

La relatividad general en la educación básica y media: una revisión sistemática

Edwar Alfonso Castañeda Zapata 

Facultad de Educación, Universidad de Antioquia, Colombia.
edwar.castaneda@udea.edu.co

Sonia Yaneth López Ríos 

Facultad de Educación, Universidad de Antioquia, Colombia.
sonia.lopez@udea.edu.co

Jaime Alberto Osorio Vélez 

Facultad de Educación, Universidad de Antioquia, Colombia.
jaime.osorio@udea.edu.co

[Recibido: 16 agosto 2023, Revisado: 26 diciembre 2023, Aceptado: 8 mayo 2024]

Resumen: La relatividad general es una teoría que en los últimos años se ha divulgado con mayor frecuencia en los medios de comunicación, con motivo de los nuevos descubrimientos en el área de la astrofísica y la cosmología, como la detección de las ondas gravitacionales y las imágenes de agujeros negros. Sin embargo, dicha teoría rara vez se enseña en la educación básica y media a pesar de su validez y aplicabilidad en diversas áreas. El objetivo de este trabajo es analizar la incorporación de la relatividad general en estos niveles educativos. Para ello, se aplica el protocolo PRISMA en una revisión sistemática de artículos científicos entre los años 2012 y 2022, proporcionados por bases de datos como Web of Science, Scopus y Dialnet. Se eligieron artículos en español, inglés y portugués referentes a propuestas de enseñanza en las que se abordaran conceptos y aplicaciones de la relatividad general para la formación de estudiantes de la educación básica y media. Se analizaron 43 estudios en los que se realizan tratamientos cualitativos y cuantitativos de esta teoría y se resalta la enseñanza de conceptos como el espacio-tiempo curvo, agujeros negros y ondas gravitacionales. Se concluye, tras el análisis, que hay una preferencia por un tratamiento cualitativo de los conceptos de la relatividad general y se identifican diversos recursos didácticos para su enseñanza en la educación básica y media. Por último, se enfatiza en la importancia de actualizar los currículos de ciencias, con la introducción de la relatividad general, para lograr un aprendizaje holístico y contextualizado de la física.

Palabras clave: Relatividad general; Enseñanza de la física; Revisión sistemática.

General relativity in primary and secondary education: a systematic review

Abstract: General relativity is a theory that has been reported more frequently in the media in recent years due to discoveries in astrophysics and cosmology, such as the detection of gravitational waves and images of black holes. However, this theory is scarcely taught in primary and secondary education despite its validity and applicability in various areas. This work aims to analyze the incorporation of general relativity in these educational levels. Thus, the PRISMA protocol is applied in a systematic review of scientific articles between 2012 and 2022, provided by databases such as Web of Science, Scopus, and Dialnet. Research articles in Spanish, English, and Portuguese were selected to account for pedagogical interventions addressing concepts and applications of general relativity for the training of primary and secondary education students. Forty-three studies were analyzed in which qualitative and quantitative treatments of this theory are carried out, and the teaching of concepts such as curved space-time, black holes, and gravitational waves are highlighted. The analysis led us to conclude that there is a preference for a qualitative treatment of the concepts of general relativity. Besides, various didactic resources are identified for its teaching in primary and secondary education. Finally, updating science curricula is emphasized by introducing general relativity to achieve holistic and contextualized learning.

Keywords: General relativity; Physics teaching; Systematic review.

Para citar este artículo: Castañeda-Zapata, E. A., López-Ríos, S. Y. y Osorio-Vélez, J. A. (2024). La relatividad general en la educación básica y media: una revisión sistemática. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 21(2), 2303. doi:10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2024.v21.i2.2303

Introducción

La Relatividad General (RG) es la teoría más reciente que describe la gravedad, formulada por Albert Einstein en una serie de artículos desde 1915. Para Einstein, la gravedad no es considerada como una fuerza, sino como una curvatura del espacio-tiempo, una entidad de cuatro dimensiones (tres espaciales y una temporal) que se deforma por la presencia de masa/energía en ella (Einstein, 1916; Wood et al., 2016).

Son muchas las evidencias empíricas que respaldan esta teoría; por ejemplo, en el año 2017 los físicos Rainer Weiss, Barry Barish y Kip Thorne, recibieron el premio Nobel de Física por sus decisivas contribuciones al Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser (LIGO, por sus siglas en inglés) y a la observación de las ondas gravitacionales. En el año 2020, los astrónomos Roger Penrose, Reinhard Genzel y Andrea Ghez, ganaron el premio Nobel de Física; el primero por demostrar la existencia de los agujeros negros según la teoría de Einstein; y los otros dos fueron distinguidos por el descubrimiento de un objeto supermasivo en el centro de la Vía Láctea.

Estos hallazgos muestran que la RG se encuentra inmersa en una variedad de descubrimientos astrofísicos y cosmológicos (Christensen y Moore, 2012) y que permite entender algunos fenómenos que la mecánica clásica no pudo explicar; por ejemplo, ¿por qué existe la gravedad? Además, estos resultados muestran la relevancia de abordar esta teoría en la educación básica y media para que el estudiante comprenda algunos de los nuevos avances tecnológicos (Dua et al., 2020), como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés).

La relatividad no sólo es importante para entender el universo y el desarrollo de nuevas tecnologías, sus conceptos y aplicabilidad pueden ser favorables para que los estudiantes se interesen por estudiar carreras relacionadas con las ciencias. Además, la enseñanza de la física contemporánea (entre ella la relatividad) permite abordar aspectos asociados a la naturaleza de la ciencia (NdC) (Park et al., 2019), analizar el rol de la tecnología en los descubrimientos científicos y se pueden introducir cuestiones vinculadas con la sociología de la ciencia (Cayul et al., 2019; García-Carmona, 2020). Por supuesto, abordar estos aspectos de NdC es crucial; en primer lugar, porque son un componente constitutivo y relevante de la alfabetización en ciencia y tecnología (Manassero y Vázquez, 2019; García-Carmona et al., 2018) y, en segundo lugar, las investigaciones han mostrado que la mayoría de los estudiantes y profesores no tienen una comprensión adecuada sobre aspectos de la NdC (Brunner y Abd-El-Khalick, 2020).

Aun así, esta teoría rara vez se enseña en la educación básica y media (Postiglione y De Angelis, 2021a). Esto puede deberse a varios motivos; en primer lugar, a la falta de currículos actualizados que describan qué y cómo se pueden enseñar conceptos de la física relativista en la educación básica y media (Kaur et al., 2017a; Park et al., 2019). Pues aún se conserva la idea de espacios y tiempos absolutos y la gravedad como una fuerza que actúa de manera instantánea, incluso cuando los medios de comunicación hablan de nuevos descubrimientos con sustentos en la teoría de la relatividad (Foppoli et al., 2019).

En segundo lugar, la relatividad implica unos desarrollos matemáticos complejos para estudiantes de este nivel, incluso, para los primeros años de universidad. El lenguaje

tensorial puede ser una de las barreras que impiden enseñar la relatividad a los estudiantes más jóvenes (Choudhary et al., 2020; Kersting et al., 2020).

Adicionalmente, la mayoría de las investigaciones orientadas a la enseñanza de la relatividad, se enfocan en el tratamiento de la relatividad especial (RE) y pocas abordan la RG (Kersting et al., 2018); por supuesto, el estudio de la RE es importante para comprender fenómenos en el espacio-tiempo plano, pero también lo es la RG, para entender algunas de las propiedades o fenómenos que se hacen presente en el espacio-tiempo curvo, como la dilatación gravitacional del tiempo.

