones en el campo de la física gravitacional y la astrofísica y por haber formado a toda una generación de científicos. Es, además, uno de los más reconocidos expertos en las aplicaciones de la TGR a la astrofísica. Thorne participó en la película como productor ejecutivo y consultor científico. Escribió el libro “*The science of Interstellar*”, donde desarrolla todos los cálculos necesarios para simular los efectos visuales de los fenómenos físicos involucrados en el relato con rigor científico. En octubre de 2017 recibió junto a Weiss y Barish el Premio Nobel por su trabajo en el Proyecto Ligo para la detección de ondas gravitacionales.

plo, las nociones de tensor y derivada covariante se introducen en el capítulo 20, uno de los últimos del texto.

4) Enfatizar los fenómenos físicos y sus conexiones con la experimentación y la observación: El GPS, las estrellas de neutrones, las ondas gravitatorias, la estructura a gran escala del universo son solo algunos de los fenómenos del universo para los cuales la TGR son importantes. En este texto, se enfatiza la estrecha conexión entre la TGR con la experimentación y la observación. La astrofísica y la cosmología permiten encontrar muchos ejemplos de relatividad general, sin embargo, el autor del texto tiene muy claro que no se trata de un libro de astrofísica o cosmología. La conexión entre la teoría y la observación se realiza a través de la ejemplificación de los modelos más simples y de una forma cualitativa.

5) Analizar los experimentos clásicos realizados para contrastar la teoría: El autor asume que las contrastaciones experimentales se van acumulando a lo largo del tiempo y que requieren de una tecnología muy específica. Si bien considera necesario analizar algunas contrastaciones empíricas, prefiere analizar unos pocos ejemplos clásicos que muestren los métodos que se utilizan para realizarlas.

A partir de lo asumido en los puntos anteriores, el autor organiza el texto en tres partes. En la parte uno, introduce la idea que “la gravedad es geometría” y realiza una revisión de los aspectos principales de la mecánica newtoniana y de la TER necesarios para comprender la TGR. En la parte dos introduce las ideas básicas de TGR y se focaliza en la explicación y la descripción de los agujeros negros, principales aspectos de las cosmologías y las ondas gravitacionales del espacio-tiempo mediante el estudio del movimiento de partículas y rayos de luz en ese espacio-tiempo. Las geometrías son presentadas y analizadas, pero no deducidas. Ello ocurre en la parte tres, luego que se introduce la ecuación de Einstein y la matemática necesaria. En esta parte se aborda, además, un aspecto fundamental de la teoría como es la producción de ondas gravitatorias, entre otros ejemplos para los cuales las ecuaciones de Einstein son esenciales.

En el texto de divulgación “100 años de relatividad” (Harari y Mazzitelli, 2007), el primer concepto vinculado con la TGR se introduce como un principio más a los dos principales de la TER (principio de relatividad y velocidad de la luz absoluta): el principio de equivalencia (“en presencia de gravedad, las leyes de la física en los sistemas en caída libre son las mismas que en los sistemas inerciales, en ausencia de gravedad”). Esto es, los sistemas en caída libre son indistinguibles de los sistemas inerciales. En este texto no se aborda la TGR en un capítulo completamente separado de la TER. El siguiente concepto relevante para comprender la TGR es la relación gravitación y tiempo: el tiempo transcurre más lento cerca de un objeto masivo. La relación entre materia y espacio-tiempo: la materia curva el espacio-tiempo. Este aspecto de la TGR requiere de una matemática avanzada donde conocida la masa y la energía y aplicando las denominadas ecuaciones de Einstein es posible calcular la curvatura del espacio-tiempo. Sin embargo, adoptando la postura “física primero” se puede realizar una aproximación al concepto prescindiendo de la matemática, como en este texto. Posteriormente se analizan contrastaciones de la TGR. Un capítulo completo se dedica a cuestiones astronómicas: desviación de la trayectoria recta de la luz por la atracción gravitacional y lentes gravitacionales, entre otras. Otro capítulo aborda los agujeros negros, desde una perspectiva histórica que contempla, además, la descripción de las contrastaciones empíricas de los mismos. En otro capítulo se analizan las ondas gravitacionales, concepto que redefine la noción de atracción gravitatoria a distancia e instantánea. En el último capítulo se abordan cuestiones relacionadas con modelos cosmológicos basados en la TGR y sus consecuencias; fundamentalmente el modelo del Big Bang.

