

## ***MEASUREMENT PRACTICES, CONVENTIONALISM AND GEOMETRY***

**MIGUEL AGUSTÍN AGUILAR SANDOVAL**  
ORCID.ORG/0000-0002-1014-5516  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA  
EGRESADO DE LA MAESTRÍA EN HUMANIDADES  
miguelllzim@hotmail.com

**Abstract:** *At the end of the 19th century and the beginning of the 20th, Henri Poincaré affirmed that the application of non-Euclidean geometries to physics was possible, but it would never be adequate. However, Albert Einstein used non-Euclidean geometries in a way that seems to contradict Poincaré. With a brief reconstruction of Poincaré's arguments and considering the history of Einstein's inquiry about relativity, I show that the use of non-Euclidean geometries is motivated by considerations about measurement that are not considered by Poincaré's conventionalism. I make use of the recent literature in philosophy of science about measurement practices to reevaluate this case. The study allows conclusions to be drawn about the need to adequately identify the decision mechanisms that operate in scientific practice.*

**KEYWORDS:** RELATIVITY; SPACE; TIME; EINSTEIN; POINCARÉ.

**RECEPTION:** 05/05/2018

**ACCEPTANCE:** 16/10/2018

## **PRÁCTICAS DE MEDICIÓN, CONVENCIONALISMO Y GEOMETRÍA**

**MIGUEL AGUSTÍN AGUILAR SANDOVAL**  
ORCID.ORG/0000-0002-1014-5516  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA  
EGRESADO DE LA MAESTRÍA EN HUMANIDADES  
miguelllzim@hotmail.com

**Resumen:** A finales del siglo XIX e inicios del XX, Henri Poincaré afirmó que la aplicación de las geometrías no euclidianas a la física era posible, pero nunca resultaría adecuada. Sin embargo, Albert Einstein lo hizo en su formulación de la relatividad general de una manera que parece contradecir a Poincaré. Hago uso de la reciente literatura en filosofía de la ciencia acerca de las prácticas de medición para reevaluar este caso. Con una breve reconstrucción de los argumentos de Poincaré y considerando la historia de la indagación de Einstein acerca de la relatividad, muestro que el uso de las geometrías no euclidianas es motivado por consideraciones acerca de la medición que no son tomados en cuenta por el convencionalismo de Poincaré. El estudio permite sacar conclusiones sobre la necesidad de identificar adecuadamente los mecanismos de decisión que operan en la práctica científica.

**PALABRAS CLAVE:** RELATIVIDAD; ESPACIO; TIEMPO; EINSTEIN; POINCARÉ.

**RECIBIDO: 05/05/2018**

**ACEPTADO: 16/10/2018**

## INTRODUCCIÓN

Gran parte de la filosofía de la ciencia, en la segunda mitad del siglo xx, tomó a las teorías científicas como objeto principal de su análisis y dejó de lado otros aspectos constitutivos de la ciencia. Esto puede ser adecuado para algunos propósitos, pero hay cierto riesgo al asumir que los aspectos materiales, sociales o cognitivos dejados de lado no son filosóficamente relevantes. Las respuestas a preguntas filosóficas relacionadas con el conocimiento científico bien podrían depender de la comprensión de la práctica científica en un sentido más amplio.

Cuando hoy en día se habla de una filosofía de las prácticas científicas se quiere sugerir que, para la filosofía de la ciencia, como lo sugería Neurath, la estructura normativa de la ciencia no puede entenderse haciendo abstracción de todo ese complejo de acciones, actividades y creencias que constituyen esas prácticas. (Martínez y Huang, 2011: 7)

La tendencia en los últimos años de reconsiderar otros aspectos de las prácticas científicas, aparte de las teorías, sugiere motivos para pensar que este es el caso. “The move toward practice has led a number of philosophers of science to claim that it has shed light on important but previously invisible aspects of science” (Soler, 2008: 12).

Investigadores como Luca Mari (2003), Hasok Chang (2004, 2012), Bas C. Van Fraassen (2008), Eran Tal (2013) o Godfrey Guillaumin (2016) han mostrado cómo las prácticas de medición en ciencia se desarrollan mediante un proceso más complejo de lo tradicionalmente reconocido. Por ejemplo, respecto de la elección de estándares para definir unidades de medición de magnitudes físicas: “The traditional philosophical approach to this problem holds that coordination is accomplished by specifying definitions, or definition-like statements, for some of the relevant quantity terms” (Tal, 2013: 1160). Sin embargo, los nuevos estudios centrados en prácticas de medición muestran un proceso más complejo, donde la elección de estándares no se limita a una elección en un momento dado, más bien implica un ajuste constante e iterativo de instrumentos, modelos cognitivos, consideraciones ontológicas y otros elementos de la práctica científica.

Un motivo para estudiar las prácticas de medición es identificar los criterios que, en el desarrollo de la ciencia, permitieron escoger el uso de determinados estándares o recursos cognitivos para la medición en lugar de otros, pues hay casos donde no es clara su justificación. En particular, el físico y filósofo de finales del siglo XIX, Henri Poincaré formuló una famosa tesis conocida como *convencionalismo*, donde concluye erróneamente que las geometrías no euclidianas nunca serían adecuadas en física. Quizás, esta idea se debió a un entendimiento inadecuado de la medición. El convencionalismo, como la tesis de la subdeterminación, sugiere que, por lo menos, algunos elementos de la práctica científica no están determinados por la evidencia empírica. En ciencia, lo que se considera evidencia empírica está íntimamente relacionada con la medición científica, por ello es razonable suponer que las conclusiones de Poincaré están conectadas con lo que consideraba posible deducir de los datos de las mediciones. En este caso, utilizar geometría euclidiana o no euclidiana en física, según Poincaré, no se podía decidir a partir de los datos de alguna medición posible.