Ahora bien, más allá de las dificultades que se describen para la enseñanza de la RG a estos niveles educativos, es importante analizar los estudios que se han realizado en torno a su abordaje, resaltando tanto los conceptos, principios y aplicaciones que se describen allí, así como los recursos didácticos que se han implementado. Este análisis es importante porque la RG hace uso de una serie de concepciones nuevas, las cuales, los profesores generalmente consideran que son demasiado difíciles y avanzadas para que los jóvenes las comprendan (Choudhary et al., 2020); sin embargo, no son ajenos a ellos, ya que los pueden encontrar en noticias divulgadas por los medios de comunicación (Almeida y Soltau, 2022), las redes sociales o las películas de ciencia ficción (Da Rosa et al., 2017; Rodrigues y Bueno, 2022). Por lo tanto, vale la pena preguntarse por aquellas ideas de la RG que los jóvenes ven en contextos distintos al educativo y reflexionar sobre la manera de llevarlos al aula de clase sin que las matemáticas sean un impedimento.

Por otra parte, es importante analizar qué recursos didácticos se han implementado para la enseñanza de estos conceptos, teniendo en cuenta la complejidad conceptual y matemática de la teoría. Para el caso de la enseñanza de la RE se puede encontrar, por ejemplo, que los autores utilizaron algunos recursos didácticos o geométricos para contrarrestar sus dificultades de enseñanza y aprendizaje, como el uso de diagramas espacio-temporales (Prado et al., 2020), así como el uso de herramientas multimedia (Belloni et al., 2004). Incluso, se han propuesto juegos con entornos relativistas para que los estudiantes adquieran una "sensación" de relatividad y con el tiempo, desarrollen una intuición sobre sus efectos (Sherin et al., 2016). Para el caso de la RG, se puede encontrar en algunos estudios, incluso en libros de divulgación como el de Física Conceptual de Hewitt (2007), siendo este, a propósito, el libro más utilizado por los profesores que habían abordado conceptos de relatividad en el aula (Arriasecq et al., 2017), algunos recursos didácticos para enseñar RG, como los experimentos imaginarios, simulaciones y analogías, entre ellas, la analogía de la lámina de látex, que consiste en deformar la lámina dejando un objeto sobre ella; luego se lanzan objetivos de menor masa, por ejemplo, canicas y estas se mueven en torno a la masa central, simulando el movimiento planetario.

Pero, ya algunos autores han señalado las dificultades conceptuales que puede traer esta analogía. Por ejemplo, oculta que el espacio-tiempo es cuádrimensional, que tiene una dimensión temporal y que en el universo no hay fricción como hay en la lámina (Postiglione y De Angelis, 2021b). De hecho, esta analogía puede ofrecer un riesgo de confusión porque la gravedad se utiliza para crear curvaturas (Choudhary et al., 2020). Esto invita a reflexionar sobre otras formas de llevar los conceptos y aplicaciones de la RG al aula de clase.

Pese a la ausencia de temáticas relacionadas con la física relativista en los currículos de la educación básica y media de diferentes países (Dua et al., 2020), se reconoce la importancia de dicha teoría. Por ello, surge la necesidad de proponer iniciativas para su enseñanza y acercar a la población no científica a estos conceptos. Actualmente, en países

como Australia, Noruega y Escocia existe un interés por incluir la RG en la educación básica y media como una introducción a la física moderna (Park et al., 2019), pero las investigaciones sobre su enseñanza aún son incipientes y existen pocos trabajos prácticos que hayan evaluado los resultados de aprendizaje y los materiales educativos propuestos (Kersting et al., 2018).

Es por esto, que esta investigación busca identificar y analizar, a partir de una revisión sistemática, la incorporación de la RG en la educación básica y media, tanto su parte conceptual y aplicaciones como los recursos o materiales que se implementaron, y así, motivar a los profesores e investigadores que evalúen las posibilidades de abordar esta teoría en estos niveles educativos. Se formulan las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué conceptos, principios y aplicaciones de la RG se están enseñando en la educación básica y media?
- ¿Qué recursos didácticos se han implementado para la enseñanza de la RG en la educación básica y media?

Método

Una revisión sistemática es una investigación científica mediante la cual se revisan los estudios disponibles sobre un tópico o tema, partiendo de una pregunta específica. Su objetivo es alcanzar conclusiones válidas y objetivas sobre el estado del conocimiento de ese tema (Sánchez, 2010). Para este trabajo, se realiza una revisión sistemática de investigaciones sobre la enseñanza de la RG en la educación básica y media, enfatizando en los conceptos, principios y aplicaciones de esta teoría al igual que los recursos didácticos que se han abordado en estos niveles educativos.

La revisión sistemática se hizo con base en el protocolo PRISMA 2020 (acrónimo en inglés de Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), el cual incluye una lista de verificación para garantizar que se aborde toda la información recomendada (Page et al., 2021).

Siguiendo dicho protocolo, inicialmente se realiza una búsqueda en palabra clave, resumen, título o tópico en Web of Science (Topic), Scopus (Title-Abs-Key) y Dialnet (contiene las palabras); por ser fuentes de acceso institucional y académicamente confiables. Los descriptores fueron: “relatividad general”, “relatividad AND enseñanza” y “relatividad” (y sus correspondientes palabras en inglés y portugués). Se resaltan aquellos trabajos que abordan la RG o la relatividad como un solo marco teórico (sin diferenciar RG y RE), pero que contemplen al menos un concepto asociado a la RG. La última búsqueda se realizó entre el 2 de mayo y el 10 de junio de 2023.

Luego se establecieron los criterios de inclusión y exclusión que permiten definir los estudios analizados, como se muestran en la tabla 1. Allí se determina que el periodo de búsqueda fue de 2012 a 2022 por varios motivos: para buscar información actualizada de los estudios; es el tiempo en que ya algunos proyectos relacionados con la RG entran en funcionamiento, como el LIGO. Por otra parte, la búsqueda se extendió hasta el año 2012 por motivo de la falta de estudios que estuvieran orientados a la enseñanza de la RG en los niveles de educación básica y media.

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión para la revisión sistemática.

Criterios	Inclusión	Exclusión
Idioma	Español, inglés y portugués	Otras lenguas
Año de publicación	Estudios entre los años (2012-2022) ambos incluidos	Trabajos publicados antes de 2012 y después de 2022
Tipología	Artículos de investigación	Tesis, capítulos de libros y actas de congreso.
Población	Estudiantes de educación básica o media	Profesores y estudiantes universitarios
Contenido	Estudios con propuestas de enseñanza de la RG	Publicaciones que no incluyan la RG para su enseñanza
Disponibilidad del texto	Estudios con texto completo	Textos sólo con resúmenes

Posteriormente se procede a identificar los estudios a partir de los descriptores propuestos. Los resultados de esta primera fase se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos en cada base de datos.

Base de datos	Descriptores	Total de artículos	Total de artículos después de aplicar filtros
Dialnet	General relativity	36694	1319
	Relativity	212.902	10956
	Teaching AND relativity	9.422	2642
Web Of Science	General relativity	21319	109
	Relativity	35013	306
	Teaching AND relativity	219	61
Scopus	General relativity	27681	171
	Relativity	53169	784
	Teaching AND relativity	411	75

Se aplican los filtros de búsqueda y se eliminan los duplicados utilizando Mendeley para los estudios pertenecientes a Scopus y Web of Science, quedando un total de 16256.

En la segunda fase, se leyeron los títulos y resúmenes que dieran cuenta de los asuntos planteados en las preguntas de la investigación. Se excluyeron 16199 por no relacionarse con la enseñanza de la RG o dirigirse a una población diferente de los estudiantes de básica y media. Por lo tanto, los estudios para recuperar se redujeron a 57. Se hizo la búsqueda y se recuperó la totalidad para una posterior lectura a texto completo; que permitió seleccionar 43 publicaciones para revisión. En este proceso de extracción y verificación de la información encontrada en cada una de las bases de datos participaron todos los autores de este estudio.