En el caso del libro “Física Conceptual” (Hewitt, 2007), el autor dedica un capítulo a la TGR, a continuación de la TER. Los tópicos que aborda son: principio de equivalencia; desviación de la trayectoria recta de la luz por la gravedad; relación gravitación y tiempo; relación entre materia y espacio-tiempo; gravedad, espacio y una nueva geometría; ondas gravitacionales; y, por último, comparación del concepto de gravitación de Newton y de Einstein.

B. Diseños curriculares

En el Diseño Curricular para la Educación Secundaria Orientación Cs. Naturales (Ley de Educación Nacional N° 26206, 2011) se plantea para la materia Física Clásica y Moderna correspondiente a 6^o año los siguientes tópicos:

Física moderna. El fracaso de la física clásica: los problemas de la Física clásica al inicio del siglo XX: la velocidad de la luz, y los espectros atómicos. Las primeras propuestas de solución: Einstein y Bohr: Relatividad y cuantificación. Órdenes de magnitud en donde se manifiestan las nuevas teorías. Corroboración y validez. La unificación de las fuerzas: las fuerzas en la Naturaleza. Las cuatro interacciones fundamentales. Campos y partículas. Noción de partículas mediadoras. La unificación electro-débil. La gran unificación.

Como puede observarse, la Teoría de la Relatividad se menciona de manera muy general y, en principio, no hay nada relacionado con la TGR. Sin embargo, su comprensión es indispensable si se quiere abordar posteriormente los aspectos básicos de la física de los agujeros negros, que son relevantes para la comprensión de modelos cosmológicos de la astrofísica actual. Este tema es propuesto en “*Filosofía e Historia de la Ciencia y la Tecnología*” en sexto año de la modalidad Ciencias Naturales.

C. Encuesta

En los siguientes gráficos se muestran los resultados obtenidos en los incisos “a” hasta el “f” de la consigna 1 de la parte 1 y la consigna 1 de la parte 2 correspondientes a la encuesta respondida por los alumnos. En las mismas se indagan aspectos de la película “Interstellar” referidos a temas de física vinculados con la TGR y que, además, pueden ser de interés para los alumnos.

En la figura 1, se observa que el 69,81 % de los alumnos que vieron la película la calificó con el valor 5 (“me gustó mucho”), el 28,3 % con el valor 4 (“me gustó un poco”) y el 1,89 % con el valor 3 (“ni me gustó ni me disgustó”)

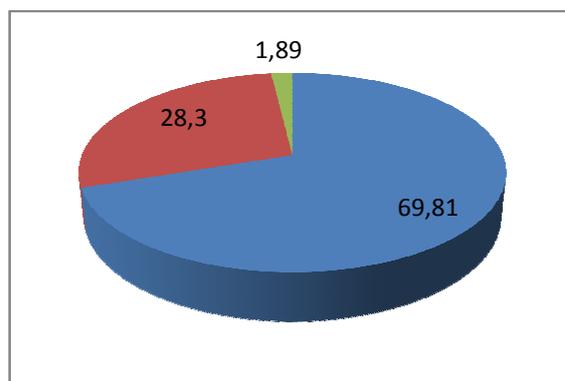


FIGURA 1. Interés de los alumnos en la película “Interstellar”.

De los temas abordados en la película que los alumnos manifiestan conocer, el mayor porcentaje corresponde a agujeros negros (aunque aclaran que superficialmente) y gravitación.

