

Enseñanza de la estructura espacio-tiempo: un análisis bibliométrico (1988-2020) y futuras direcciones de investigación

Teaching space-time structure: a bibliometric analysis (1988-2020) and future directions of research

Juan Terán^{1,2}, Gionara Tauchen² y Hebert Lobo^{1,2}

¹Centro Regional de Investigación en Ciencia, su Enseñanza y Filosofía (CRINCEF), Departamento de Física y Matemática, Universidad de Los Andes, La Concepción de Trujillo 3150, Trujillo, Venezuela.

²Programa de Pós-Graduação de Educação em Ciências: Química da Vida e Saúde (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, 96203-900 - Km 8 - Carreiros, Rio Grande - RS -Brasil.

*E-mail: juanfisico23@gmail.com

Recibido el 23 de diciembre de 2020 | Aceptado el 8 de marzo de 2021

Resumen

Se efectuó un análisis bibliométrico de la producción científica con fines educativos, en todos los niveles, sobre la estructura del espacio-tiempo, para reconstruir la estructura intelectual, conceptual y de redes sociales de la comunidad científica implicada, en el periodo 1988 hasta agosto del 2020. La información se obtuvo de las bases de datos Web of Science, rastreando los valores lógicos "spacetime and teaching" o "spacetime and pedagogical", totalizando ciento catorce artículos. Se siguió la metodología del análisis bibliométrico descriptivo. Los resultados y el análisis se muestran con *Bibliometrix*, una herramienta de código abierto para la investigación cuantitativa en ciencimetría y bibliometría. Se concluyó que la estructura del espacio-tiempo está fuertemente presente en la relatividad general, teoría cuántica y en las soluciones de Schwarzschild y que los modelos pedagógicos están relacionados con los tópicos de la teoría de campos cuánticos, mientras que la enseñanza la física busca comprender la estructura del espacio tiempo en la teoría especial y general de la relatividad.

Palabras clave: Espacio-tiempo; Enseñanza; Bibliometría.

Abstract

A bibliometric analysis of scientific production was carried out for educational purposes, at all levels, on the structure of space-time, to reconstruct the intellectual, conceptual and social network structure of the scientific community involved, in the period 1988 to August of 2020. The information was obtained from the Web of Science databases, tracking the logical values "spacetime and teaching" or "spacetime and pedagogical", totaling one hundred and fourteen articles. The descriptive bibliometric analysis methodology was followed. Results and analysis are displayed with *Bibliometrix*, an open-source tool for quantitative research in scientometry and bibliometrics. It was concluded that the structure of space-time is strongly present in general relativity, quantum theory and in Schwarzschild solutions and that pedagogical models are related to the topics of quantum field theory, while teaching physics seeks to understand the structure of spacetime in the special and general theory of relativity.

Keywords: Spacetime; Teaching; Bibliometrics;

I. INTRODUCCIÓN

La revisión de la producción científica referente a la enseñanza de la estructura del espacio-tiempo es relevante para la enseñanza de las ciencias, puesto que esta noción organiza el aprendizaje de otros contenidos. De hecho, está tan bien establecida, que *“ahora podemos contemplar el uso del espacio-tiempo como una herramienta para otras ciencias”* (Flanagan y Hughes, 2005, p. 1); es decir, sirve para explicar muchos fenómenos de la realidad que nos rodea y para comprender muchos contenidos que forman parte de la cultura científica del ciudadano. No es de extrañar, por tanto, que la construcción de la noción de la relatividad especial sea una de las temáticas más conflictivas en la educación secundaria obligatoria (Sánchez y Selva, 2005; 2006; Pérez y Solbes, 2006; Guisasola *et al.*, 2007; Mota, 2011; López, 2012; Hernández, 2014).

El análisis bibliométrico en la enseñanza de las ciencias y la física ha sido utilizado con diversos fines. Por ejemplo, Prado, Domínguez-Castiñeiras, Area, Paredes, y Mira (2020) analizan las dificultades de aprendizaje de la teoría de la relatividad restringida, para desarrollar una propuesta didáctica dirigida a estudiantes de secundaria, bajo el siguiente conjunto de conceptos (espacio y tiempo; causalidad y simultaneidad; sistemas de referencia; energía; masa; luz), cuya información es obtenida y seleccionada de las bases de datos *Web of Science*, *Scopus*, *Educational Resources Information Center* y *Google Scholar*.

Otro ejemplo a considerar es el estado del arte presentado por Cuesta-Beltrán (2018) que utiliza el análisis bibliográfico para favorecer la organización, interpretación, comparación y diferenciación, con el fin de identificar tendencias que puedan ser útiles para futuras investigaciones relacionadas con la mejora en los procesos de enseñanza y aprendizaje de la física cuántica.

También ofrece un gran potencial para determinar la influencia de la investigación en física en un continente, país o región específica, tal es el caso de Rinia, Van Leeuwen, Van Vuren, y Van Raan (1998, 2001) quienes evaluaron a nivel nacional todos los grupos académicos de física en los Países Bajos; por otro lado, Kim (2001) realizó un análisis bibliométrico de las publicaciones de física en Corea en un período de cuatro años donde examinó el desempeño de la investigación de estos físicos. Del mismo modo, existen estudios bibliométricos sobre temas de física en Sudáfrica (Makhoba y Pouri, 2017), India (Rajendiran y Parihar, 2007), Europa (Glänzel, Rinia y Brocken, 1995), Israel (Arunachalam, Dhirendra Rao, y Shrivastava, 1984), Cataluña (Rovira, Senra, y Jou, 2000), Instituciones Académicas Británicas (Carpenter, *et al.*, 1988), Cuba (Marx y Cardona, 2014).

Descifrar los misterios que esconde el universo y, más recientemente, los multiversos, es el sueño que ha mantenido ocupado a los físicos desde la invención de los primeros métodos referentes al estudio de la naturaleza. Las últimas generaciones han puesto su esperanza en develar estos misterios a través de una posible cuantificación de la estructura del espacio-tiempo. Mientras que, desde un abordaje educativo autores como Brax y van de Bruck, 2003; Flanagan y Hughes, 2005; Nicolai, Peeters y Zamaklar, 2005; Shapiro, 2008; Bertschinger, 2019 y Padmanabhan, 2020, han presentado algunas posibles renormalizaciones de las soluciones de las ecuaciones de campo de la relatividad general, que dan respuesta a las ondas gravitacionales, sus interpretaciones, analogías, limitaciones e incluso pistas relacionadas con la termodinámica.