En la Figura 1 se observa el proceso realizado para la selección de artículos, siguiendo el protocolo PRISMA (Page et al., 2021).

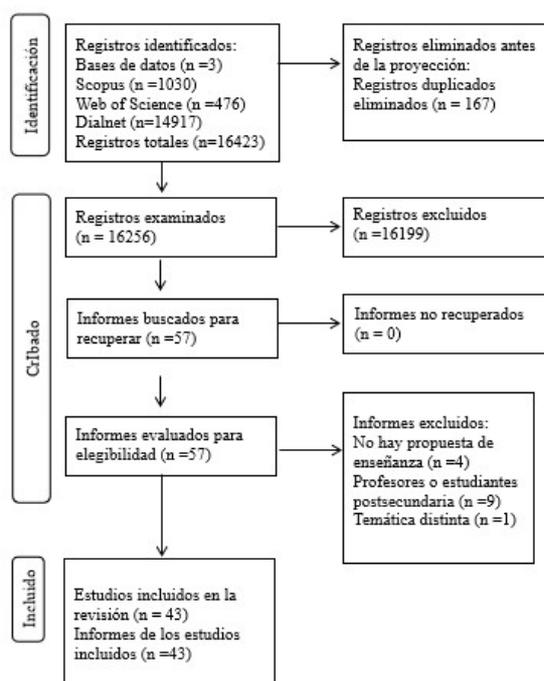


Figura 1. Diagrama de flujo para la selección de artículos. PRISMA 2020.

Resultados

La información seleccionada se sistematiza con el software Microsoft Excel y se definen como variables de análisis las siguientes: autor, fecha, población, conceptos, principios y aplicaciones de la RG y los recursos didácticos para su enseñanza en la educación básica y media.

En la tabla 3 se presentan las investigaciones realizadas por país. Se destaca la cantidad de trabajos realizados en Australia (25,5 %), como resultado de proyectos como Einstein-First.

Tabla 3. Artículos por país.

País	Número de artículos	País	Número de artículos
Australia	11	Escocia	2
Italia	6	Grecia	2
Brasil	4	Chile	1
Alemania	3	Canadá	1
Estados Unidos	3	Reino Unido	1
Noruega	3	Colombia	1
R. Checa	2	Indonesia	1
Argentina	2	Total	43

En la figura 2 se observan los estudios por año de publicación. Se evidencia un incremento de trabajos entre los años 2017 y 2021. Esto concuerda con los resultados encontrados en torno a las ondas gravitacionales y las fotografías de los agujeros negros.

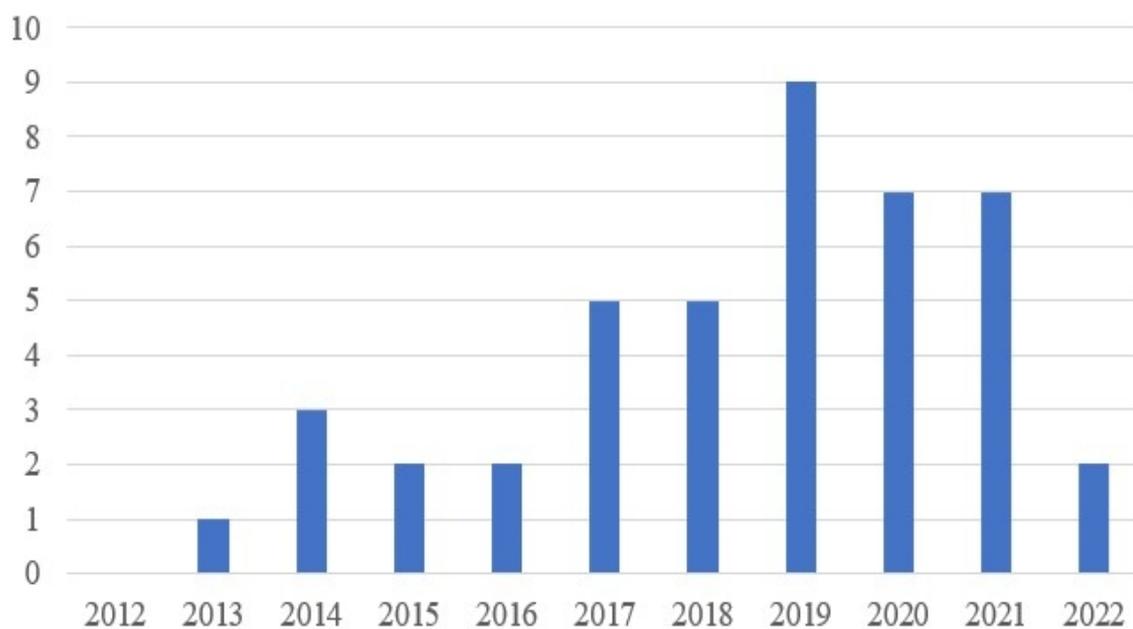


Figura 2. Número de estudios publicados cada año.

En la Tabla 4 se muestran las variables que permiten realizar una caracterización de los estudios. Con referencia a la población, los estudios estuvieron dirigidos a estudiantes de educación básica (B), con edades entre los 5 y 14 años, o educación media (M), entre los 15 y 18 años. Además, se evidencia que sobresalen los conceptos y aplicaciones de la RG como los agujeros negros (AN), ondas gravitacionales (OG), espacio-tiempo curvo (E-T), dilatación gravitacional del tiempo (DGT), lentes gravitacionales (LG), geodésica (G), principio de equivalencia (PE) y deflexión de la luz (DL).

Tabla 4. Estudios y variables de análisis.

Autores	Población (nivel educativo)	Conceptos, principios y aplicaciones de la RG	Recursos didácticos
Benedetto y Iovane, 2022	B	AN, velocidad de la luz	Razonamientos matemáticos
Da Silva et al., 2022	B	DGT	Películas y vídeos
Postiglione y De Angelis, 2021a	B	E-T, LG, AN, OG	Lámina de látex, vídeos y fotos
Postiglione y De Angelis, 2021b	B	E-T, LG, AN, OG	Lámina de látex, vídeos y fotos
Kersting et al., 2021	B	E-T, DGT	Gravity Discovery Center, textos, vídeos, animaciones
Horvath y Moraes, 2021	B	PE, E-T, AN, OG	Lámina de látex, razonamientos matemáticos
Adams et al., 2021	B	E-T, DGT	Gravity Discovery Center, obra de lectura, lámina de látex, experimentos
Ruggiero et al., 2021	B	E-T	Lámina de látex, historia de las ciencias

Tabla 4 (continuación).

Autores	Población (nivel educativo)	Conceptos, principios y aplicaciones de la RG	Recursos didácticos
Ferreira et al., 2021	B	AN, E-T, PE, LG	Videos, simulaciones, película, Lámina de látex
Choudhary et al., 2020	B	E-T, G, DGT, OG, AN	Lámina de látex, videos, juego de roles
Kaur et al., 2020	B	E-T, DGT	Lámina de látex, Experimentos (lecciones con woks y postes magnéticos)
Andersen, 2020	B y M	E-T, G	Globo e imanes, experimentos
Bozzo, 2020	B	PE	Celular, tracker, software, experimentos
Pinochet, 2020	B	AN, temperatura de Hawking	Libro
Goldoni y Stefanini, 2020	B	DL	Razonamiento matemático (datos de eclipses, Excel)
Dua et al., 2020	M	E-T, PE, DL, AN, OG, LG, DGT, G	Lámina de látex, videos, presentaciones, experimentos
Cayul et al., 2019	B	OG	Textos, videos, animaciones), notas de periódicos
Boyle, 2019a	B	OG	Interferómetro, horno de microondas, lámina de látex
Boyle, 2019b	B	OG, PE	Interferometría con MILO, tecnología de suspensión, objetos en caída libre
Kraus y Zahn, 2019	B	Ecuaciones de campo, AN	Modelos sectoriales
Kersting, 2019	B	G, E-T	Entornos de aprendizaje digital
Choudhary et al., 2019	M	DGT, E-T, G	Modelos físicos, recursos digitales, modelos sectoriales
Ryston, 2019a	B	E-T	Diagramas incrustados, simulaciones, hoja de papel
Ryston, 2019b	B	E-T	Applets, diagramas incrustados
Zahn y Kraus, 2019	B	DL, G, AN	Modelos sectoriales
Kontomaris y Malamou, 2018	B	AN	Simulación numérica
Stannard, 2018	B	DGT	Razonamientos matemáticos
Kersting y Steier, 2018	B	E-T	Lámina de látex, aprendizaje colaborativo en línea
Choudhary et al., 2018	B	OG	Experimentos, videos
Kersting et al., 2018	B	PE, principio de relatividad, DL, desplazamiento al rojo gravitacional, DGT, E-T	Entorno de aprendizaje en línea: textos, videos, animaciones y simulaciones, experimentos mentales, uso de la historia y la filosofía.