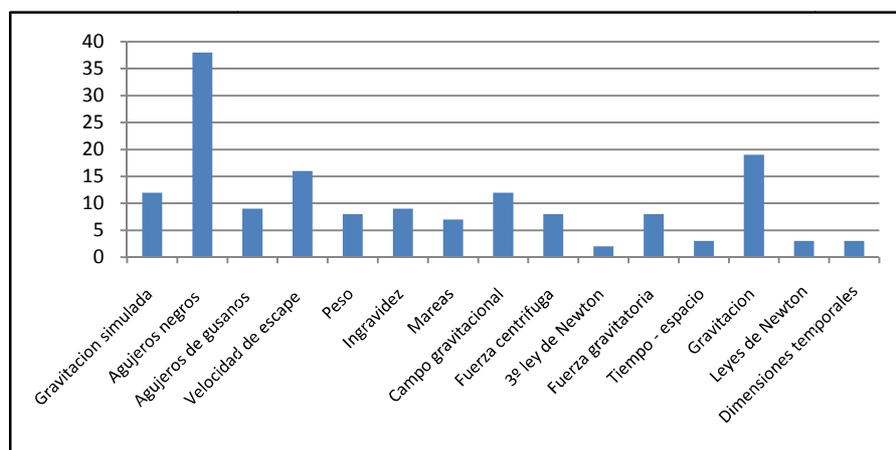


FIGURA 2. Temas abordados en la película “Interstellar” que los alumnos conocen.

La información sobre los temas que manifiestan conocer fue obtenida principalmente en la escuela.

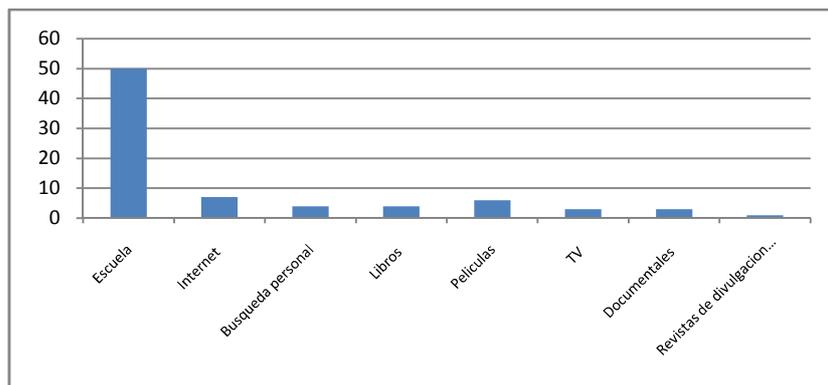


FIGURA 3. Fuentes de información sobre los temas indicados en la figura 2.

De los temas de física abordados en la película que los alumnos no conocen, o conocen superficialmente, se destacan, principalmente: dimensiones espacio-temporales del universo, agujeros negros, agujeros de gusano y teoría de la relatividad.

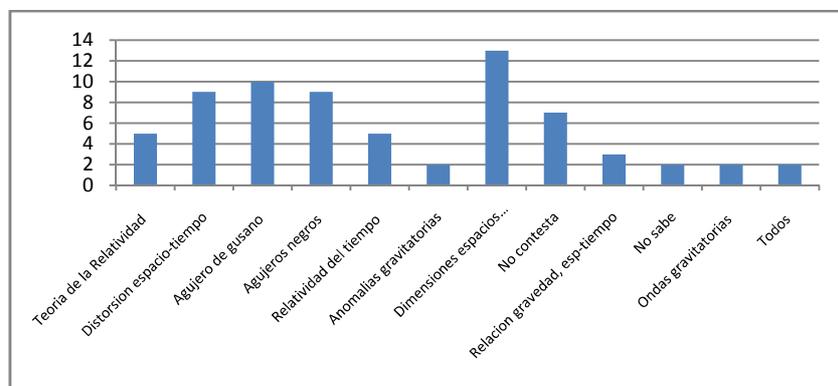


FIGURA 4. Temas de física tratados en la película “Interstellar” que los alumnos no conocen en profundidad.