Años después, en 1915, Albert Einstein formuló la relatividad general, la cual depende de manera crucial de geometrías no euclidianas. Autores como Hans Reichenbach (1957), Adolf Grünbaum (1973) o Hilary Putnam (1975) debatieron si la geometría del espacio (o espacio-tiempo) está o no determinada por los datos de las mediciones. En general, señalan cierta circularidad: se requiere una noción de medición de distancia para determinar una geometría y viceversa. Vale la pena considerar si el desarrollo de las prácticas de medición generó algún criterio que motivara a Einstein al uso de geometrías no euclidianas. Parece extraño que, mientras él trabajaba en la relatividad general, no pareciera preocuparse por la supuesta circularidad entre la noción de distancia (y tiempo) y la geometría.

Mi objetivo consiste en identificar cómo fue superada una aparente subdeterminación en el uso de la geometría en física respondiendo a las preguntas: *¿qué consideraciones acerca de la medición, si hay alguna, llevaron a Poincaré a concluir que no había manera de determinar la geometría del espacio físico y que el uso de una geometría euclidiana o no euclidiana, en física, sólo podía establecerse por convención?*, *¿qué mecanismos de decisión le permitieron a Einstein determinar como necesario utilizar geometrías no euclidianas, a pesar de que Poincaré había argumentado que esto nunca resultaría adecuado?* De las respuestas a estas preguntas:

*¿qué implicaciones tiene el estudio de las prácticas de medición para tesis filosóficas, como el convencionalismo, que parecen delimitar el alcance del conocimiento científico?* Las respuestas, al considerar la coherencia y la integración entre distintos componentes de la práctica científica, hacen posible identificar elementos de racionalidad<sup>1</sup> en las decisiones tomadas por los científicos en casos históricos de aparente subdeterminación en la ciencia, como el uso de los sistemas de geometría a inicios del siglo xx.

Para responder a las preguntas, analizaré las conclusiones de Poincaré acerca de las geometrías no euclidianas y el desarrollo histórico de las reflexiones de Einstein que lo llevaron a utilizarlas en la relatividad general. Evitaré el concepto de teoría como unidad de análisis, en su lugar utilizaré las categorías que propone Guillaumin (2016): *modelos matemáticos, datos observacionales y principios físicos*. Por *modelos matemáticos* me referiré a descripciones matemáticas, abstractas e interpretativas que permiten calcular y concebir el comportamiento de parámetros asociados con fenómenos, en este caso, de sistemas de geometría euclidiana y no euclidiana (cfr. Guillaumin, 2016: 69-73). Por *datos* me referiré a “observaciones, registros documentales de observaciones, mediciones directas realizadas con instrumentos, registros de tales observaciones etc.” (Guillaumin, 2016: 67). Finalmente, los *principios físicos* consisten en enunciados que “se refieren *de manera altamente abstracta, idealizada y/o general* a objetos físicos, sus propiedades y/o sus relaciones con otros objetos” (Guillaumin, 2016: 64, énfasis en el original). Por ejemplo, me referiré a enunciados tales como “la luz se compone de partículas” o “existe un éter mecánico en el que se propagan las ondas de luz” como *principios físicos*.

Comenzaré con una breve reconstrucción histórica de los *modelos matemáticos*, es decir, del surgimiento de las geometrías no euclidianas y expondré la posición de Poincaré acerca de ellas. Luego, muestro el proceso histórico por el cual las *prácticas de medición de distancia y tiempo generaron datos* que llevaron a Einstein a formular nuevos *principios físicos* acerca del espacio y del tiempo, señalaré cómo éstos mostraron la necesidad de utilizar nuevos modelos, es decir, geometrías no euclidianas en la relatividad general. Después, compararé las

1 Es decir, el análisis de las prácticas de medición permiten identificar los motivos y estrategias para alcanzar las metas de dichas prácticas.

posturas de Einstein y Poincaré respecto de la geometría y la medición. En las conclusiones responderé a las preguntas planteadas y señalaré por qué este estudio de caso sugiere la necesidad de replantear el debate en torno a tesis filosóficas que pretenden delimitar el conocimiento científico, como el convencionalismo.

## **GEOMETRÍAS NO EUCLIDIANAS Y LA POSICIÓN DE POINCARÉ.**

### **LA MEDICIÓN DEL TIEMPO, DEL ESPACIO Y EL CONVENCIONALISMO EN GEOMETRÍA**

Desde la antigüedad, el estudio de la geometría estuvo relacionado con la medición de distancias. Para que dicho estudio se desarrollara fueron necesarios tanto logros técnicos y materiales, como una paulatina y creciente abstracción del concepto de espacio: “To be sure, measurement leads eventually to generalization and ultimately to abstract thinking” (Jammer, 1993: 8). Este proceso tuvo un punto culminante cerca del año 300 a. C., cuando Euclides (325 a. C.-265 a. C.) escribió un tratado de geometría: *Elementos*. Su sistema, hoy conocido como *geometría euclidiana*, resultó ser notablemente exitoso y se convirtió en una de las obras matemáticas más influyentes en la historia del pensamiento. Sin embargo, sólo funcionaba en contextos donde se cumplen los postulados en los que se basaba, los cuales parecen intuitivamente ciertos, excepto el quinto, que tiene la forma de una conclusión más elaborada: “las rectas paralelas no se cruzan”.