Tabla 4 (continuación).

Autores	Población (nivel educativo)	Conceptos, principios y aplicaciones de la RG	Recursos didácticos
Da Rosa et al., 2017	B	AN, DGT	Películas
Arriassecq et al., 2017	B	PE, E-T, DGT, AN, OG, modelos cosmológicos	Periódicos, simulaciones, películas, libros
Stannard et al., 2017	B	G, E-T, DGT	Modelo del tiempo deformado
Kaur et al., 2017a	B	LG, G, OG, E-T	Lámina de látex, vídeos, presentaciones, experimentos
Kaur et al., 2017b	B y M	LG, G, OG, E-T	Lámina de látex, vídeos, presentaciones, experimentos
Barr et al., 2016	B y M	AN	Experimento (Recipiente para generar vórtices y linterna)
Da Rosa et al., 2017	B	AN, DGT	Películas
Arriassecq et al., 2017	B	PE, E-T, DGT, AN, OG, modelos cosmológicos	Periódicos, simulaciones, películas, libros
Stannard et al., 2017	B	G, E-T, DGT	Modelo del tiempo deformado
Kaur et al., 2017a	B	LG, G, OG, E-T	Lámina de látex, vídeos, presentaciones, experimentos
Kaur et al., 2017b	B y M	LG, G, OG, E-T	Lámina de látex, vídeos, presentaciones, experimentos
Barr et al., 2016	B y M	AN	Experimento (Recipiente para generar vórtices y linterna)
Wood et al., 2016	B	E-T	Experimento (Papel, globo y silla de montar)
Huwe y Field, 2015	B	LG	Experimento (Lente-copa de vino), simulaciones
Ford et al., 2015	B	LG	Lámina de látex
Cardona et al., 2014	B	PE	Experimento (Juguete de Einstein)
Zahn y Kraus, 2014	B	E-T, AN	Modelos sectoriales
Pitts et al., 2014	B	E-T, AN	Gravity Discovery Center, obra de teatro, vídeos, películas
Velentzas y Halkia, 2013	M	PE, DL	Experimentos mentales

La figura 3 muestra los principales conceptos, principios y aplicaciones de la RG incorporados en la educación básica y media. Destaca el concepto de curvatura/espacio-tiempo curvo abordado en 23 de los estudios.

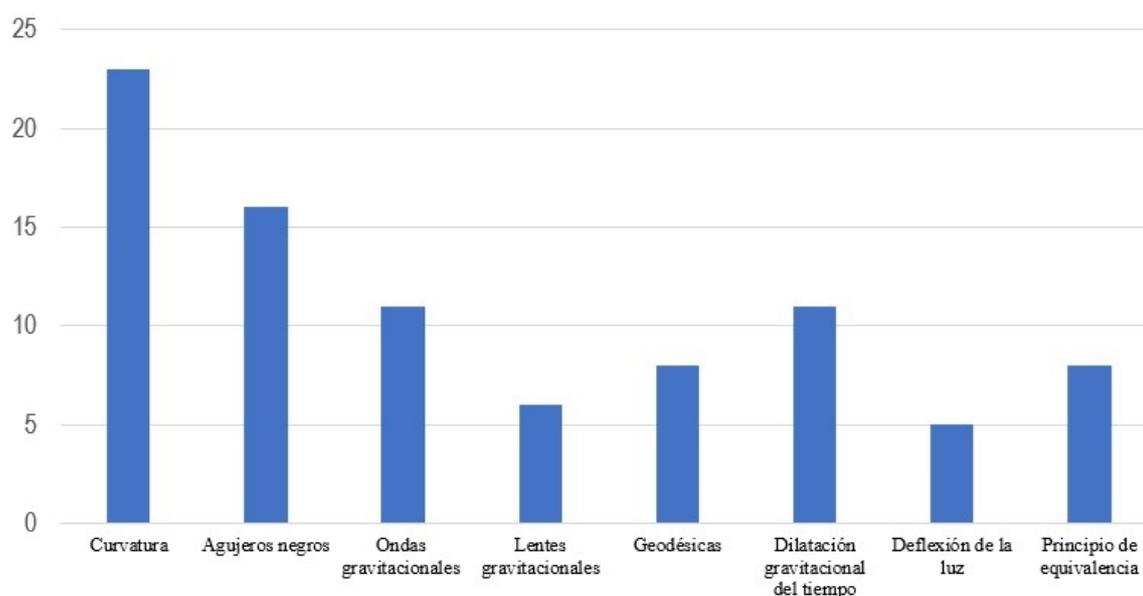


Figura 3. Conceptos, principios y aplicaciones de la RG abordados en los estudios

La figura 4 muestra los principales recursos didácticos que se implementaron para la enseñanza de la RG en la educación básica y media. Sobresale el uso de películas o vídeos, experimentos y la analogía de la lámina de látex.

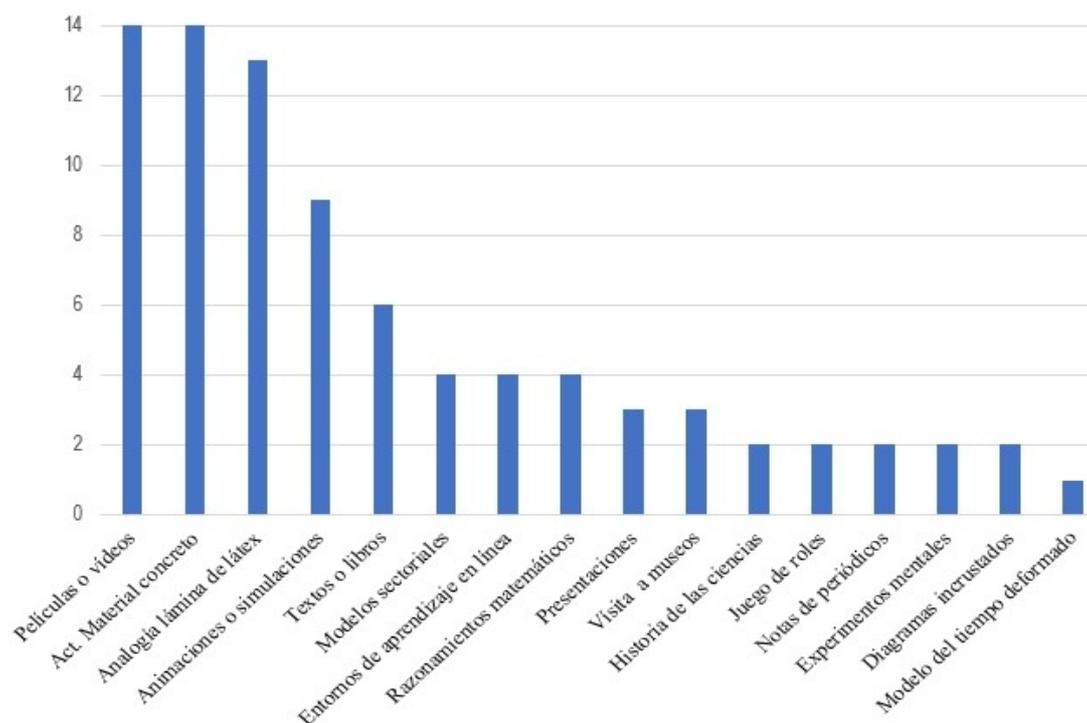


Figura 4. Recursos didácticos implementados para la enseñanza de la RG

Discusión

Los resultados de la revisión permiten caracterizar los estudios que incluyen conceptos, principios y aplicaciones de la RG en la educación básica y media, al igual que los recursos didácticos que se emplearon. A continuación, se discuten los resultados que permitirán responder las dos preguntas de investigación.