Al indagar sobre los temas de física tratados en la película “Interstellar” que les interesaría conocer, los alumnos mencionaron: dimensiones espacio-temporales, agujeros negros y agujeros de gusano, fundamentalmente.

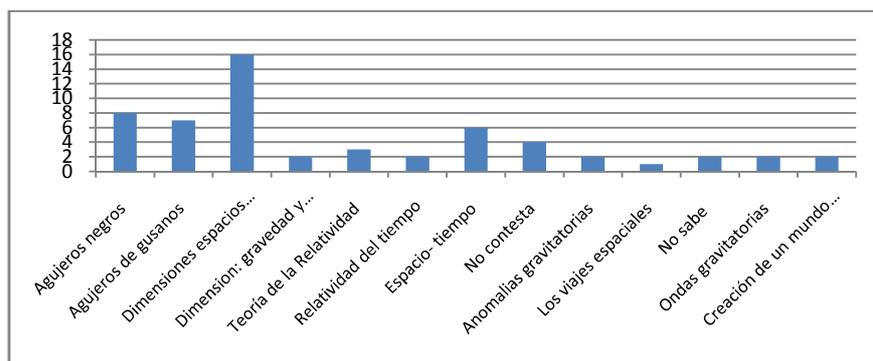


FIGURA 5. Temas de física tratados en la película “Interstellar” que les interesaría conocer a los alumnos.

Más del 40 % de los alumnos manifiesta que la película tiene sustento científico y un porcentaje equivalente sostiene que el argumento tiene una base científica, pero, al mismo tiempo, también cuestiones vinculadas con la ciencia ficción.

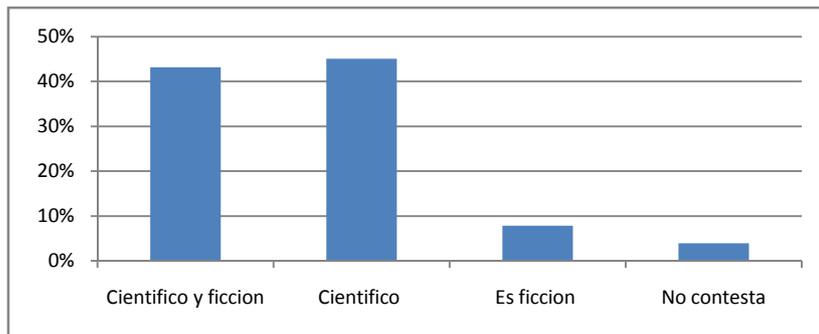


FIGURA 6. Sustento científico de la película “Interstellar”.

El 75 % de los alumnos encuentra relación entre los temas de física abordados en la película con cuestiones de la vida cotidiana.

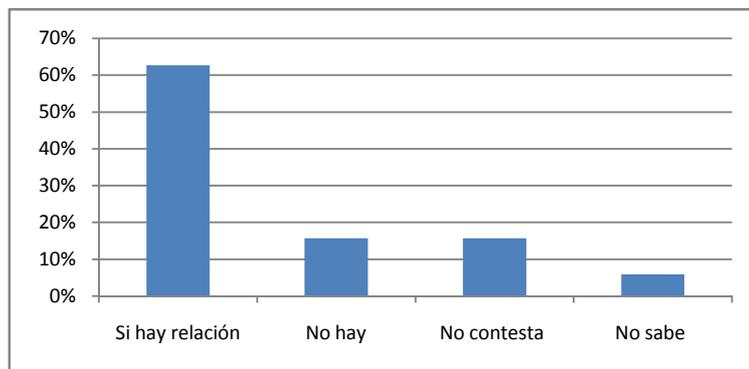


FIGURA 7. Relación de los temas de física con cuestiones de la vida cotidiana abordados en la película.