Durante mucho tiempo, diversos investigadores intentaron probar el *quinto postulado* a partir de los otros, sin embargo, esto se consideró imposible. Al inicio del siglo XIX, los estudios de Carl Friedrich Gauss (1777-1855),<sup>2</sup> Nikolai I. Lobachevsky (1793-1856) y Janos Bolyai (1802-1860) mostraron la posibilidad de construir sistemas geométricos alternativos al omitir el quinto postulado, derivando teoremas contrarios a los de Euclides, por ejemplo, que los ángulos interiores de un triángulo pueden sumar menos de 180°. Años después, Bernhard Riemann (1826-1866) generalizó la teoría de superficies de Gauss y utilizó el concepto de curvatura para concluir que, tanto la geometría de Euclides, como la de Lobachevsky y Bolyai, eran casos de curvaturas particulares. Posteriormente, se conoció a estos sistemas como *geometrías no euclidianas*. Sin embargo, al inicio

<sup>2</sup> Gauss no publicó estos trabajos en vida, al parecer temía no ser tomado en serio.

no hubo muchas aplicaciones para estas nuevas herramientas en las ciencias naturales. Durante esta época:

In contrast to the amount of publicity they received, applications of non-Euclidean geometry in physics by leading practitioners produced slim theoretical results, the value of which was outstripped by the technical intricacy of the methods deployed to obtain them. (Walter, 1999: 94)

Algunos investigadores debatían las posibles aplicaciones de la geometría no euclidiana, en particular, Poincaré consideraba que éstas pueden usarse en física tanto como la geometría euclidiana. La elección de una geometría, para su aplicación en física, sólo requiere convenciones adecuadas. Esta conclusión era consecuencia de una postura filosófica conocida como *convencionalismo*.

En el ensayo titulado *La mesure du temps* (La medición del tiempo), aparecen expuestos algunos aspectos importantes del convencionalismo. Poincaré indaga cómo determinamos que dos intervalos de tiempo son iguales. En la práctica, utilizamos instrumentos para determinar una duración, por ejemplo, consideramos que dos ciclos de un péndulo definen dos intervalos de tiempo iguales. Sin embargo, el movimiento de péndulos puede ser alterado por factores como el viento o la temperatura. Factores similares afectan a todos los relojes, por lo que, incluso el mejor, debe ser corregido de vez en cuando. Las correcciones son hechas con ayuda de observaciones astronómicas, de manera que la duración de una rotación de la Tierra constituye la unidad de tiempo. No obstante, los astrónomos consideran que la rotación de la Tierra está desacelerando. Poincaré indaga el significado de esta afirmación, pues si la rotación de la Tierra realmente definiera la unidad de medida del tiempo, no tendría sentido decir que ésta es cada vez más lenta. La conclusión de los científicos se debe a que la fricción de las mareas debe producir calor y, por conservación de la energía, la Tierra debe perder velocidad. Además, la desaceleración que la Luna debería presentar, de acuerdo con las leyes de Newton, es menor de la observada. Este aparente desfase también puede explicarse si consideramos que la Tierra se ha desacelerado. En otras palabras, para Poincaré hay dos alternativas para medir el tiempo: considerar que la unidad del tiempo no debe definirse a partir de la rotación de la Tierra o modificar las leyes de la física. La última opción implicaría complicar notablemente dichas leyes. Para Poincaré, los astrónomos definen el tiempo de tal manera que las leyes de

Newton y la conservación de la energía sean formuladas de la manera más *simple* posible. Establecido lo anterior, Poincaré extiende sus comentarios para abarcar el concepto de simultaneidad de eventos: “The simultaneity of two events, [...] are to be so defined that the enunciation of the natural laws may be as *simple* as possible” (Poincaré, 1913: 234, énfasis mío).

Poincaré continuó desarrollando sus ideas acerca de los aspectos convencionales del conocimiento científico en *La science et l'hypothèse* (Ciencia e hipótesis) publicado por primera vez en 1902. Lo más importante para mis propósitos es el análisis que presenta acerca del uso de la geometría en la física. Además de las consideraciones acerca de la medición del tiempo, Poincaré señala que la unidad de medición del espacio también requiere una convención por motivos similares. En otras palabras, para él, como en el caso de la medición del tiempo, era necesario definir los estándares de medición de distancias para que las leyes de la naturaleza tengan la forma más simple posible. El hecho de que sea posible decidir entre definiciones alternativas de estándares implica que la medición no puede ayudarnos a determinar si el espacio en el que vivimos es realmente euclidiano o no. “Experiments only teach us the relations of bodies to one another. They do not and cannot give us the relations of bodies and space, nor the mutual relations of the different parts of space” (Poincaré, 2011: 91). Para argumentar este punto, se pregunta por la naturaleza de los axiomas de la geometría: ¿son intuiciones sintéticas *a priori*, como afirmaba Kant, o son verdades experimentales? En cuanto a la primera opción, Poincaré argumenta que, si éste fuera el caso, sería imposible concebir proposiciones contrarias, es decir, simplemente no podría haber geometrías no euclidianas.

Poincare takes synthetic a priori statements to be necessary, maintaining that we can neither conceive of a negation of a synthetic a priori truth, nor incorporate such a negation consistently into a coherent system of statements. It is this conception of the synthetic a priori that enables Poincare to conclude from the existence of incompatible geometries that neither of them is synthetic a priori. (Ben-Menhahem, 2001: 476)

Por otro lado, la idea de que los axiomas sean verdades experimentales es incorrecta, pues no experimentamos con líneas o círculos ideales, sino con objetos materiales. Sólo se puede considerar que las figuras geométricas se comportan



como sólidos y las rectas como la trayectoria de propagación de la luz. Esto no permitiría considerar a la geometría como el estudio del movimiento de sólidos y de la luz. Además, si la geometría fuera una ciencia experimental, estaría sujeta a revisión, pero no habría forma de probar los errores, porque no existen sólidos completamente rígidos e invariantes. Esto no corresponde con las prácticas matemáticas. Por lo anterior, Poincaré concluye que los axiomas de la geometría no son intuiciones sintéticas *a priori* ni hechos experimentales, sino convenciones. Aunque reconoce que escogemos determinada convención sobre otra guiándonos con hechos experimentales, la elección es libre y su único límite es la necesidad de evitar la contradicción: “One geometry cannot be more true than another; it can only be more convenient. Now, Euclidean geometry is, and will remain, the most convenient” (2011: 59). La manera particular, en que se mueven los cuerpos sólidos y la luz, puede ser atribuida tanto a la geometría del espacio como a las leyes naturales. Para Poincaré, no hay manera de saber si los fenómenos percibidos se deben a las características del espacio o a las leyes de la naturaleza. Por lo tanto, sólo es posible decidir por medio de una convención que permita la descripción más simple de los fenómenos naturales.