Conceptos, principios y aplicaciones de la Relatividad General

La figura 3 muestra que el concepto predominante en los diferentes estudios es el de curvatura/espacio-tiempo curvo dado que la RG se apoya en esta entidad. Es uno de los conceptos más importantes de la RG, aunque la manera pedagógica de abordarlo no es clara, como lo explican Kersting et al. (2018), quienes, al analizar tres libros de texto sobre RG, encontraron diferencias en su presentación, concluyendo que entre los profesores de física no hay consenso sobre cómo enseñar el espacio-tiempo curvo de manera cualitativa. Además, sin las herramientas adecuadas, es muy difícil interpretarlo (Choudhary et al., 2020).

Asociado a este espacio-tiempo se encuentra el concepto de geodésica, la generalización espacio-temporal de una línea recta (Kersting et al., 2020); un concepto fundamental en cualquier curso introductorio de RG ya que es la manera como se pueden describir los caminos de la luz y de las partículas libres en el universo de Einstein (Zahn y Kraus, 2019). Si se aborda desde una manera analítica para llegar a su ecuación, puede ser un poco complicado en estos niveles educativos, teniendo en cuenta que requiere de unas nociones previas, entre ellas, la idea de base vectorial y transporte paralelo de un vector en superficies curvas. Por eso en la mayoría de los estudios se evidencia tratamiento cualitativo de ella.

Con el concepto de geodésica de la RG, se pueden generar algunos choques conceptuales en los estudiantes, sobre todo, porque ellos aprendieron desde jóvenes conceptos euclidianos y newtonianos, aceptando la noción de la exactitud matemática y de que la geometría se reduce a trazos y mediciones en el plano (Choudhary et al., 2018). Por eso algunos autores proponen introducir los conceptos de la RG desde una edad temprana para evitar estos conflictos conceptuales (Choudhary et al., 2020).

Otro de los conceptos que tiene una gran trascendencia en la RG, es el tiempo. La RG predice que la medida del tiempo se ve afectada por la posición de un objeto en un campo gravitacional. Pero comprender estos efectos en el tiempo no es tarea fácil. Pasar de un tiempo absoluto a uno relativo y que los estudiantes lo comprendan es uno de los grandes desafíos de enseñar relatividad en la educación básica y media (Choudhary et al., 2019).

No solo la gravedad afecta el tiempo, en el año 1911, Einstein sugirió la idea de que un campo gravitatorio podría desviar la luz (Goldoni y Stefanini, 2020), a este fenómeno se le conoce como deflexión de la luz. Se identifican algunos estudios que introducen la deflexión de la luz con dos propósitos; primero, para mostrar las consecuencias de la deformación del espacio-tiempo; y segundo, por cuestiones históricas, ya que la deflexión de la luz fue una de las primeras comprobaciones de la RG.

Ahora, el principio de equivalencia es uno de los postulados de la RG que más aparece en los estudios revisados. Einstein habla de este por primera vez en 1907 en su artículo *Sobre el principio de la relatividad y las conclusiones que se obtienen de él*, y afirma que los efectos cinemáticos de un campo gravitacional, localmente, son indistinguibles de aquellos que se producen en un sistema de referencia acelerado.

Hay una palabra clave en este principio y es “localmente”, la cual no aparece de manera explícita en algunos de los estudios revisados, incluso en libros de divulgación como el de Hewitt (2007). Pero es muy importante dicha palabra, porque la equivalencia sucede localmente o en caídas suficientemente pequeñas. Esto se debe a que los objetos en caída libre, a medida que caen se acercan entre sí, ya que ambos se dirigen hacia el centro del cuerpo masivo.

Por otro lado, en los estudios también se identificaron algunas de las aplicaciones de la RG; el primero de ellos, el de agujero negro. Este se refiere a una región del espacio-tiempo donde la materia ha colapsado sobre sí misma. Esta aplicación aparece en los estudios por varios motivos; en primer lugar, porque muchas ideas clave y consecuencias observables de la RG fluyen del estudio de los agujeros negros (Bertschinger y Taylor, 2008). Por ejemplo, Benedetto y Iovane (2022) lo utilizaron para estudiar el comportamiento de la velocidad de la luz en la RG; Stannard (2018) aborda el agujero negro de Schwarzschild para demostrar que las distorsiones temporales, tradicionalmente atribuidas a la velocidad y la gravedad, son equivalentes; y Choudhary et al. (2018) usan la fusión de agujeros negros para explicar la generación de ondas gravitacionales. También se identifica en algunos estudios la explicación de la noción de espacio-tiempo curvo haciendo uso de la naturaleza de los agujeros negros (Kraus y Zahn, 2019). En segundo lugar, las noticias actuales sobre las imágenes de los agujeros negros publicadas por la colaboración Telescopio de Horizonte de Eventos (EHT, por sus siglas en inglés), han generado un interés de la sociedad por comprender estas regiones del espacio-tiempo. Esto por supuesto, también ha despertado el interés por llevarlos a la educación básica y media (Ferreira et al., 2021).

Igual que los agujeros negros, las ondas gravitacionales también se ha divulgado de manera significativa en los medios de comunicación y existe un interés por enseñarlas en estos niveles educativos. Estas ondas son perturbaciones en la curvatura del espacio-tiempo y se propagan a la velocidad de la luz. Su detección en el año 2015 fue una noticia histórica, como lo describe Burko (2017), al afirmar que su detección abrió nuevas ventanas que permitirán ver fenómenos astrofísicos hasta ahora inimaginables. Además de ayudarnos a comprender el universo, las tecnologías que surgieron para su detección han sido de gran beneficio para la sociedad (Boyle, 2019a).

Las lentes gravitacionales también aparecen en algunos estudios; estas tienen su explicación desde la RG, como consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo por la presencia de cuerpos masivos: una gran distribución de masa (la lente) desvía la luz emitida por otros objetos astronómicos (la fuente) ubicados detrás de la lente. Esto provoca una distorsión y una ampliación de las fuentes de fondo (Huwe y Field, 2015). Algunos estudios usan este concepto para mostrar los efectos de la curvatura del espacio-tiempo y resaltar su importancia en la astronomía y cosmología (Ferreira et al., 2021). Una justificación de los autores para abordar el concepto de lente gravitacional tiene que ver con su uso para detectar objetos masivos invisibles como la materia oscura (Ford et al., 2015).