Al igual que en la figura anterior, se observa que el 75 % de los alumnos encuentra relación entre los temas de física abordados en la película con cuestiones tecnológicas.

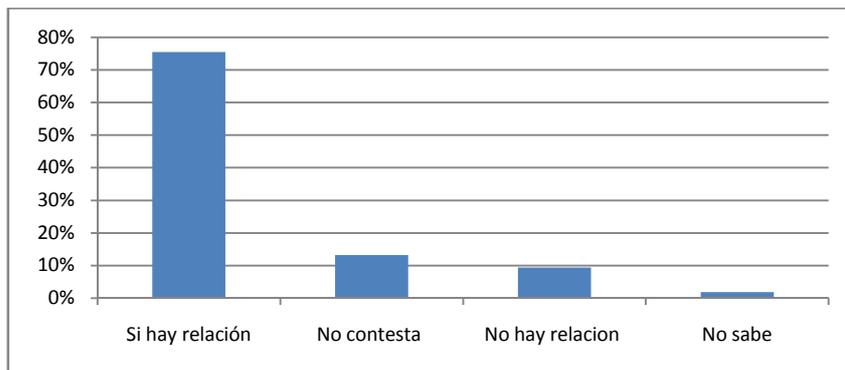


FIGURA 8. Relación de temas de física abordados en la película con la tecnología.

Como puede observarse, la película “Interstellar”, además de los atributos ya mencionados, despierta gran interés en los alumnos lo que la convierte en un muy buen recurso para abordar conceptos de TGR. Entre los temas de mayor interés manifestados por los alumnos se encuentran los agujeros negros, concepto central dentro del abordaje “física primero” y uno de los tópicos vinculados con el concepto de ondas gravitacionales. Como ya se indicó, este tema que se ha divulgado ampliamente en los medios de comunicación a partir de haber sido detectadas recientemente y de haberse otorgado el Premio Nobel de Física a los científicos que tuvieron una participación relevante en el proyecto LIGO, responsable de su medición. En el marco de la EpC la motivación del alumno es fundamental para escoger los tópicos generativos. En este caso, los temas que motivan a los alumnos parecen coincidir con los planteados en los textos analizados (provenientes del ámbito científico) para comprender la TGR y con la gran cantidad de recursos disponibles para incorporar en secuencias didácticas.

D. Tópicos generativos, metas y desempeños de comprensión

Los tópicos generativos que se proponen para la TGR teniendo en cuenta el análisis de los libros de texto, los resultados de la encuesta realizada a los alumnos y lo sugerido en los diseños curriculares son: Principio de Equivalencia, espacio-tiempo curvo, relación entre gravedad y tiempo, relación entre materia y espacio-tiempo, contrastación de la TGR, agujeros negros, ondas gravitacionales, modelos cosmológicos y aplicaciones tecnológicas

A partir de los tópicos generativos propuestos se elaboraron metas (tabla I) y desempeños de comprensión (tabla II) referentes a contenidos de la mecánica clásica, que son necesarios que los alumnos hayan profundizado para poder abordar los nuevos conceptos de la TGR. Cabe mencionar que en las tablas I y II las metas y desempeños se relacionan con los conocimientos que los alumnos deberían comprender según la legislación vigente en Argentina. Las metas de comprensión específicas para la TGR se presentan en la tabla III.

TABLA I. Metas de comprensión referida a los tópicos de Gravitación en Mecánica Clásica.