I may conclude that no experiment will ever be in contradiction with Euclid's postulate; but, on the other hand, no experiment will ever be in contradiction with Lobatschewsky's postulate.

But it is not sufficient that the Euclidean (or non-Euclidean) geometry can ever be directly contradicted by experiment. Nor could it happen that it can only agree with experiment by a violation of the principle of sufficient reason, and of that of the relativity of space. (Poincaré, 2011: 86-87)

Esto es así porque, sea cual sea la geometría que utilicemos, el estado de los cuerpos y sus mutuas distancias no dependen de distancias absolutas iniciales ni de una orientación absoluta. “Further, as both Grünbaum and Zahar point out, the interconnections involve circularity: while geometry is articulated against a background of physical theory, physical theory, in turn, is articulated against a geometric background” (Ben-Menahem, 2001: 486).

Al final, la elección de una geometría u otra sólo puede hacerse por convención: “The freedom we enjoy in adopting a particular geometry makes geometry conventional, but non-arbitrary: a reasonable choice of convention is

informed by both experience and methodological values” (Ben-Menahem, 2001: 492). El valor metodológico que Poincaré señala como clave para escoger entre posibles convenciones es la *simplicidad*. Este concepto puede ser ambiguo en muchos contextos y, al respecto, Poincaré sólo comenta que la geometría euclidiana “is the simplest in itself, just as a polynomial of the first degree is simpler than a polynomial of the second degree” (2011: 59). Es decir, parece que la simplicidad está relacionada con la eficiencia en el uso de las matemáticas para procesar información. De cualquier manera, Poincaré consideraba que la geometría euclidiana era la más simple y, ya que ningún experimento puede contradecirla, nunca podría ser remplazada.

## **EINSTEIN: LOS PRINCIPIOS FÍSICOS, LA ELECCIÓN DE ECUACIONES DE CAMPO Y LAS PREDICIONES ACERTADAS RELACIONADAS CON LA ÓRBITA DE MERCURIO Y EL ECLIPSE DE 1919**

### ***La relatividad especial***

Como mencioné, algunas de las reflexiones de Poincaré se relacionaban con las dificultades presentadas durante el siglo XIX al buscar un patrón adecuado para medir el tiempo. En parte, sus reflexiones acerca de la geometría parecen motivadas porque, durante la misma época, también había controversias en los estándares para medir distancias. En particular, el metro patrón fue definido como la proporción entre la distancia que designa y otras magnitudes astronómicas; sin embargo, había motivos para dudar de que la proporción hubiera sido establecida correctamente. Por ejemplo, los resultados de uno de los grandes logros experimentales de la época (la medición terrestre de la velocidad de la luz) producían valores que no coincidían con las mediciones astronómicas.

Michelson created his famous Michelson-Morley experiment as part of his efforts to obtain a better standard for measuring time and length that both physicists and astronomers could use. What did Michelson find from his work with Morley? Nothing. Did he find what caused the difference between the values found by astronomers and those preferred by physicists? No. (Canales, 2015: 108)

A pesar del impresionante logro técnico que supuso, los experimentos de Albert A. Michelson no resolvieron este tipo de controversias, pero parecían

mostrar que la velocidad de la luz era constante en el vacío. Es decir, mientras se producían dudas sobre el metro y otras unidades físicas, como posible explicación de las discrepancias, se ganaba confianza acerca de la constancia de la velocidad de la luz. Debido a esto, muchos propusieron usar la velocidad de la luz para redefinir la longitud del metro en términos de longitudes de onda. De la misma manera podía usarse la frecuencia de onda para redefinir la medición del tiempo. Utilizando la frecuencia de la luz, los científicos podían obtener mejores estándares de medición tanto para la distancia y el tiempo: “The idea of using light waves as standards had been seriously considered by the eminent physicist James Clerk Maxwell, known as one of the founders of electromagnetism” (Canales, 2015: 105). Sin embargo, para utilizar la velocidad de la luz como estándar de medición era necesario aclarar si el *éter*, el cual se pensaba que llena el espacio, podía introducir alteraciones y de qué manera. Además, el principio físico del *éter* causaba controversia, pues se había establecido que la luz es una onda electromagnética, y este principio debía mediar sus interacciones.<sup>3</sup>

En 1905, Albert Einstein publicó el famoso artículo donde propone la *relatividad especial*. El artículo, “Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento”, revisa la manera de entender el espacio y el tiempo a partir de la constancia de la velocidad de la luz, además haciendo innecesario al *éter*. Para hacer esto, Einstein tomó dos *principios físicos* que consideraba apoyados por observaciones y experimentos relacionados con la velocidad de la luz que se habían producido en ese momento. El primero era el *principio de la velocidad de la luz*, el cual expresaba que ésta es independiente de la fuente que la produce y de la dirección en la que se propaga.<sup>4</sup> El segundo principio era el de *relatividad*, el cual postulaba que las leyes de la física son las mismas para todos los marcos de referencia inerciales.

3 Einstein consideraba que el *éter* era problemático para la electrodinámica de la época, véase Hon y Goldstein, 2005.

4 Este principio se suele formular como si afirmara que la velocidad de la luz es la misma para los observadores independientemente de sus velocidades inerciales. Para Harvey Brown (2005: 76), Einstein postulaba que sólo existe un marco de referencia donde la velocidad de la luz es independiente de la fuente y la dirección en que se propaga. La combinación del último enunciado con el postulado de relatividad permite concluir que la velocidad de la luz debe ser la misma para todos los marcos de referencia inerciales.