Finalmente, se evidencia en la revisión que la RG se presenta de una manera más conceptual para los niveles de educación básica y media. Aunque existe el debate si es pertinente o no incluir las matemáticas para enseñar RG en estos niveles educativos. Kersting (2022), por ejemplo, defiende la idea de darle un mayor énfasis en la comprensión conceptual de la RG, entre otras razones porque permite razonar como un físico y fomentar la apreciación de la empresa científica. Por el contrario, Horvath y Moraes (2021) sostienen que es fundamental introducir la RG en la escuela para disminuir esa brecha entre el conocimiento científico escolar y el conocimiento de frontera de los científicos, pero, resaltan que dejar de introducir las matemáticas en la enseñanza de la RG, llevaría a una pérdida de una conexión fundamental con otras ramas de la ciencia.

Recursos didácticos para la enseñanza de la Relatividad General

La revisión de los diferentes estudios muestra que entre los recursos didácticos implementados para la enseñanza de la RG está la analogía de la lámina de látex. Esta analogía se utilizó para enseñar el concepto de espacio-tiempo curvo (Kersting y Steier, 2018), ondas gravitacionales (Boyle, 2019a; Dua et al., 2020; Kaur et al., 2017a, 2017b) y lentes gravitacionales con el objetivo de explorar cualitativamente la relación entre la masa de una lente y el radio de un anillo de Einstein (Ford et al., 2015).

A pesar de sus limitaciones, algunos autores manifiestan que esta analogía sigue siendo una alternativa para visualizar el espacio-tiempo, pero recomiendan que los profesores la complementen con otros modelos de espacio-tiempo y que discutan de manera explícita los defectos de su uso (Kersting y Steier, 2018). Algunos de los modelos alternativos para explicar el espacio-tiempo se pueden encontrar en los trabajos de Ryston (2019a), quien utiliza diagramas incrustados, superficies curvas para representar la curvatura espacial, y los trabajos de Zahn y Kraus (2014, 2019) quienes utilizaron modelos sectoriales, que representan espacios curvos en 2D y 3D, para enseñar las propiedades del espacio-tiempo.

Entre los recursos didácticos también se encuentran algunas actividades experimentales con material concreto para describir las propiedades del espacio-tiempo curvo y lo que allí se genera. Por ejemplo, Andersen (2020) y Zahn y Kraus (2019) utilizaron superficies curvas, como globos de caucho, globo terráqueo y la silla de montar (paraboloide hiperbólico) para describir las geodésicas y determinar el tipo de curvatura en el espacio-tiempo. Para la enseñanza de las lentes gravitacionales Huwe y Field (2015) hacen uso del modelo de lente óptica (copa de vino) para ilustrar los efectos de las lentes gravitacionales en la curvatura del espacio-tiempo y en la desviación de la luz. Para el caso del principio de equivalencia, entre los recursos didácticos que se implementan está el análisis de la botella con agua en caída libre (Bozzo, 2020; Kersting et al., 2018) y el montaje conocido como el juguete de Einstein (Cardona et al., 2014). En cuanto a la enseñanza de las aplicaciones de la RG, se encuentra el trabajo de Barr et al. (2016) quienes, haciendo uso de vórtices formados por agua bajo la iluminación de una fuente de luz brillante, buscan mostrar los efectos de los agujeros negros sobre la luz y la materia.

Los experimentos mentales, al igual que en la RE, también se hacen presente en la RG. Por ejemplo, se evidencia en los estudios el experimento mental llamado el Elevador de Einstein para explicar los efectos de un campo gravitacional en la propagación de la luz y para explicar los fenómenos basados en el principio de equivalencia (Velentzas y Halkia, 2013). También, similar a la enseñanza de la RE, sobresale el uso de películas y vídeos para enseñar RG. Se evidencia por ejemplo en los trabajos de Da Rosa et al. (2017) y Da Silva et al. (2022) el uso de películas de ciencia ficción, como Interestelar, para explicar los efectos de los agujeros negros en el espacio-tiempo.

Uno de los recursos didácticos que llaman la atención es el uso de notas periodísticas para enseñar, no solo conceptos y aplicaciones de la RG, sino también aspectos asociados a la NdC. Por ejemplo, Cayul et al. (2019) proponen una secuencia didáctica para la enseñanza de las ondas gravitacionales y analizan las noticias publicadas sobre su detección en el año 2015. Pero incluyen en su propuesta aspectos asociados a la sociología de las ciencias como la colaboración científica y el asunto del género en la ciencia. Un trabajo similar a este último y que no aparece en la revisión fue realizado por García-Carmona (2020) quien propone una actividad para reflexionar sobre algunos aspectos de la NdC, como la cooperación científica y el papel de las teorías científicas, entre otros, a partir del análisis de diarios digitales que publicaron la primera imagen de un agujero negro tomada por el

EHT. Además, el mismo autor precisa que el análisis de noticias científicas se ha destacado como un recurso didáctico adecuado para el aprendizaje de aspectos asociados a la NdC (García-Carmona, 2021).

Conclusiones

La presente revisión permite tener una información más clara sobre qué conceptos, principios y aplicaciones de la RG y qué recursos para su enseñanza se han implementado en la educación básica y media. El análisis de resultados permite concluir lo siguiente:

Para la enseñanza de la RG en la educación básica y media se identifica una preferencia por tratamientos cualitativos de los conceptos y aplicaciones de la RG, en los que, según la revisión sistemática, sobresalen los de espacio-tiempo curvo, agujero negro y ondas gravitacionales. Aunque, la física newtoniana también tiene un lenguaje algebraico complejo y a pesar de esto, hace parte de los programas de física en la educación media, se debe pensar en cómo introducir la relatividad en estos niveles educativos sin que las matemáticas se constituyan en un impedimento. Para esto, los autores sugieren introducir la teoría de la RG a una edad temprana para desarrollar una comprensión más profunda en años posteriores.

En relación con los recursos didácticos utilizados, a diferencia de la enseñanza de la RE, donde se evidencia un uso importante de los experimentos mentales para acercar más sus conceptos abstractos y la experiencia cotidiana (Alstein et al., 2021), para la enseñanza de la RG, sobresalen la analogía de la lámina de látex, que, a pesar de sus desventajas conceptuales, es una de las herramientas más utilizadas por los investigadores para realizar un primer acercamiento al concepto de espacio-tiempo curvo. Aunque es importante resaltar que estos experimentos mentales son importantes tanto para la RE como para la RG en la medida en que permiten ilustrar los postulados de esta teoría, entre ellos, el principio de la relatividad en la RE y el principio de equivalencia.

Es conveniente precisar que varios de los recursos didácticos que fueron propuestos en los estudios no fueron implementados en el aula; por lo que una posibilidad para futuras investigaciones es evaluar el impacto de estos recursos en el aprendizaje de los estudiantes de educación básica y media.

Finalmente, enseñar ciencia desde el contexto del estudiante se constituye en una necesidad para las escuelas; pues cada vez menos estudiantes están interesados y motivados en estudiar carreras que involucran la ciencia y la tecnología (Choudhary et al., 2018; Kaur et al., 2020; Scorsetti et al., 2020). Por supuesto, esto no es un problema menor, ya que el éxito en el aprendizaje está influenciado por muchos factores, entre ellos la actitud del estudiante hacia el saber (Majid y Rohaeti, 2018). Frente a esta problemática, los estudios resaltan que la enseñanza de la RG ofrece una buena oportunidad para acercar a los estudiantes a problemas reales y actuales de la ciencia, posibilita abordar aspectos asociados a la NdC y fomenta el interés por el aprendizaje. Y así lo muestran la mayoría de los estudios revisados, en los que motivados por los nuevos descubrimientos astrofísicos realizados por el LIGO y el EHT, implementaron recursos didácticos para enseñar conceptos, aplicaciones, aspectos epistemológicos y sociológicos asociados a la RG. Por eso, es pertinente que los currículos de ciencias se actualicen en ciencia contemporánea, en este caso, en RG, para que los estudiantes reflexionen sobre la naturaleza continua, cambiante y social del conocimiento científico y relacionen lo que aprenden en la escuela con las noticias científicas actuales.