La importancia de conocer si existe, o no, una determinada cuantificación de la estructura del espacio-tiempo (cuantificación de la gravedad) permitiría saber cuál o qué conjunto de las actuales teorías (cosmología de branas, teoría de cuerdas, supercuerdas y supersimetrías) describe mejor los fenómenos físicos, porque, actualmente, cada teoría intenta dar respuesta al mismo fenómeno con grandes diferencias ontológicas y aplicación de distintos métodos matemáticos, lo que implica una mayor dificultad para el proceso de enseñanza y aprendizaje concerniente a estos temas.

Además de la variedad ontológica y riqueza matemática que emplea cada una de las teorías contemporáneas, se le agrega la falta de verificación experimental en el aula de clase, es decir, *“en ciencia y particularmente en física moderna la posibilidad de recurrir a actividades experimentales ordinarias desde la escuela e inclusive en la educación superior, es realmente utópica”* (Macías, Mejía y Aguilar, 2015, p. 11), por causa de las dificultades técnicas que implicaría recrear un experimento crucial como, por ejemplo, estudiar el horizonte de un agujero negro, o un agujero de gusano, son experiencias que están muy lejos de ser alcanzadas con la tecnología actual.

Así, una singularidad del espacio-tiempo que permita verificar el formalismo de las ecuaciones actualmente existentes implicaría evitar el uso de diversos modelos matemáticos. Sin embargo, la existencia de una diversidad de modelos científicos, sólo indica que aún se está lejos de conocer la naturaleza cierta de esa estructura.

Asimismo *“la posibilidad de viajar en el tiempo, de cruzar a través de un agujero negro e ingresar a un universo paralelo [...] son temáticas que siempre han generado una curiosidad en los estudiantes”* (Macías, Mejía y Aguilar, 2015, p. 9), pero, al tratar estos temas en el aula, no deberían fundamentarse sólo como un ejercicio de curiosidad, sino, como una muestra del esfuerzo que los matemáticos y físicos teóricos hacen para explicar la existencia de un universo como el que conocemos, incluyendo aquellos que demandan o concluyen sobre la existencia de múltiples universos.

Este hecho, nos hace reflexionar en cómo podría la enseñanza de la física volver sus ojos a la interpretación del espacio y del tiempo, que, gracias a su transversalidad y riqueza conceptual en el plano filosófico, místico y científico, muchas veces, termina siendo abordada en la visión abstracta establecida por Newton y defendida por Kant, tal vez por su simplicidad o su fácil ajuste a la percepción de la causalidad clásica (Guerrero, 2006). Por otro lado, la relatividad especial de Einstein especifica que el espacio y el tiempo no son simplemente conceptos externos abstractos, sino que, de hecho, deben considerarse observables medidos, como cualquier otra cantidad en la física, el tiempo no es más que lo que se mide por los relojes, y el espacio es lo que se mide por las reglas (Flanagan y Hughes, 2005).

Si nos dedicamos a explicar la importancia del espacio y tiempo, quizás otra historia sería contada sobre las dificultades del estudio de la física, porque simplificar el espacio y tiempo a dimensiones, es reducir su impacto y su relevancia en la explicación y en la comprensión de los fenómenos. No se trata solo de la base o el lienzo para pintar o representar objetos físicos, se trata de enseñar como el lienzo sin ningún artista es capaz de crear sus propios objetos, sus interacciones y modificaciones.

Conjuntamente los autores de los textos de física universitaria, tales como Beiser (1971); Eisberg (1979); Halliday, Resnick y Walker (2016); Marcelo y Edward (1977); Serway (2004); Sears, Zemansky y Young (1983); Taylor (1992); Tipler (2008); Tipler y Llewellyn (2001); Wolfgang y Gary (2013), hacen un gran esfuerzo por representar los fenómenos en diversos diagramas, ilustrando el antes y el después en un medio bidimensional, donde objetos que tienen un formalismo tensorial son agregados, sin más, como si estuviesen desprovistos del espacio y tiempo, y su dependencia se observa explícitamente relacionada con el objeto sometido a estudio. Un ejemplo bien conocido son los diagramas de cuerpo libre, presentes en la enseñanza de la dinámica.

Aquí, la masa gravitacional es representada por un vector denominado peso, que tiene por origen el centro de masa del objeto, en estas circunstancias es muy difícil para un estudiante iniciante comprender la relación de ese vector con el espacio-tiempo, ya que como es representado, parece que fuera una propiedad del objeto. Si bien es cierto, que los diagramas de cuerpo libre son modelos simplificados utilizados para la solución de problemas prácticos y cotidianos, lo cuales resultan imprescindibles en los cálculos y competencias de los estudiantes de ingeniería (Alonso y Pérez, 2010), también es cierto que, los estudiantes tienen dificultades en diferenciar entre los modelos científicos, modelos didácticos, diagramas, modelos análogos, representaciones, etc. (Galagovsky y Adúriz-Bravo, 2001; Ruiz y Luciano, 2012).

Así, una revisión de la producción científica en esta área permitiría aproximarse a los aspectos pedagógicos que los educadores-investigadores emplean en diferentes niveles de educación formal para enseñar la estructura del espacio-tiempo, también conocer cómo ellos abordan las representaciones construidas por los estudiantes a partir de la literatura de ciencia ficción y además conocer las ideas que predominan en el discurso científico y cómo pueden traducirse en las preocupaciones discutidas en los párrafos anteriores.

Por estos argumentos, el objetivo del presente artículo es reportar el análisis de la producción científica con fines educativos sobre la estructura del espacio-tiempo y construir una estructura intelectual, conceptual y de redes sociales de la comunidad científica implicada en las últimas tres décadas. Para abordar y analizar este objetivo, se sigue el presente diseño de estudio propuesto por Aria y Cuccurullo (2017) que puede resumirse en:

- a. Identificar su producción científica (artículos, libros, conferencias) y su estructura intelectual (referencias);
- b. Examinar el frente de investigación (o estructura conceptual) a través de ocurrencias de palabras y resultados de agrupación;
- c. Producir una estructura de redes sociales de una comunidad científica particular a partir de redes de acoplamiento bibliográficas (alternativamente, "citación", "colaboración" y "coocurrencias") como documentos, autores, referencias, palabras clave y países.