Estos principios eran consecuencia de los fracasos por intentar detectar el movimiento de la Tierra en el éter a través de variaciones de la velocidad de la luz.<sup>5</sup> Los científicos de la época no habían considerado esta conclusión porque parecía inconsistente. Si las leyes de la física, en particular de la óptica, son las mismas para todos los marcos de referencia inerciales, ¿cómo podrían dos observadores en movimiento, uno respecto al otro, medir el mismo valor para la velocidad de la luz? Por ejemplo, si camino en una dirección y veo un auto moverse en la misma dirección, el movimiento del auto será más lento juzgado por mí que por una persona quieta a mitad de la calle. Sin embargo, los dos postulados de Einstein implican que se mide el mismo valor para la velocidad de la luz independientemente de cómo se muevan los observadores. En las investigaciones experimentales no parecían haber variaciones en la velocidad de la luz, por lo que los datos apoyan los principios físicos de Einstein: el principio de la relatividad y el principio de la velocidad de la luz. Esto no evita que las conclusiones parezcan contradictorias:

Naturalmente, hoy nadie ignora que todos los intentos de aclarar satisfactoriamente esa paradoja estaban condenados al fracaso mientras el axioma del carácter absoluto del tiempo, o de la simultaneidad, siguiera anclado inadvertidamente en el inconsciente. (Einstein, 2003: 57)

Einstein resuelve la inconsistencia entre el principio de relatividad y de la constancia de la velocidad de la luz redefiniendo la simultaneidad de eventos y, en consecuencia, los conceptos de distancia y tiempo en diferentes marcos de referencia inerciales. Esta redefinición considera una sincronización de relojes a partir de señales de luz.

5 Uno de estos intentos fallidos por detectar cambios en la velocidad de la luz es el de Michelson y Morley, pero como Holton (1969) argumenta, Einstein supo de él después de escribir su artículo, es más probable que pensara en las observaciones de la aberración estelar del siglo XVIII y los experimentos de Fizeau de mediados del siglo XIX. Una investigación acerca de los experimentos a los que probablemente se refiere Einstein es Norton, 2004.

Supongamos que una señal de luz parte de A hacia B en el ‘tiempo A’  $t_A$ , llega a B y se refleja de regreso hacia A en el ‘tiempo B’  $t_B$  y finalmente arriba al punto A en el ‘tiempo A’  $t'_A$ . De acuerdo a la definición, los dos relojes estarían sincronizados si:  $t_B - t_A = t'_A - t_B$ . (Einstein, 2005: 3)

Una consecuencia de esta definición es que la medición del espacio y del tiempo puede cambiar dependiendo del marco de referencia inercial considerado. Los cambios se producen de tal manera que, sin importar la velocidad de un observador, éste siempre mide el mismo valor para la velocidad de la luz. Esto, tendría como consecuencia que dos eventos podrían ser simultáneos para un observador, pero no para otro debido a los cambios en el tiempo que cada uno mide. La novedad consiste en que *el espacio y el tiempo ya no son consideradas cualidades, sino relaciones definidas a partir de operaciones de medición.*

Esto no significa que los conceptos de espacio y tiempo puedan ser agotados por las operaciones de medición, sino que esas operaciones permitían caracterizar sus aspectos relevantes para la discusión de fenómenos físicos. Dicha caracterización fue necesaria para hacer inteligible la interpretación de datos acerca de la óptica y la electrodinámica relacionados con marcos de referencia en movimiento. Sin embargo, Harvey Brown (2005) cuestiona que los efectos de la relatividad, como la contracción de distancias y tiempos, se puedan atribuir al espacio-tiempo y no a propiedades de la materia. Es decir, los efectos relativistas podrían explicarse porque las leyes de la dinámica, que rigen los cuerpos materiales, son consistentes con los principios de relatividad y de constancia de la velocidad de la luz. De acuerdo con Brown, esos efectos no necesariamente se explican a partir de consideraciones acerca de la estructura del espacio. Respecto de este debate concuerdo con Wesley Von Camp (2011), para quien, señalar si la estructura del espacio explica que las leyes de la dinámica sean consistentes con los efectos relativistas, o si es al revés, hace que perdamos de vista el papel que juegan los principios de Einstein, los cuales proporcionan una definición clara y significativa del concepto de simultaneidad, algo no disponible en la física newtoniana: “These concepts serve as defining principles that can impose meaning on the concept of an inertial frame” (Camp, 2011: 1105). En resumen, se puede dar una explicación de los fenómenos a partir de las leyes de la dinámica, pero hacerlo desde la estructura del espacio era necesario en el contexto de Einstein para clarificar conceptos como el de simultaneidad.

## ***El principio de equivalencia, la paradoja de Ehrenfest y la insuficiencia de la geometría euclidiana***

Después de sentar las bases de la relatividad especial, Einstein exploró algunas de sus implicaciones en “On the relativity principle and the conclusions drawn from it”. En este artículo, considera las condiciones en las cuales un sistema sometido a gravitación y otro a aceleración serían equivalentes, es decir, las condiciones en las que las leyes físicas no permitirían distinguir entre ambos. Esto sucedería si consideramos un sistema sometido a una aceleración constante  $\gamma$  y otro en reposo, pero sometido a un campo gravitacional que acelera a los objetos en caída con una magnitud  $-\gamma$ . Una manera de ver esta equivalencia es considerar una persona dentro de una cámara cerrada, la cual se encuentra en caída libre. La persona no podría saber si en efecto está en caída libre o flotando en un estado libre de gravedad. En ambos casos podría flotar igualmente dentro de la cámara. Por otro lado, si la cámara estuviera en reposo, pero sometida a gravitación, el observador tampoco podría distinguir si realmente está en reposo dentro de un campo gravitacional o está siendo acelerada hacia arriba sin que exista ningún campo gravitacional. En ambos casos se sentiría atraído hacia el suelo. A esta similitud entre un sistema acelerado y uno sometido a gravitación se le conoció como *principio de equivalencia*, al cual Einstein se refirió como la idea más feliz de su vida, pues tuvo una importante función heurística en la investigación de los años siguientes. En particular, permitió analizar el movimiento de objetos en sistemas acelerados, como los de rotación, y trasladar las conclusiones a casos, aparentemente, más misteriosos como los de la gravedad.