1.- Establecer relaciones significativas entre la primera, segunda y tercera ley de Newton.
2.- Interpretar el significado de la Ley de Gravitación Universal como una interacción que depende de las masas de los objetos y la distancia de separación a la que se encuentran.
3.- Reconocer las variables que intervienen en la noción de fuerza centrípeta.
4.- Identificar a la fuerza centrífuga como una fuerza ficticia.
5.- Diferenciar los conceptos de peso, ingravidez y fuerza gravitatoria.
6.- Identificar las causas de las mareas terrestres, tanto en medio sólidas, gaseosas o líquidas.
7.- Analizar las variables que intervienen en la definición de campo gravitacional,
8.- Describir la variación del campo gravitacional de un objeto masivo con relación a la distancia que se encuentre otro objeto.
9.- Vincular el concepto velocidad de escape, con la masa y el radio, en diversos cuerpos celestes.

TABLA II. Desempeños de comprensión referidas a los tópicos de Gravitación en Mecánica Clásica.

1.- Resolver problemas que involucren establecer relaciones entre las leyes de Newton, reconociéndolas como integrantes de un sistema teórico y no como conceptos aislados.
1.1. Determinar la relación entre masa e inercia.
1.2. Diferenciar los conceptos masa y peso.
1.3. Calcular velocidades, aceleraciones y fuerzas que actúan sobre diferentes objetos.
2. Describir como varía la fuerza gravitatoria cuando se modifica la masa o la distancia entre dos o más objetos.
2.1 -Aplicar la Ley de Gravitación Universal a la resolución de problemas algebraicos, donde se debe determinar el valor de la fuerza, la masa o la distancia de los objetos que interactúan.
3.- Identificar la existencia de fuerza centrípeta en situaciones de la vida cotidiana.
4.- Reconocer que la fuerza centrífuga en un marco de referencia rotatorio es una fuerza ficticia.
4.1 Describir el funcionamiento de estaciones espaciales empleando el concepto de gravitación simulada.
4.2. Explicar la aparente contradicción en diferentes escenas de la película donde los astronautas se encuentran en situaciones de ingravidez y en otras caminan normalmente.
4.3 Reconocer y explicar por qué las colonias futuristas deben ser pensadas como hábitat giratorio de diámetros grandes o pequeños que giren con gran rapidez para obtener gravitación simulada.
5.- Vincular la medición del peso de un objeto con la existencia de una fuerza de soporte en la resolución de problemas.
5.1 Analizar y debatir actividades que involucran cuestiones de peso, ingravidez y fuerza gravitatoria.
6.- Explicar la causa de la formación de olas gigantes que se observan en una escena de la película "Interestelar".
7.- Emplear el concepto de campo gravitacional para calcular y comparar, la intensidad del mismo, en los diferentes planetas que conforman el sistema solar, el Sol y otras estrellas.
8.- Calcular como varía la magnitud del campo gravitacional de un objeto cuando se varía la distancia al mismo.
9.- Comparar la velocidad de escape en diferentes cuerpos celestes.
9.1 Plantear y resolver problemas numéricos aplicando el concepto de rapidez de escape.

TABLA III.Metas de comprensión referidas a la TGR.

1.– Interpretar el principio de equivalencia.
2.– Analizar aspectos básicos de las geometrías no euclidianas.
3.– Caracterizar el espacio–tiempo curvo.
4.– Establecer la relación entre gravedad y tiempo.
5.– Establecer la relacione entre gravedad y espacio.
6.– Identificar la relación entre materia y espacio–tiempo.
7.– Interpretar el significado de agujero negro.
8.– Reconocer la variación del tiempo en cercanías de un agujero negro.
9.– Interpretar el concepto de ondas gravitacionales.
10.– Analizar las diferentes contrastaciones de la TGR.
11.– Interpretar diferentes Modelos cosmológicos actuales.
12.– Reflexionar sobre las diversas aplicaciones tecnológicas de la TGR.
13.– Interpretar información periodística vinculada con la TGR.
14.– Debatir sobre el proceso de contrastación empírica de la TGR.
15.– Investigar sobre el rol de las mujeres científicas en el proceso de corroboración empírica de la TGR.