II. ABORDAJE METODOLÓGICO

Para localizar y analizar los documentos enumerados en la base de datos científica, utilizamos una herramienta de código abierto para la investigación cuantitativa en cienciométrica y bibliometría que utiliza métodos de análisis bibliométrico. Mediante el uso de Aplicaciones *R* y *Rstudio*, se añade una biblioteca desarrollada con estos métodos de análisis, llamada *Bibliometrix* que permite la cartografía científica (Aria Y Cuccurullo, 2017). En esta biblioteca, podemos realizar varias rutinas para la importación de datos bibliográficos de las Bases de Datos *Scopus*, *Web of Science* de la *Clarivate Analytics*, *PubMed* y *Cochrane*, obteniendo matrices de datos que permiten sintetizar resultados de investigaciones anteriores, así como el avance de una línea de investigación específica.

Existen varios métodos para resumir la cantidad de actividad científica en un dominio, pero la bibliometría tiene el potencial de introducir un proceso de revisión sistemático, transparente y reproducible y permite identificar datos

como cocitación, acoplamiento, análisis de la colaboración científica, palabras clave informadas por el autor, o por la revista, entre otros (Aria, Misuraca y Spano, 2020).

Las revisiones de la literatura desempeñan cada vez más un papel crucial en la síntesis de los hallazgos de investigaciones anteriores, y por lo tanto hacen un uso eficaz de la base de conocimientos existente, y por lo tanto establecen una línea de investigación basada en la evidencia sobre la práctica de ejercer y sostener el juicio y la experiencia profesional.

La selección de los datos fue a través de la licencia del *Portal de Periódicos CAPES/MEC*¹, que permite el acceso remoto al contenido suscrito del portal de revistas disponible para las Instituciones Académicas Federales, en este caso por la *Universidade Federal do Rio Grande-FURG*. Así, se tuvo acceso a la base *Web of Science*, donde se escogieron tres subbases de datos o Índices de citas:

- *Science Citation Index Expanded* (SCI-EXPANDED); 1945-presente;
- *Social Sciences Citation Index* (SSCI); 1956-presente;
- *Arts & Humanities Citation Index* (A&HCI); 1975-presente.

Se seleccionaron todos los documentos a partir de 1980 que correspondieran a los siguientes valores lógicos (*spacetime and teaching*) o (*spacetime and pedagogical*) en los siguientes campos de un registro (título; resumen; palabras clave de autor; palabras clave de la base de datos) así, la consulta determinó que el primer artículo que correspondía a dichos valores fue a partir de 1988. La tabla I muestra los artículos encontrados y consultados, de los cuales, solo un artículo se repitió en la consulta, totalizando ciento catorce artículos.

TABLA I. Tamaño promedio Resultado de la consulta en la base *Web of Science*.

Palabras clave	N° de Artículos
(spacetime) AND (teach*)	68
(spacetime) AND (pedagogical*)	47

Los datos recuperados fueron analizados con *Rstudio* v.3.4.1 (2017-06-30), con el paquete *R* de *Bibliometrix*². De esta manera, los datos fueron importados a *RStudio* y convertidos en un marco de datos bibliográficos, luego normalizados para la marcha por duplicado y la obtención de resultados descriptivos de los análisis de las citas, el índice h de los autores, la información científica y la productividad.

Para la marcha por duplicado se utilizaron las funciones pertinentes del paquete *R* del *Bibliometrix*, en el que se calcularon y visualizaron las redes bibliométricas (citación, autor, país, palabra clave del autor y redes de palabras clave de la base de datos) y el acoplamiento bibliográfico (citación conjunta, coocurrencias de palabras clave, etc.) en una red bibliométrica bidireccional (bipartita) de matrices rectangulares de Artículos \times Atributos.

Para Aria y Cuccurullo (2017) una red bibliométrica típica se expresa como $\text{Red}(N) = X \times N^T$ donde X es una matriz de red bipartita compuesta de Artículos \times Atributo (autores, palabras clave, citas y países) y N es una matriz simétrica.

Se creó un modelo gráfico de todas las redes utilizando algoritmos dirigidos por el grupo Louvain (Blondel *et al.*, 2008) implementados en la función *networkPlot* del paquete *R*. Todas las redes se estandarizaron utilizando el coeficiente de Simpson (índice de inclusión), el índice de proximidad (fuerza de asociación), el índice de similitud de Jaccard y el coeficiente coseno de Salton entre los nodos de una red. La función implementa el algoritmo de derivación de Porter para modular las palabras flexionadas hasta su forma raíz.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Análisis de la Producción Científica y Estructura Intelectual

El primer objeto de análisis es la producción científica (artículos, libros, conferencias) y su estructura intelectual (referencias); concerniente a la enseñanza de la estructura del espacio tiempo. Así, se comienza por determinar el incremento anual en la producción científica, para lo cual se usó el *Compound Annual Growth Rate* (CAGR) que consiste básicamente en ubicar el primer máximo (PM) y último máximo (UM) en un determinado intervalo de tiempo y extrapolarlos en una regresión exponencial (ver más detalles en Brewer y Picus, 2014, p. 157-158).

¹ <http://www.periodicos.capes.gov.br/>

² <http://www.bibliometrix.org>

www.revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF

En este caso el máximo es representado por el mayor número de publicaciones por cada año, en la figura 1, observamos que en 1998 se realizaron tres publicaciones, y el UM se presenta en el 2019 con nueve publicaciones, colocando estos datos en la ecuación (1) obtenemos un crecimiento de producción anual del 5.37%. La figura 1 también nos muestra como la mayor producción en esta temática se encuentra en el 2016 con trece publicaciones.

$$CAGR = \left(\frac{UM}{PM}\right)^{\frac{1}{2019-1988}} - 1 \rightarrow 5,37\% \tag{1}$$