Esta revisión sistemática tiene algunas limitaciones; entre ellas, algunos estudios que proponían estrategias de enseñanza o aprendizaje para maestros en formación y estudiantes universitarios no considerados para el análisis, porque la población es ajena al interés de este estudio. Otra limitación se refiere al hecho de que, en esta revisión, solo se incluyeron artículos de investigación, dejando de lado capítulos de libros, actas de congresos y tesis, fuentes de información que pudieran dar lugar a un panorama más amplio sobre la enseñanza de la RG en la Educación básica y media.

Referencias bibliográficas

- Adams, K., Dattatri, R., Kaur, T. y Blair, D. (2021). Long-term impact of a primary school intervention on aspects of Einsteinian physics. *Physics Education*, 56(5), 055031. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac12a9>
- Almeida, J. R., y Soltau, S. B. (2022). Interstellar movie and Flipped Classroom: a proposal for teach general relativity and black holes in High School. *Research, Society and Development*, 11(5). <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28437>
- Alstein, P., Krijtenburg, K. y Van Joolingen, W. (2021). Teaching and learning special relativity theory in secondary and lower undergraduate education. A literature review. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 023101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.023101>
- Andersen, W.L. (2020). Labs to Accompany Treatment of General Relativity in a General Education Astronomy Course. *The Physics Teacher*, 58(8), 560–563. <https://doi.org/10.1119/10.0002377>
- Arriasecq, I., Cayul, E. y Greca, I. (2017). Enseñanza de la teoría general de la relatividad en la escuela secundaria: por qué, qué y cómo. *Revista de Enseñanza de la Física*, 29(2), 33–44. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/18802>
- Barr, I. A., Bull, A., O'Brien, E., Drillsma-Milgrom, K.A. y Milgrom, L. R. (2016). Illuminating black holes. *Physics Education*, 51(4), 043001–. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/51/4/043001>
- Belloni, M., Christian, W. y Dancy, M. (2004). Teaching special relativity using Physlets®. *The Physics Teacher*, 42(5), 284–290. <https://doi.org/10.1119/1.1737963>
- Benedetto, E. y Iovane, G. (2022). The speed of light or the speeds of light? *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 44, e20210421. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0421>
- Bertschinger, E. y Taylor, E. F. (2008). General relativity for sophomores. *American Journal of Physics*, 76(2), 103–. <https://doi.org/10.1119/1.2825393>
- Boyle, J. (2019a). Teaching gravitational waves in the lower secondary school. Part I. A teaching module. *Physics Education*, 54(2), 025005. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6552/aaf779>
- Boyle, J. (2019b). Teaching gravitational waves in the lower secondary school. Part II. A model for a STEM enrichment programme. *Physics Education*, 54(2), 025006. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6552/aaf76e>

- Bozzo, G. (2020). Free-Fall Demonstrations in the High School Laboratory. *The Physics Teacher*, 58(1), 23–27. <https://doi.org/10.1119/1.5141966>
- Brunner, J.L., y Abd-El-Khalick, F. (2020). Improving nature of science instruction in elementary classes with modified science trade books and educative curriculum materials. *Journal of Research in Science Teaching*, 57(2), 154–183. <https://doi.org/10.1002/tea.21588>
- Burko, L. M. (2017). Gravitational Wave Detection in the Introductory Lab. *The Physics Teacher*, 55(5), 288–292. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1602.04666>
- Cardona, G., Reyes, J. y Ortiz, E. (2014). El Principio de Equivalencia: una propuesta didáctica a partir del juguete de Einstein. *Latin-American Journal of Physics Education*, 8(4), 1-5. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5199778>
- Cayul, E., Arriasecq, I., Greca, I. M. y Givonetti, A. (2019). Análisis de la primera implementación de la propuesta didáctica “Ondas gravitacionales en contexto para la escuela secundaria: física contemporánea, divulgación científica y género”. *Revista De Enseñanza De La Física*, 31, 181–188. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/26544>
- Choudhary, R., Foppoli, A., Kaur, T., Blair, D., Zadnik, M., Zadnik, M. y Meagher, R. (2018). Can a short intervention focused on gravitational waves and quantum physics improves students' understanding and attitude? *Physics Education*, 53(6). <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aae26a>
- Choudhary, R., Kraus, U., Kersting, M., Blair, D., Zahn, C., Zadnik, M. y Meagher, R. (2019). Einsteinian Physics in the Classroom: Integrating Physical and Digital Learning Resources in the Context of an International Research Collaboration. *The Physics Educator*, 1(4), 1950016. <https://doi.org/10.1142/S2661339519500161>
- Choudhary, R., Foppoli, A., Kaur, T., Blair, D., Burman, R. y Zadnik, M. (2020). A comparison of short and long Einsteinian physics intervention programmes in middle school. *Research in Science Education*, 52, 305-324. <https://doi.org/10.1007/s11165-020-09944-8>
- Christensen, N. y Moore, T. (2012). Teaching general relativity to undergraduates. *Physics Today*, 65(6), 41-47. <https://doi.org/10.1063/PT.3.1605>
- Da Silva, C.S., Heringer, S.C., Da Silva, A.R., Piumbini, C.K. y Buffon, L.O. (2022). Teoria da relatividade e viagem no tempo: uma abordagem usando a técnica da controvérsia controlada. *Kiri-Kerê-Pesquisa em Ensino*, 1(12), 220-236. <https://doi.org/10.47456/krkr.v1i12.35614>
- Da Rosa, C., Giacomelli, A., Da Rosa, A. y Biazus, M. (2017). Relatividade no ensino médio: Análise de uma proposta didática envolvendo o uso de filmes de ficção científica. *Espacios*, 38(35), 22-34. <http://www.revistaespacios.com/a17v38n35/17383522.html>
- Dua, Y., Blair, D., Kaur, T. y Choudhary, R. (2020). Can Einstein's theory of general relativity be taught to indonesian high school students? *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 9(1), 50-58. <https://doi.org/10.15294/jpii.v9i1.22468>
- Einstein, A. (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354(7), 769–880. <https://doi.org/10.1002/andp.19163540702>

- Ferreira, M., Lessa, R., Da Silva, O., Paulucci, L. y Ferreiro, F. (2021). Ensino de astronomia: uma abordagem didática a partir da Teoria da Relatividade Geral. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 43, e20210157. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0157>
- Foppoli, A., Choudhary, R., Blair, D., Kaur, T., Moschilla, J. y Zadnik, M. (2019). Public and teacher response to Einsteinian physics in schools. *Physics Education*, 51(1), 015001. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aae4a4>
- Ford, J., Stang, J. y Anderson, C. (2015). Simulating Gravity: Dark Matter and Gravitational Lensing in the Classroom. *The Physics Teacher*, 53(9), 557–560. <https://doi.org/10.1119/1.4935771>
- García-Carmona, A., Acevedo, J., y Aragón, M. (2018). Comprensión del alumnado de secundaria sobre la dimensión sociológica de la naturaleza de la ciencia a partir de la historia de la ciencia. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 2(2), 43–54. <https://doi.org/10.17979/arec.2018.2.2.4519>
- García-Carmona, A. (2020). La primera imagen de un agujero negro en los medios: una oportunidad para reflexionar sobre aspectos de naturaleza de la ciencia. *Ciências Em Foco*, 13(0), 1–14. <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/cef/article/view/13857>
- García-Carmona, A. (2021). Learning about the nature of science through the critical and reflective reading of news on the COVID-19 pandemic. *Cultural Studies of Science Education*, 16, 1015–1028. <https://doi.org/10.1007/s11422-021-10092-2>
- Goldoni, E. y Stefanini, L. (2020). A century of light-bending measurements: bringing solar eclipses into the classroom. *Physics Education*, 55(4), 045009. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab8778>
- Hewitt, P. (2007). *Física Conceptual*. Pearson Educación.
- Horvath, J. y Moraes, P. (2021). Should we teach general relativity in high school? Why and how? *Astronomy Education Journal*, 1(1), 49–51. <https://doi.org/10.32374/AEJ.2021.1.1.008>
- Huwe, P. y Field, S. (2015). Modern Gravitational Lens Cosmology for Introductory Physics and Astronomy Students. *The Physics Teacher*, 53(5), 266–270. <https://doi.org/10.1119/1.4917429>
- Kaur, T., Blair, D., Moschilla, J., Stannard, W. y Zadnik, M. (2017a). Teaching Einsteinian physics at schools: part 1, models and analogies for relativity. *Physics Education*, 52(6), 065012. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa83e4>
- Kaur, T., Blair, D., Moschilla, J., Stannard, W. y Zadnik, M. (2017b). Teaching Einsteinian physics at schools: part 3, review of research outcomes. *Physics Education*, 52(6), 065014. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa83dd>
- Kaur, T., Blair, D., Stannard, W., Treagust, D., Venville, G., Zadnik, M., Mathews, W. y Perks, D. (2020). Determining the intelligibility of Einsteinian concepts with middle school students. *Research in Science Education*, 50(6), 2505–2532. <https://doi.org/10.1007/s11165-018-9791-y>
- Kersting, M. y Steier, R. (2018). Understanding Curved Spacetime. *Science & Education*, 27, 593–623. <https://doi.org/10.1007/s11191-018-9997-4>