Con respecto a cómo propiciar la comprensión, se prevé la utilización de documentales de divulgación avalados por Ministerio de Educación, artículos periodísticos con información sobre avances científicos relevantes que involucren, directa o indirectamente aspectos vinculados con la TGR, simulaciones computacionales, análisis exhaustivo de la película “Interestelar”, y otras tales como: “Apolo 13”, “Contacto”, “Gravedad”, “El marciano”, etc., o capítulos de series como “Los Simpson”, libros de ciencia–ficción, entre otros recursos que suelen generar gran interés en la mayoría de los alumnos. Como ya se ha indicado, el abordaje que creemos más apropiado es del “física primero”.

V. COMENTARIOS FINALES

Consideramos que es posible introducir la TGR en el nivel secundario teniendo en cuenta la perspectiva “física primero” como una estrategia que, trabajada en el contexto de un marco teórico didáctico sólido que integra el modelo de *enseñanza para la comprensión* y elementos de naturaleza de la ciencia, podría propiciar una comprensión de los conceptos más relevantes de la TGRy de la propia mecánica clásica. Estos conceptos son necesarios para comprender fenómenos de interés para los alumnos, como es el caso de los agujeros negros, como así también interpretar críticamente la información proveniente de los medios de comunicación. Particularmente es interesante trabajar cuestiones de género vinculadas con la actividad científica dado que la vocera del Proyecto LIGO es una física argentina y, en las películas como Contacto e “Interestelar” las mujeres científicas tienen un rol central.

En una próxima etapa del proyecto de investigación, que se está desarrollando, se elaborará, conjuntamente con el desarrollo de la secuencia didáctica, material de apoyo para docentes y alumnos. El material bibliográfico que podría utilizarse como guía para el desarrollo de una secuencia didáctica con las características mencionadas contempla la reelaboración de los primeros capítulos del texto “Gravity”, que aborda los mismos temas que el libro “Física Conceptual” y “Cien años de relatividad”. A estos recursos sumaremos el uso de simulaciones computacionales del estilo que hemos trabajado hasta el momento para la TER y otros recursos tales como películas, textos de ciencia ficción, documentales, entrevistas a científicos y notas periodísticas donde se discutan, entre otros aspectos de interés, las contrastaciones más recientes de la TGR.

REFERENCIAS

- Acevedo Díaz, J.A. (2008). El estado actual de la Naturaleza de la Ciencia en la Didáctica de las Ciencias. *Revista Eureka*, 5(2),134–169.
- Arriasecq, I. y Greca, I. (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)1,55–69.

- 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. Recuperado de <http://www.saum.uvigo.es/reec>
- Arriasecq, I. y Greca, I. (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. y Greca, I. (2012). A Teaching–Learning Sequence for the Special Relativity Theory at High School Level Historically and Epistemologically Contextualized. *Science & Education*, 21(6),827–851.
- Arriasecq, I., Seoane, E., Cayul, E. y Greca, I. (2016). Teoría Especial de la Relatividad en la escuela secundaria: perspectiva de los docentes y análisis de textos. *Revista Enseñanza de la Física*, (28),15–22. Recuperado de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/15618/15425>.
- Arriasecq, I., Greca, I. y Cayul, 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. *Revista Enseñanza de las Ciencias*, (35)1, 133–155. Recuperado de <http://ensciencias.uab.es/article/view/v35-n1-arriasecq-greca-cayul>
- Christensen, N. and Moore, T. (2012). Teaching general relativity to undergraduates. *Physics Today*, 65(6),41 – 47.
- Diseño Curricular para la Educación Secundaria, 6to. año: Orientación Cs. Naturales, Dirección General de Cultura y Educación de la Provincia de Bs. As., 2011.
- Harari, D. y Mazzitelli, D. (2007). *100 años de relatividad*. Buenos Aires: Eudeba.
- Hurtles, J. B. (2003). *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. San Francisco, Estados Unidos: Addison–Wesley.
- Hewitt, P. (2007). *Física Conceptual*. México: Pearson Educación.
- Levrini, O. (2014). The role of history and philosophy in research on teaching and learning of relativity. In *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, pp. 157–181. Netherlands: Springer.
- Solbes, J. (2013). ¿Física contemporánea o física para la ciudadanía? *Alambique*, (75),9–17.