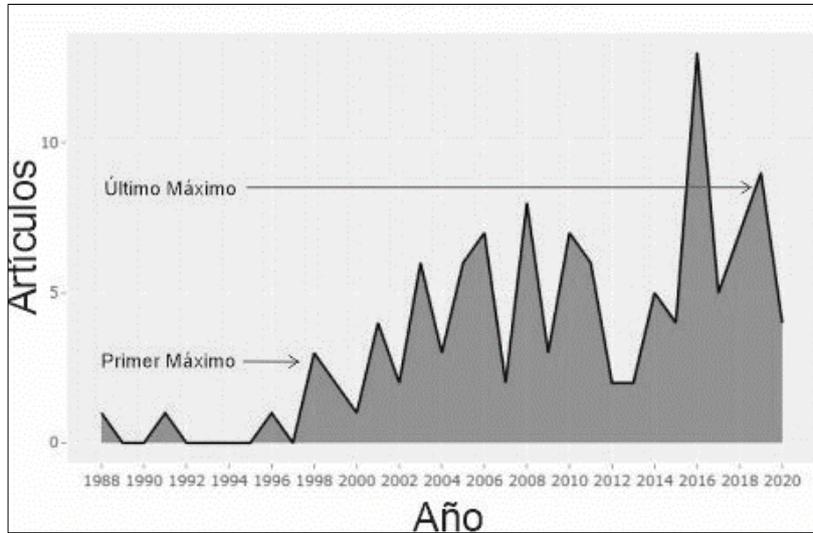


FIGURA 1. Producción científica anual.

El segundo aspecto de análisis es identificar cuáles son las revistas académicas que concentran el mayor número de publicaciones en el área sometida a estudio, para ello, nos fundamentamos en la Ley de Bradford para determinar qué periódicos representan el núcleo y demás zonas de menor incidencia documental. En la tabla II se puede observar que los periódicos con mayor número de publicación en el área sometida a estudios son *American Journal of Physics* y *European Journal of Physics* y aunque en esta tabla no aparezcan revistas reconocidas en el área de la enseñanza de física, tales como: *The Physics Teacher*, *Physics Education*, *Physical Review Physics Education Research*, se debe a que estas forman parte de una zona menor de veintitrés revistas según se muestra en la figura 2.

TABLA II. Las 10 revistas con mayor número de publicaciones relativas a la enseñanza de la estructura del espacio-tiempo.

Revistas académicas	Ranking	Frec.	Zona
American Journal of Physics	1	46	Zona 1
European Journal of Physics	2	24	Zona 2
Classical and Quantum Gravity	3	6	Zona 2
General Relativity and Gravitation	4	4	Zona 2
International Journal of Modern Physics D	5	3	Zona 3
Journal of High Energy Physics	6	3	Zona 3
New Journal of Physics	7	3	Zona 3
IEEE Transactions on Antennas and Propagation	8	2	Zona 3
International Journal of Geometric Methods in Modern Physics	9	2	Zona 3
Journal of Physics A-Mathematical and Theoretical	10	2	Zona 3

Además, la figura 2, muestra cómo se distribuyen siguiendo la Ley de Bradford, donde *American Journal of Physics* constituye el núcleo de las zonas, representando un 40,35%.

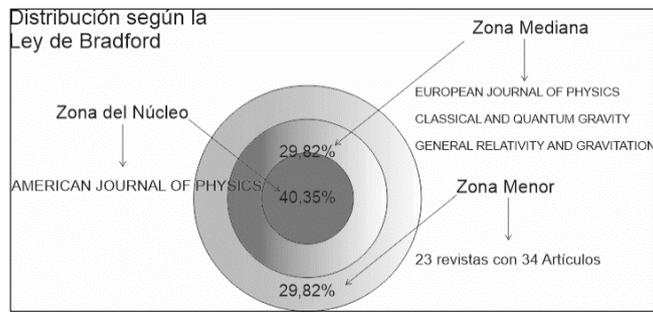


FIGURA 2. Revistas con mayor número de publicaciones.

El tercer aspecto de análisis es identificar la estructura referencial empleada para argumentar y fundamentar los artículos, denominada, *grosso modo*, estructura intelectual. Para eso, se construyó una red de coocurrencia, normalizada por asociación bajo el análisis de grupo de Louvain con respecto a las referencias bibliográficas (figura 3).

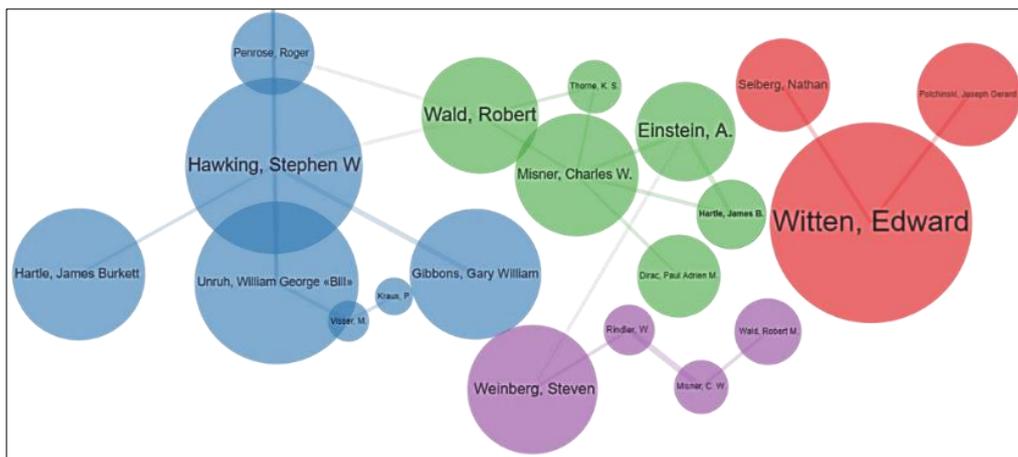


FIGURA 3. Red de coocurrencia de referencias bibliográficas externas y locales, por autores.

Se estableció como límite mínimo cuatro asociaciones. Así, se reorganizaron en cuatro grupos, donde el tamaño de la circunferencia indica la frecuencia; es decir, la circunferencia más pequeña indica que el autor fue citado en al menos cuatro artículos, la figura está diseñada a escala, representados por los colores verde, azul, magenta y rojo, en el que solo los tres primeros grupos están relacionados por la asociación mínima, mientras que el tercer grupo sólo tiene relación interna.

Tabla III. Las diez obras más citadas en referencias bibliográficas en *Web of Science*.