- Kersting, M., Henriksen, E., Vetlester, M. y Angell, C. (2018). General relativity in upper secondary school: Design and evaluation of an online learning environment using the model of educational reconstruction. *Physical Review Physics Education Research*, 14(1), 010130. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010130>
- Kersting, M. (2019). Navigating four dimensions – upper secondary students' understanding of movement in spacetime. *Journal of Physics: Conference Series*, 1287, 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1287/1/012007>
- Kersting, M., Toellner, R., Blair, D. y Burman, R. (2020). Gravity and warped time—clarifying conceptual confusions in general relativity. *Physics Education*, 55(1), 015023. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab56d7>
- Kersting, M., Schrocker, S. y Papantoniou, S. (2021). 'I loved exploring a new dimension of reality' – a case study of middle-school girls encountering Einsteinian physics in the classroom. *International Journal of Science Education*, 43(12), 2044–2064. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1950943>
- Kersting, M. (2022). A case for conceptual approaches in general relativity education. *Astronomy Education Journal*, 2(1), 1–6. <https://doi.org/10.32374/AEJ.2022.2.1.040op>
- Kontomaris, S. V. y Malamou, A. (2019). A presentation of the black hole stretching effect. *Physics Education*, 53(1), 015010. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa8d22>
- Kraus, U. y Zahn, C. (2019). Sector models—a toolkit for teaching general relativity: III. Spacetime geodesics. *European Journal of Physics*, 40(1). <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aae3b5>
- Majid, A. y Rohaeti, E. (2018). The Effect of Context-Based Chemistry Learning on Student Achievement and Attitude. *American Journal of Educational Research*, 6, 836-839. <https://doi.org/10.12691/education-6-6-37>
- Manassero, M. A., y Vázquez, A. (2019). Conceptualización y taxonomía para estructurar los conocimientos acerca de la ciencia. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 16(3), 3104. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2019.v16.i3.3104
- Page, M.J., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E., Mayo-Wilson, E., McDonald, S. y Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(71). <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Park, W., Yang, S. y Song, J. (2019). When Modern Physics Meets Nature of Science. *Science & Education*, 28(9), 1055-1083. <https://doi.org/10.1007/s11191-019-00075-9>
- Pinochet, J. (2020). Hawking for beginners: a dimensional analysis activity to perform in the classroom. *Physics Education*, 55(4), 045018. <https://doi.org/10.1088/13616552/ab8ccc>
- Pitts, M., Venville, G., Blair, D. y Zadnik, M. (2014). An exploratory study to investigate the impact of an Enrichment Program on aspects of Einsteinian physics on year 6

- students. *Research in Science Education*, 44(3), 363–388. <https://doi.org/10.1007/s11165-013-9386-6>
- Postiglione, A. y De Angelis, I.(2021a). Students' understanding of gravity using the rubber sheet analogy: an Italian experience. *Physics Education*, 56(2), 025020. <https://doi.org/10.1088/13616552/abd1c4>
- Postiglione, A. y De Angelis, I.(2021b). Experience gravity in the classroom using the rubber sheet: an educational proposal from the collaboration between University and School. *Physics Education*, 56(2), 025019. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/abcab4>
- Prado, X., Dominguez-Castiñeiras, J., Area I., Paredes A. y Mira, J. (2020). Aprendizaje de la Teoría de la Relatividad Restringida de Einstein. Estado de la Cuestión. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 17(1), 1103. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i1.1103
- Rodrigues, J., y Bueno, S. (2022). Filme Interestelar e Sala de Aula Invertida: uma proposta para ensinar relatividade geral e buracos negros no Ensino Médio. *Research, Society and Development*, 11(5), e40911528437. Recuperado de <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28437>
- Ruggiero, M., Mattiello, S. y Leone, M. (2021). Physics for the masses: teaching Einsteinian gravity in primary school. *Physics Education*, 56(6), 065011. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac1ca3>
- Ryston, M.(2019a). Embedding Diagrams - a Hands-on Activity for Understanding Spatial Curvature. *Journal of Physics: Conference Series*, 1287, 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1287/1/012008>
- Ryston, M.(2019b). Interactive animations as a tool in teaching general relativity to upper secondary school students. *Journal of Physics: Conference Series*, 1286, 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1286/1/012049>
- Sánchez Meca, J. (2010). Cómo realizar una revisión sistemática y un meta-análisis. *Aula Abierta*, 38(2), 53-64. <https://reunido.uniovi.es/index.php/AA/issue/view/1037/140>
- Scorsetti, M., Astudillo, C. y Orlando, S. (2020). ¿Qué elementos característicos del enfoque CTS se pueden reconocer en la enseñanza de la Energía en Física? Un estudio exploratorio en escuelas de Río Cuarto. *Revista De Enseñanza De La Física*, 32(1), 93-105. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/28937>
- Sherin, Z., Cheu, R., Tan, P. & Kortemeyer, G. (2016). Visualizing relativity: The OpenRelativity project. *American Journal of Physics*, 84(5), 369-374. <https://doi.org/10.1119/1.4938057>
- Stannard, W. B. (2018). A new model of special relativity and the relationship between the time warps of general and special relativity. *Physics Education*, 53(3), 035013–. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aaab99>
- Stannard, W.B., Blair, D., Zadnik, M. y Kaur, T. (2017). Why did the apple fall? A new model to explain Einstein's gravity. *European Journal of Physics*, 38(1), 015603. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/38/1/015603>

- Velentzas., A. y Halkia, K. (2013). The Use of Thought Experiments in Teaching Physics to Upper Secondary-Level Students: Two examples from the theory of relativity. *International Journal of Science Education*, 35(18), 3026-3049. <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.682182>
- Wood, M., Smith, W. y Jackson, M. (2016). Curvature of spacetime: A simple student activity. *The Physics Teacher*, 54(9), 572–573. <https://doi.org/10.1119/1.4967905>
- Zahn, C. y Kraus, U. (2014). Sector models—A toolkit for teaching general relativity: I. Curved spaces and spacetimes. *European Journal of Physics*, 35(6), 055020. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/35/5/055020>
- Zahn, C. y Kraus, U. (2019). Sector models—a toolkit for teaching general relativity: II. Geodesics. *European Journal of Physics*, 40(1), 015601. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aae3b7>