Esto ocurría en 1908. ¿Por qué hicieron falta otros siete años para establecer la teoría general de la relatividad? El motivo principal radica en que no es tan fácil liberarse de la idea de que las coordenadas deben poseer un significado *métrico* inmediato. (Einstein, 2003: 68, énfasis mío)

En física, las coordenadas permiten identificar la posición y el movimiento de un objeto, pero dicha posición sólo puede obtenerse por medio de mediciones que, ahora, debían considerar la relatividad especial. En otras palabras, después de 1905, la relación entre coordenadas (geometría) y mediciones comenzaba a mostrarse poco clara. Por ejemplo, era difícil conservar el principio enunciado por Galileo referente a que todos los cuerpos soltados desde la misma altura

llegan al suelo con igual velocidad. Para explicar este punto, Jürgen Renn (2007) propone el siguiente ejemplo: considérense dos objetos A y B que se dejan caer desde la misma altura, exactamente al mismo tiempo en un campo gravitacional, pero B lleva una velocidad horizontal además de la aceleración vertical que sufre debido a la gravedad. De acuerdo con la física clásica, ambos cuerpos deben tocar el suelo de manera simultánea, tanto si esto es juzgado por un observador que se mueve en dirección horizontal con la misma velocidad que B, como si permanece con una velocidad horizontal nula respecto de A. Sin embargo, en la relatividad especial eventos simultáneos en un marco de referencia no son simultáneos en otro. “Galileo’s principle, according to which all bodies fall with the same acceleration, can hence not be valid in both frames of references; it hence cannot be valid at all” (Renn, 2007: 55). Si esto fuera poco, la misma relatividad especial, que no permite que algo viaje más rápido que la luz, parece difícil de conciliar con una instantánea acción a distancia, como la fuerza de gravedad newtoniana, incorporando el principio de equivalencia.<sup>6</sup>

Los efectos que la relatividad especial implicaba para un disco rotando a gran velocidad le mostraron a Einstein el camino a seguir. Este caso fue analizado por Paul Ehrenfest (en 1909) y llegó a una conclusión posteriormente conocida como *paradoja de Ehrenfest*. En escritos ulteriores (como en *The Meaning of Relativity*, 1970: 34-35), Einstein menciona la paradoja de Ehrenfest en el contexto de su interpretación del principio de equivalencia. La cuestión es la siguiente: considérese un disco de un material rígido<sup>7</sup> en el que colocamos un gran número de pequeñas reglas rígidas a lo largo de la circunferencia y otras a lo largo del diámetro del disco con el fin de medir ambos. Si  $U$  es el número de reglas que caben en la circunferencia y  $D$  el número que caben en el diámetro, entonces la proporción  $U/D$  debe ser  $\pi$  ( $\pi=3.1415\dots$ ). Si hacemos que el disco rote a gran

6 Lo difícil no era el hecho de incorporar la fuerza de gravedad en la relatividad especial por sí sólo, había varias maneras de hacerlo. Un ejemplo se encuentra en Poincaré, 2007. Lo difícil era hacer esto incorporando el principio de equivalencia.

7 En física un cuerpo rígido es un objeto ideal que no sufre deformaciones, es decir, cuyas moléculas mantienen sus posiciones relativas.

velocidad, de acuerdo con la relatividad especial, las reglas en la circunferencia sufrirán una contracción de su longitud en la dirección de su movimiento, medidas con respecto a un observador en reposo (contracción de Lorentz). Pero las reglas que se encuentran a lo largo del diámetro del disco no se han contraído a lo largo, puesto que no hay movimiento en la dirección del diámetro, sólo en dirección perpendicular. Así, se sigue que ahora la proporción  $U/D$ , medidas desde un marco de referencia en reposo, tendrá un valor distinto de  $\pi$ . *Esto no ocurre en geometría euclidiana.*

Una conclusión similar se puede deducir para el tiempo. Se puede colocar un reloj en la periferia del disco rotante y uno en el centro. De nuevo, para un observador en reposo, fuera del disco, el reloj en la periferia medirá que el tiempo transcurre más lentamente que el reloj en el centro. Lo mismo debe suceder si se juzga por un observador situado en el centro del disco. Ahora, por el principio de equivalencia, los mismos efectos para las mediciones de distancias y tiempos que ocurren en el disco rotante, también lo harán en campos gravitacionales.

We therefore arrive at the result: the gravitational field influences and even determines the metrical laws of the space-time continuum. If the laws of configuration of ideal rigid bodies are to be expressed geometrically, then in the presence of a gravitational field the *geometry is not Euclidean*. (Einstein, 1970: 34, énfasis mío)

En otras palabras, el caso del disco rotante mostró a Einstein que los viejos modelos matemáticos eran demasiado limitados para capturar su nueva noción de espacio-tiempo.

### ***La aplicación de la geometría no euclidiana en las ecuaciones de campo de la relatividad general***

A pesar de que la geometría euclidiana no parecía completamente satisfactoria para el estudio de fenómenos gravitacionales, Einstein tardó en abandonarla. Al parecer, no estaba seguro de cómo proceder:

Describing the physical laws without reference to geometry is similar to describing our thought without words [...] This problem was unsolved until 1912, when I hit



upon the idea that the surface theory of Karl Friedrich Gauss might be the key to this mystery. (Einstein, 1982: 47)

Einstein tenía pocos conocimientos sobre geometrías no euclidianas antes de 1912. No muchos físicos estaban familiarizados con este tipo de conocimientos, pero la situación era diferente entre matemáticos: “by the first years of the twentieth century, non-Euclidean geometry had found a respectable place in the mathematics curriculum of several German universities” (Walter, 1999: 94). A partir de 1912, Einstein comenzó su colaboración con un antiguo compañero de clase y, para entonces, profesor de matemáticas, Marcel Grossmann (1878-1936). Ambos trabajaron juntos en el desarrollo de la relatividad general hasta 1914. En noviembre de 1915, Einstein presentaría su solución final: las ecuaciones de campo gravitacional.