Google A.	Referencias citadas	N. de citas
link	Misner, C. W., Thorne, K. S., y Wheeler, J. A. (1973). <i>Gravitation</i> . Macmillan.	25
link	Morris, M. S. y Thorne, K. S. (1988). Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity. <i>American Journal of Physics</i> , 56(5), 395-412.	9
link	Wald, R. M. (1984). <i>General relativity</i> . Chicago: University of Chicago Press, 504 p.	9
link	Einstein, A. (1916). Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie ANN PHYS-BERLIN, 49	8
link	Rindler, W. (2001). <i>Relativity: special, general, and cosmological</i> . New York: Oxford University Press	8
link	Hartle, J. B. (2003). <i>Gravity: An introduction to Einstein's general relativity</i> . A. J. of Physics 71, 1086	7
link	Weinberg, S. (1972). <i>Gravitation and cosmology: principles and applications of the general theory of relativity</i> . New York: Wiley.	7
link	Hawking, S. W. y Ellis, G. (1973). <i>The large-scale structure of space-time (Vol. 1)</i> . Cambridge: U. P.	6
link	Hawking, S. W. (1975). Particle creation by black holes. C. in <i>mathematical physics</i> , 43(3), 199-220.	6
link	Wald, R. M. (1984). <i>General relativity</i> . Chicago: University of Chicago Press, 504 p.	6

La tabla III muestra las 10 principales obras, ordenadas de mayor a menor, según el número de veces citadas dentro de la base de datos extraída de la *Web of Science*. Si se analiza la figura 3 con los datos de la tabla III, se observa una discrepancia entre los autores citados; esto se debe a que la tabla III muestra las 10 obras más citadas, mientras que la figura 3 indica el autor más citado y no sus obras, por esta razón la tabla III complementa la figura 3.

La tabla IV devela la estructura intelectual de los artículos con citas internas dentro de la base de datos seleccionada e importada en R, en el cual se analizaron 4664 referencias bibliográficas, y se encontraron 21 artículos con cocitaciones internas, aquí (LCS) representa el número de citas locales de los ciento catorce artículos analizados y (GCS) representa las citas globales realizadas en toda la base de datos de la *Web of Science*.

Tabla IV. Estructura Intelectual.

Primer Autor	Título	Año	LCS	GCS
Morris, M.	Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel	1988	9	1276
Marolf, D.	Spacetime embedding diagrams for black holes	1999	5	14
Jonsson, R.	Embedding spacetime via a geodesically equivalent metric of Euclidean s.	2001	4	5
Visser, M.	Acoustic black holes: horizons, ergo spheres and hawking radiation	1998	3	419
Muller, T.	Visual appearance of a Morris-Thorne-wormhole	2004	3	21
Jonsson, R.	Visualizing curved spacetime	2005	3	7
Gould, R.	Why does a ball fall? A new visualization for Einstein's model of gravity	2016	3	7
Muller, T.	Interactive visualization of a thin disc around a Schwarzschild black hole	2012	2	8
Zahn, C.	Sector models-a toolkit for teaching general relativity	2014	2	7
Sikkema, A.	Gravitation and cosmology in (1+1) dimensions	1991	1	69
Harris, E.	The gravitational Aharonov-Bohm effect with photons	1996	1	19
Martel, K.	Regular coordinate systems for Schwarzschild and other spherical spacetimes	2001	1	88
Brill D.	Spacetime and Euclidean geometry	2006	1	2
Flores, F.	Communicating with accelerated observers in Minkowski spacetime	2008	1	2
Muller, T.	Studying null and time-like geodesics in the classroom	2011	1	7
Muller, T.	Geovis relativistic ray tracing in four-dimensional spacetimes	2014	1	5
Kosyakov, B.	The pedagogical value of the four-dimensional picture	2014	1	5
Price, R.	Spatial curvature, spacetime curvature, and gravity	2016	1	6
Brown, H.	Clarifying possible misconceptions in the foundations of general relativity	2016	1	7
Stannard, W.	Why did the apple fall? A new model to explain Einstein's gravity	2017	1	1
Kersting, M.	Understanding curved spacetime: the role of the rubber sheet analogy in learning general relativity	2018	1	2

Finalmente, con los datos de la tabla IV, se construyó la figura 4 que indica la red de citaciones en función de los años, el color representa las relaciones entre las citas locales, y el número de artículos en la figura es mayor que el de la tabla porque se muestran los artículos que hicieron la referida cita, esto demuestra como la producción científica en esta área ha ido evolucionando y reorganizando su cuerpo teórico.

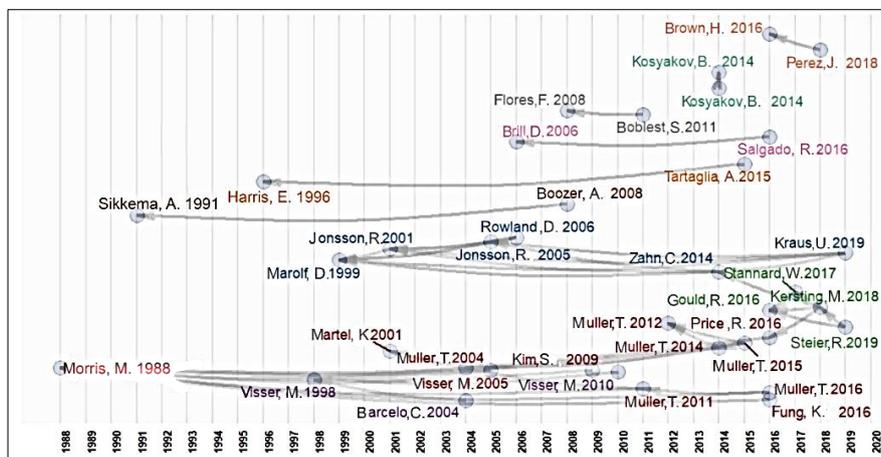


FIGURA 4. Red de coocurrencia de referencias bibliográficas externas y locales.

Como es poco común que el título indique los métodos pedagógicos empleados, es necesario realizar un segundo nivel de análisis en relación con las palabras empleadas con mayor coocurrencia en el resumen de cada uno de los artículos consultados. Para tal fin, se construyó una red de coocurrencia tipo estrella, normalizada por asociación bajo el análisis de grupo de Louvain con respecto a las treinta principales palabras con mayor frecuencia en el resumen (ver figura 6), donde se estableció como límite mínimo de diez asociaciones, así, se reorganizaron en tres grupos, representados por enseñanza de la física, modelos pedagógicos y estructura del espacio tiempo.