ANEXO 1

PARTE 1

Luego de ver la película “*Interstellar*”:

- a) Indicá si te ha gustado en una escala de 1 a 5, donde “1” es no me gustó nada; “2” no me gustó demasiado; “3” ni me gustó ni me disgustó; “4” me gustó un poco y “5” me gustó mucho. Justifica tu respuesta.
- b) ¿Qué temas, referidos a física, de los tratados en la película ya conocías?
- c) ¿De dónde obtuviste información acerca de esos temas?
- d) ¿Qué temas, referidos a física, de los tratados en la película no conocías en profundidad?
- e) ¿Qué temas, referidos a física, de los tratados en la película que no conocías te hubiera interesado que se trataran en las clases de física de la escuela secundaria?
- f) ¿Considerás que el argumento de la película es una ficción o que tiene una base científica? Justificá tu respuesta.
- g) En una escena de la película, parte de la tripulación de la nave debe huir rápidamente de un planeta porque se produce una ola gigante? A qué se debe la formación de esa ola?
- h) En otra escena, uno de los integrantes de la tripulación se queda en la nave mientras otros van a recorrer un planeta. Cuando regresan luego de unas dos horas (para quienes recorren el planeta), para el tripulante de la nave pasaron más de 20 años. ¿A qué se debe? ¿Puedo ocurrir realmente o se trata solo de ciencia ficción?

PARTE 2

- 1) Respondé las siguientes preguntas:
 - a) ¿Tenés alguna información sobre qué son los “agujeros negros”, las “ondas gravitatorias”, la “teoría de la relatividad especial” y la teoría de la relatividad general? Si tu respuesta es afirmativa, en alguno de los casos o en todos, indicá con tus palabras que entendés por ellos.
 - b) ¿De dónde obtuviste la información?
 - a) Clases de Física en la escuela.
 - b) Libros de Física escolar.
 - c) Libros de divulgación científica.
 - d) Revistas de divulgación científica.
 - e) Libros de ciencia ficción.
 - f) Películas (cual /cuáles).
 - g) Programas televisivo de divulgación científica (documentales)
 - h) Series de televisión (estilo Big Bang Theory)
 - i) Internet (si este fuera el caso en que sitio).
 - j) Otros (especifique)
 - c) ¿Te interesan esos temas? ¿Por qué?
 - d) ¿Considerás que, estos temas, tienen relación con cuestiones de la vida cotidiana? ¿por qué?
 - e) ¿Considerás que tienen relación con la tecnología? ¿Por qué?
- 2) Explica con tus palabras el significado de la Ley de Gravitación Universal.
- 3) Proponé dos ejemplos, uno de algún acontecimiento que ocurre en la Tierra y otro vinculado con cuerpos celestes tales como estrellas, galaxias, planetas, satélites, etc., donde puede aplicarse la Ley de Gravitación Universal para explicar dicho acontecimiento.
- 4) ¿Qué tienen en común los siguientes fenómenos: un objeto que se deja caer desde lo alto de una torre y la Luna girando alrededor del sol?
- 5) ¿Por qué un objeto que tenemos, por ejemplo, en la mano cae cuando lo soltamos? ¿Cómo se “enterra” que debe caer?
- 6) ¿Por qué giran los planetas alrededor del Sol?
- 7) Cuando una persona practica paracaidismo y se lanza de un avión, ¿cuál es el peso mientras cae libremente?
- 8) La situación de la pregunta anterior, ¿tiene alguna relación con la de un astronauta en el espacio exterior lo suficientemente alejado de cuerpos masivos?
- 9) ¿Qué significa para vos el concepto de “campo gravitacional”? Proponé un ejemplo.