La investigación de Einstein se desarrolló utilizando cuatro principios físicos que había identificado para 1912: **i) el principio de equivalencia** identificado desde 1907, **ii) el principio de relatividad generalizado**,<sup>8</sup> **iii)** Einstein esperaba que sus conclusiones no violaran principios de *conservación de energía y momento*, y **iv) el principio de correspondencia** (ya que la gravitación newtoniana da cuenta de la mayor parte de los movimientos de los cuerpos celestes, una nueva explicación de la gravedad debía corresponder, al menos aproximadamente, con los resultados de la gravitación newtoniana). Estos principios podían funcionar, alternativamente, como bloques constitutivos y como criterios para aceptar o rechazar posibles soluciones.

La meta consistía en buscar un modelo matemático que capturara adecuadamente los cuatro principios, para esto, Einstein exploró dos procedimientos: “Two strategies can be discerned in this search. We have labeled them the ‘mathematical strategy’ and the ‘physical strategy’” (Janssen, Norton, Renn, Sauer y Stachel, 2007: 10). En particular, Jürgen Renn y Tilman Sauer (2007:

**8** Einstein buscaba que las leyes de la física no distinguieran sistemas acelerados e inerciales. Si se cumplía este requisito se cumpliría automáticamente el anterior. Aunque la relatividad generalizada jugaría un importante papel heurístico, al final, Einstein sólo lograría cumplir satisfactoriamente con el anterior.

151-152) las describen del siguiente modo: la *estrategia física* comenzaría con la física clásica, seleccionando ecuaciones de campo que rescataran el límite newtoniano, es decir, que en una primera aproximación llevaran a los mismos resultados de la física clásica, pues la estrategia consiste en partir de la física conocida, el segundo paso sería revisar que las ecuaciones seleccionadas no violaran principios de conservación. Esto podría sugerir modificaciones o comenzar de nuevo. Finalmente, si se encontraban algunas ecuaciones de campo que superaran estas pruebas, debía explorarse en qué casos cumplen el principio de relatividad generalizado, esto es, determinar bajo qué transformaciones de coordenadas las ecuaciones retienen su forma matemática. Si dichas ecuaciones no cumplían con el principio de relatividad generalizado en todos los casos, se esperaba que, al menos, cumplieran con el principio de equivalencia. En otras palabras, el requisito mínimo era que las ecuaciones mantuvieran su forma matemática al transformar coordenadas de algunos sistemas acelerados a otros.

Otra forma de proceder sería la *estrategia matemática*, la cual comienza a la inversa de la anterior. Se debía seleccionar ecuaciones covariantes (que mantuvieran sus propiedades bajo transformaciones de coordenadas). Los estudios previos que otros matemáticos habían llevado a cabo en geometrías no euclidianas podían ofrecer ejemplos. Sin embargo, se debía determinar el significado físico que dichas ecuaciones pudieran tener. Para ello, habría que revisar la posibilidad de recuperar el límite newtoniano: “The two strategies did not act as an algorithm for producing solutions but rather as different channels for filling the Lorentz model with concrete mathematical and physical content” (Renn y Sauer, 2007: 153).

El primer resultado relevante de esta búsqueda fueron las ecuaciones de campo presentadas en un artículo titulado “Outline of a generalized theory of relativity and of a theory of gravitation”: “The Einstein-Grossmann paper, published in 1913, *contains profound physical insight into the nature of measurement*, some correct general relativistic equations, some faulty reasoning, and clumsy notation” (Pais, 2005: 216, énfasis mío). Pero las ecuaciones presentadas por Einstein y Grossmann en este artículo no satisfacían los requisitos i) y ii). Janssen y Renn (2007) afirman que la *estrategia física* llevó a Einstein a presentar una solución más satisfactoria en 1915. Como esta estrategia partía de los principios de correspondencia, ya no había duda de que las ecuaciones sí cumplían este requisito heurístico de Einstein. Dichas ecuaciones utilizaban objetos matemáticos

## MIGUEL AGUSTÍN AGUILAR SANDOVAL

conocidos como *tensores*, los cuales permiten representar cantidades físicas independientemente del sistema de coordenadas que se utilice. La representación matemática utilizada para la relatividad general fue la siguiente:

$$R_{\mu\nu} = -kT_{\mu\nu}$$

El lado izquierdo es el famoso tensor de Ricci, el lado derecho muestra una constante  $k$  y  $T$  el tensor de energía-momento. El tensor de Ricci es una contracción del tensor de curvatura de Riemann. Dicho tensor representa la geometría del espacio-tiempo, es decir, expresa cuánto difiere el espacio que se estudia de uno euclidiano. Mientras tanto, el tensor de energía-momento expresa la distribución de energía. Además, Einstein (1987c) introdujo una modificación que no cambiaba el desarrollo matemático, pero permitía incorporar el principio de conservación de energía y momento:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} Rg_{\mu\nu} = -kT_{\mu\nu}$$