La figura 6 revela como los modelos pedagógicos (color rojo) están relacionados con los tópicos de la teoría de campos cuánticos, la cuantificación de la gravedad, mientras que la enseñanza la física (color verde) busca comprender la estructura del espacio-tiempo en la teoría, tanto especial como general, de la relatividad, por último la estructura del espacio tiempo (color azul) indica los tópicos como se aborda esta estructura, a saber, ecuaciones, curvaturas-geometrías, sistemas y soluciones.

En función de este análisis, se procedió a discutir cómo los artículos del grupo de color rojo en la figura 6, abordan los tópicos, intereses y métodos que tienen en común. El tópico de mayor asociación para comprender la estructura del espacio-tiempo es la curvatura; así, en los trabajos de Morris y Thorne, 1988; Flanagan y Hughes, 2005; Steier y Kersting, 2019, usan diversas figuras tridimensionales bien elaboradas para comprender la estructura del espacio-tiempo de una forma visual, entre los intereses se destaca, la comprensión del universo desde la hipótesis de la cuantificación de la estructura del espacio-tiempo (cuantificación de la gravedad) porque este es el factor central entre la mayoría de los artículos que se analizaron. Finalmente, la estrategia didáctica empleada en los trabajos de Visser, 1998; Flanagan y Hughes, 2005; Batlle *et al.*, 2019; Steier y Kersting, 2019, es la analogía, pues se puede apreciar como, a lo largo del desarrollo de la propuesta pedagógica, la argumentación se fundamenta en ella.

C. Análisis de la estructura de redes sociales de la comunidad científica

En este primer nivel de análisis se representa el vínculo institucional y países de los principales autores en esta área de estudio, clasificados por el número de trabajos publicados, su h-index y el número total de citas (TC). La tabla VI ordena los veinte principales autores y donde pueden ser encontrados, para futuras consultas o investigaciones.

Tabla VI. Afiliación y país de los principales autores.

Autor	Artículos	Afiliado	País	TC	h_index
MULLER, T.	7	Universidad de Stuttgart	Alemania	46	4
VISSER, M.	4	Universidad Victoria de Wellington	Nueva Zelanda	534	4
BOOZER, A. D.	2	California Institute of Technology	Estados Unidos	5	1
CALOZ, C.	2	Polytech Montpellier	Canadá	6	2
DECK-LEGER, Z. L.	2	Polytech Montpellier	Canadá	6	2
FRAUENDIENER, J.	2	Universidad de Otago	Nueva Zelanda	15	2
KERSTING, M.	2	Universidad de Oslo	Noruega	3	1
KOSYAKOV, B. P.	2	Russian Federal Nuclear Center	Rusia	7	2
KRAUS, U.	2	Universidad de Hildesheim	Alemania	7	1
POISSON, E.	2	Universidad de Guelph	Canadá	5	1
READ, J.	2	Universidad de Oxford	Reino Unido	7	1
SINGLETON, D.	2	Universidad Estatal Paulista	Brasil	18	1
STEIER, R.	2	Universidad de Oslo	Noruega	3	1
ZAHN, C.	2	Universidad de Hildesheim	Alemania	7	1
ADLER, R. J.	1	Universidad Stanford	Estados Unidos	38	1
AKHMEDOVA, V.	1	California State University, Fresno	Estados Unidos	17	1
ALSING, P. M.	1	Universidad de Nuevo México	Estados Unidos	27	1
ANDOSCA, R.	1	California State University, Fresno	Estados Unidos	1	1
KOKE, C.	1	Universidad Ruprecht Karl de Heidelberg	Alemania	15	1
ARKANI-HAMED, N.	1	Instituto de Estudios Avanzados	Estados Unidos	129	1

El segundo nivel de análisis está relacionado con la cooperación entre instituciones y países. Para ello, se construyó una red de coocurrencia al estilo libre, normalizada por asociación bajo el análisis de grupo de Louvain referente a los países de procedencia tanto de los autores como de los institutos (ver figura 7), donde se estableció como límite mínimo de una asociación.



FIGURA 7. Red de coocurrencia de los principales países.

En la figura 7 se muestran tres grupos de países, siendo Alemania el principal productor, seguido de los Estados Unidos, lo que indica una mayor producción de investigación en los países de altos ingresos en comparación con los países de ingresos bajos y medios y una colaboración limitada con los países en desarrollo. Una de las principales razones de esta baja participación corresponde al hecho de que la región de América Latina sólo tiene el 2,3% de las revistas indexadas en la *Web of Science*, es decir, más del 97% de las revistas latinoamericanas no se consideran en las principales bases de datos (Salatino y Ruiz, 2020).

V. CONCLUSIONES

La revisión de la producción científica en esta área permite concluir que los aspectos pedagógicos que los educadores están empleando para enseñar la estructura del espacio-tiempo es la analogía como estrategia didáctica, no solo como un método de argumentación, sino como un puente para la construcción de significados relacionados con conceptos científicos abstractos, a través del comportamiento de sistemas físicos, por ejemplo, Visser (1998) emplea la analogía entre las ondas de sonido en un fluido de flujo con las ondas de luz en el espacio tiempo. Así, este tipo de comparación se puede utilizar en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las Ciencias porque tiene el potencial de ayudar al estudiante a crear el modelo mental en función de sus concepciones preliminares que va a servir de base para la comprensión de la estructura del espacio-tiempo.

Bajo ciertas condiciones impuesta a un conjunto de ecuaciones conocidas y aprendidas por el estudiante en un sistema dinámico más concreto como por ejemplo la hidrodinámica, las ecuaciones que describen la estructura del espacio-tiempo son equivalentes y pueden ser enseñadas por medio de la comparación y así recrear un modelo mental abstracto en función de lo concreto de sus ideas previas. También es notable como estos artículos sometidos a análisis abordan las diversas representaciones que los estudiantes obtienen a través de la ciencia ficción.

Se concluye que las ideas que predominan en el discurso científico es comprender el universo en función de comparaciones de sistemas concretos y conocidos por los estudiantes, teniendo como hipótesis la cuantificación de la estructura del espacio-tiempo (cuantificación de la gravedad) este es un factor común entre la mayoría de los artículos que abordan esta temática.

Las técnicas y métodos empleados para normalizar y asociar las palabras claves a través del procesamiento de texto en matrices de teorías de redes y gráficos permitió un perfil empírico de la convergencia de la investigación,

como denota la coocurrencia de palabras claves, este uso de métodos empíricamente informados y basados en datos para definir la heurística de los artículos, el cual direccionó la hermenéutica por parte de los autores.

Este principio de normalización para identificar el enfoque de la investigación, junto con el examen empírico de las tendencias de publicación utilizando análisis estadísticos, verificó una tendencia de crecimiento anual de la investigación, en línea con la enseñanza de la física fundamentada en estructura del espacio-tiempo, en las últimas tres décadas, y resultó en la identificación de hitos que delimitan áreas de interés prominentes en todo el campo.

Estos resultados identificados automáticamente incluyen: (1) 2016 como el año de inflexión para la producción de la investigación, (2) el papel continuo de la terminología enseñanza de la física y pedagogía, es decir, los métodos educativos, en la investigación de la estructura del espacio tiempo, y (3) la identificación de los tópicos de la teoría de campos cuánticos, la cuantificación de la gravedad, y la teoría tanto especial como general de la relatividad como principales objetos de estudio.

Se concluye que la estructura del espacio tiempo es fuertemente utilizada en la relatividad general, teoría cuántica y en las soluciones de Schwarzschild y que los modelos pedagógicos están relacionados con los tópicos de la teoría de campos cuánticos, la cuantificación de la gravedad, mientras que la enseñanza la física busca comprender la estructura del espacio tiempo en la teoría tanto especial como general de la relatividad. Además, el análisis bibliométrico reveló una investigación centrada en la física teórica y su posible analogía con ondas sonoras en flujo de fluidos como posibles métodos de enseñanzas.

Por último, es necesario mencionar las limitaciones del estudio, particularmente, lo referente a la prevalencia de artículos escritos en inglés y alemán, pues no se hace referencia sino tan sólo a una pequeña parte de la producción en lengua española y portuguesa (apenas el 3%). Por lo que queda pendiente realizar un estudio más detallado y enfocado en los mismos filtros de búsqueda en los repositorios de América Latina, para dar cuenta de lo que se está trabajando sobre la estructura del espacio-tiempo con fines educativos, en revistas con publicaciones en español y portugués.

REFERENCIAS

- Alonso, G. F. y Pérez, A. M. (2010). Desarrollo de competencias en un curso de Física para ingenieros. *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 4(3), 683-691.
- Aria, M. y Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975.
- Aria, M., Misuraca, M. y Spano, M. (04 de feb. de 2020). Mapping the evolution of social research and data science on 30 years of Social Indicators Research. *Social Indicators Research*, 149, 803–831. doi:10.1007/s11205-020-02281-3
- Arunachalam, S., Dhirendra Rao, M. K. y Shrivastava, P. K. (1984). Physics research in Israel—A preliminary bibliometric analysis. *Journal of Information Science*, 8(5), 185-195.
- Battle, P., Teixidó, A., Llobera, J., Medrano, I. y Pardo, L. C. (2019). Exploring the rubber sheet spacetime analogy by studying ball movement in a bent trampoline. *European Journal of Physics*, 40(4). doi:10.1088/1361-6404/ab1a5c
- Beiser, A. (1971). *Basic concepts of physics* (Segunda ed.). Massachusetts: Addison-Wesley.
- Bertschinger, T. H. (2019). Spacetime Symmetries and Classical Mechanics. *Symmetry*, 11(1), 22. doi:10.3390/sym11010022
- Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R. y Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 10, P10008. doi:10.1088/1742-5468/2008/10/p10008
- Brax, P. y Van de Bruck, C. (May de 2003). Cosmology and brane worlds: a review. *Classical and Quantum Gravity*, 20(9), p. R201-R232. Obtenido de <Go to ISI>://WOS:000183081000005 >
- Brewer, D. J. y Picus, L. O. (2014). *Encyclopedia of Education Economics and Finance* (Vol. 1). London, UK: SAGE.
- Carpenter, M., Gibb, F., Harris, M., Irvine, J., Martin, B. y Narin, F. (1988). Bibliometric profiles for British academic institutions: An experiment to develop research output indicators. *Scientometrics*, 14(3-4), 213-233.

- Cuesta-Beltrán, Y. J. (2018). Estado del arte: tendencias en la enseñanza de la física cuántica entre 1986 y 2016. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (44).
- Eisberg, R. (1979). *Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. Rio de Janeiro, Brasil: Campus.
- Flanagan, E. E. y Hughes, S. A. (Sep de 2005). The basics of gravitational wave theory. *New Journal of Physics*, 7, 52.
- Galagovsky, L. R. y Adúriz-Bravo, A. (2001). Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las Ciencias*, 19(2), 231-242.
- Glänzel, W., Rinia, E. J. y Brocken, M. G. (1995). A bibliometric study of highly cited European physics papers in the 80s. *Research Evaluation*, 5(2), 113-122.
- Guerrero Pino, G. (June de 2006). Einstein y la realidad del espacio: realismo y convencionalismo. *Praxis Filosófica*, 22, 131-152. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-46882006000100004&lng=en&tlng=es
- Guisasola, J., Solbes, J., Barragués, J., M. A. y Morentin, M. (2007). Comprensión de los estudiantes de la teoría especial de la relatividad y diseño de una visita guiada a un museo de la ciencia. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 4(1), 2-20. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/920/92040102.pdf>
- Halliday, D., Resnick, R. y Walker, J. (2016). *Fundamentos de física* (Decima ed., Vol. IV). (R. S. BIASI, Trad.) Rio de Janeiro, Brasil: LTC.
- Heidegger, M. (2016). *Ser e tempo* (Décima ed.). (M. d. Cavalcante, Trad.) Petrópolis, Río de Janeiro, Brasil: Vozes.
- Hernández Gutiérrez, I. (2014). Sistemas tutores inteligentes: aplicados a nivel medio superior para el aprendizaje del primer postulado de la relatividad especial. (I. P. Nacional, Ed.) *Trabajo de Maestría en Ciencias en Física Educativa*, 69. Recuperado el 15 de 01 de 2018, de https://scholar.google.com/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&scioq=Sanchez+Alonso%2C+M.+y+Selva+Soler%2C+V.+%282006%29.+Animaciones+y+Simulacione s%3A+Construyendo+la+Relatividad.+Espa%C3%B1a.&scilib=1&q=sistemas+tutores+inteligentes&btnG=
- Kim, M. J. (2001). A bibliometric analysis of physics publications in Korea, 1994-1998.). *Scientometrics*, 50(3), 503-521.
- López Posada, Y. C. (2012). *Problemáticas en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la teoría especial de la relatividad con respecto a los maestros en formación de la licenciatura en matemáticas y física de la Universidad de Antioquia*. (L. S. Mejía Aristizábal y V. A. Urrego, Edits.) Medellín, Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia. Obtenido de <http://hdl.handle.net/123456789/1791>
- Macías, C., Mejía, L. S. y Aguilar, Y. (2015). La experimentación mental en la formación de maestros deficiencias: Una alternativa para la enseñanza de la física moderna en la escuela. *Latin American Journal of Science Education*, 2(1), 1-12.
- Makhoba, X. y Pouri, A. (2017). Bibliometric analysis of the development of nanoscience research in South Africa. *S. Afr. j. sci., Pretoria*, 113(11-12), 1-9.
- Marcelo, A. y Edward, F. (1977). *Física: um curso universitário- Campos e Ondas* (Vol. II). São Paulo, Brasil: Blucher.
- Marx, W. y Cardona, M. (2014). Physics in Cuba from the Perspective of Bibliometrics. En Dordrecht, *The History of Physics in Cuba* (págs. 423-437). Springer.
- Morris, M. S. y Thorne, K. S. (May de 1988). WORMHOLES IN SPACETIME AND THEIR USE FOR INTERSTELLAR TRAVEL - A TOOL FOR TEACHING GENERAL-RELATIVITY. *American Journal of Physics*, 56(5), 395-412. Obtenido de <Go to ISI>://WOS:A1988N238
- Mota, J. A. (Junio de 2011). Uso de nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación para la enseñanza de la teoría especial de la relatividad en el bachillerato. *Eutopia*, 16, 204-206. Obtenido de <http://revistas.unam.mx/index.php/eutopia/article/viewFile/42164/38301>

- Nicolai, H., Peeters, K. y Zamaklar, M. (Oct de 2005). Loop quantum gravity: an outside view. *Classical and Quantum Gravity*, 22(19), p. R193-R247. Obtenido de <Go to ISI>://WOS:000232751900002 >
- Padmanabhan, T. (Jan de 2020). Gravity and quantum theory: Domains of conflict and contact. *International Journal of Modern Physics D*, 29(1), p. 120. Obtenido de <Go to ISI>://WOS:000518159300002 >
- Pérez, H. y Solbes, J. (2006). Una propuesta sobre enseñanza de la relatividad en el bachillerato como motivación para el aprendizaje de la física. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 24(2), 269-283.
- Prado, X., Domínguez-Castiñeiras, J. M., Area, I., Paredes, Á. y Mira, J. (2020). Aprendizaje de la Teoría de la Relatividad Restringida de Einstein. Estado de la Cuestión. (APAC-Eureka, Ed.) *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 17(1), 1103, 1-16. doi:10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i1.1103
- Rajendiran, P. y Parihar, Y. S. (2007). A bibliometric study of laser literature in India, 1995-2005. *ALIS*, 54(2), 112-118.
- Rinia, E. J., Van Leeuwen, T. N., Van Vuren, H. G. y Van Raan, A. F. (1998). Comparative analysis of a set of bibliometric indicators and central peer review criteria: Evaluation of condensed matter physics in the Netherlands. *Research policy*, 27(1), 95-107.
- Rinia, E. J., Van Leeuwen, T. N., Van Vuren, H. G. y Van Raan, A. F. (2001). Influence of interdisciplinarity on peer-review and bibliometric evaluations in physics research. *Research policy*, 30(3), 357-361.
- Rovira, L., Senra, P. y Jou, D. (2000). Bibliometric analysis of physics in Catalonia: Towards quality consolidation? *Scientometrics*, 49(2), 233-256.
- Ruiz, F. J. y Luciano, C. (2012). Relacionar relaciones como modelo analítico-funcional de la analogía y la metáfora. *Acta Comportamental: Revista Latina de Análisis de Comportamiento*, 20, 5-31.
- Sánchez, M. A. y Selva, V. S. (2006). La relatividad en el bachillerato. Una propuesta de unidad didáctica. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 24(3), 439-454.
- Sánchez, M. F. y Selva, V. F. (2005). Taller sobre enseñanza de la relatividad en bachillerato: unidad didáctica renovada, libro y animaciones informáticas. *Boletín das ciencias*, 18(58), 45-46.
- Sears, F., Zemansky, M. y Young, H. (1983). *Física* (Vol. IV). (J. Weid, Trad.) Rio de Janeiro: Livros Tecnicos e Cientificos.
- Serway, R. (2004). *Principios de física: mecânica clássica*. (A. K. Assis, Trad.) São Paulo: Cengage.
- Shapiro, I. L. (May de 2008). Effective action of vacuum: the semiclassical approach. *Classical and Quantum Gravity*, 25(10), 47. Obtenido de <Go to ISI>://WOS:000255897100001 >
- Steier, R. y Kersting, M. (2019). Metaimagining and embodied conceptions of spacetime. . *Cognition and Instruction*, 37(2), 145-168. doi:10.1080/07370008.2019.1580711
- Taylor, E. (1992). *Spacetime physics: introduction to special relativity* (Segunda ed.). New York: W.H. Freeman.
- Tipler, P. A. (2008). *Física para cientistas e engenheiros* (Sexta ed.). Rio de Janeiro: LCT.
- Tipler, P. A. y Llewellyn, R. (2001). *Física moderna*. (R. S. Biasi, Trad.) Rio de Janeiro: LTC.
- Visser, M. (Jun de 1998). Acoustic black holes: horizons, ergospheres and Hawking radiation. . *Classical and Quantum Gravity*, 15(6), 1767-1791. Obtenido de <Go to ISI>://WOS:000074298700024 >
- Wolfgang, B. y Gary, W. (2013). *Física para universitarios: óptica e física moderna*. (Neto y Ricci, Trad.) Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: AMGH.