Al lado izquierdo de la ecuación se le conoce como tensor de Einstein. Estas ecuaciones mantienen su forma bajo cambios de coordenadas en general e implican el principio de conservación sin hipótesis adicionales.<sup>9</sup> Pero “What seems to have catalyzed this realization was his calculation of the orbit of Mercury” (Norton, 1984: 310). La solución al movimiento de Mercurio, sin necesidad de hipótesis adicionales, reforzó la confianza de Einstein en sus nuevas conclusiones: “This discovery was, I believe, by far the strongest emotional experience in Einstein’s scientific life, perhaps in all his life” (Pais, 2005: 253). Pocos años después, la corroboración de que la trayectoria de la luz era afectada por campos gravitacionales se presentó gracias a las observaciones astronómicas del eclipse de 1919, llevadas a cabo por Arthur Stanley Eddington (1882-1944). Este resultado permitió

9 Quizá lo único que no hace completamente satisfactoria esta solución, desde el punto de vista de las expectativas de Einstein, es que, aunque elimina localmente la distinción entre sistemas de referencia acelerados reivindicando el principio de equivalencia, no elimina la distinción entre sistemas inerciales y acelerados.

establecer a la relatividad general como una explicación exitosa de la gravedad y convirtió a Einstein en el primer científico mundialmente famoso.

## **COMPARACIÓN DE LAS VÍAS DE DECISIÓN SEGUIDAS POR POINCARÉ Y EINSTEIN**

Un punto central, en esta reconstrucción, ha sido la coordinación entre los conceptos de espacio y tiempo con procesos de medición. Poincaré se daba cuenta de la flexibilidad de la práctica científica para coordinar conceptos y mediciones. La experiencia que tenemos del espacio y del movimiento puede ser explicada tanto por la geometría euclidiana como por una no euclidiana. Esto es posible si modificamos nuestro entendimiento de las leyes físicas. Tal posibilidad permite a Poincaré concluir que sólo por convención, motivada por la búsqueda de simplicidad matemática, se escoge entre una concepción del espacio euclidiana y una no euclidiana.

Sin embargo, el proceso que llevó al uso de las geometrías no euclidianas en la relatividad general es más complejo de lo que Poincaré vislumbró. Los datos obtenidos por observación y experimentación apoyaron determinados principios físicos, como el de relatividad o el de la velocidad de la luz. Einstein pudo resolver las aparentes tensiones entre dichos principios redefiniendo los conceptos de espacio y tiempo a través de operaciones de medición. Esto constituye, a su vez, un nuevo principio físico, cuya aplicación al caso del disco rotante, junto con el principio de equivalencia, muestra que la geometría no puede ser euclidiana (paradoja de Ehrenfest). Como señala Michel Friedman (2014), el uso del principio de equivalencia permite a Einstein establecer la coordinación entre conceptos y mediciones. En otras palabras, *los principios físicos de Einstein permiten determinar, de manera unívoca, la estructura geométrica del espacio*. El resultado queda expresado en las ecuaciones de campo de la relatividad general. Finalmente, la relatividad general es aceptada por predecir de manera acertada nuevos datos: los del corrimiento del perihelio de mercurio y los efectos de distorsión de la luz a través de campos gravitacionales (observaciones del eclipse de 1919). En otras palabras, contrario a las conclusiones de Poincaré, Einstein sigue una vía de decisión que no está determinada por la relación directa entre datos y modelos matemáticos. Los principios físicos de Einstein permiten determinar la estructura geométrica del espacio. Poincaré correctamente señala que los datos de las mediciones pueden hacerse coordinar con distintas estructuras geométricas ajustando principios

físicos de manera acorde. Por su parte, Einstein usa los datos para apoyar principios físicos que permiten determinar de manera unívoca la estructura geométrica del espacio.

Esto no significa que Einstein defendiera un realismo fuerte, como señala Don Howard (1984 y 1993), sostuvo una postura cercana al convencionalismo: “the Einstein-Schlick correspondence shows Einstein to have been as much a conventionalist as a realist. That is not to say that Einstein was not a realist” (Howard, 1984: 616). Se puede decir que Einstein estaba de acuerdo, hasta cierto punto, con Poincaré. Como mencioné en la sección anterior, fue necesaria la aplicación del principio de equivalencia al estudio del movimiento de cuerpos rígidos (como el disco rotante) para determinar la geometría del espacio. Un cuerpo rígido no sufre deformaciones, es decir, sus moléculas mantienen sus posiciones relativas. Sin embargo, la aparente deformación de un cuerpo en movimiento puede atribuirse tanto a que éste es afectado por alguna fuerza como a que se mueve en un espacio no-euclidiano. Estos dos casos serían indistinguibles si consideramos que la fuerza del primer caso afecta a todos los cuerpos por igual, lo que Hans Reichenbach (1957: 13) llamó fuerzas universales (*universal forces*). Es decir, la noción de tamaño requiere una noción de geometría. Debido a lo anterior, Einstein reconoce que:

Sub specie aeterni Poincaré, in my opinion, is right... But it is my conviction that in the present stage of development of theoretical physics these concepts [como el de cuerpo rígido] must still be employed as independent concepts. (2002: 212-213)

Einstein consideraba que, si bien hay maneras de hacer que los datos de las mediciones sean compatibles con cualquier estructura geométrica, podemos utilizar los conceptos y principios físicos que permitan determinar, de manera unívoca, el uso de la geometría. El desarrollo de la práctica científica no consiste sólo en establecer una relación directa entre evidencia y teoría. El reconocimiento de esto distingue a Einstein de Poincaré y otros filósofos como Erns Mach: “Mach’s system studies the relations existing between the facts of experience; the ensemble of these relations, for Mach, is science. This is a false standpoint here” (Einstein, 2012: 130-131). En otras palabras, la relación directa entre conceptos y

datos no es todo lo que entra en juego. Tampoco la mera simplicidad matemática permite escoger el uso de componentes aparentemente subdeterminados por los datos, sino un proceso progresivo de integración.

Algunos componentes de la práctica científica se generan para permitir dicha integración. Nos aproximamos a la experiencia con conceptos, herramientas cognitivas e instrumentos coordinados de una cierta manera. Pero, al igual que el tiempo definido a partir del reloj sideral (o el metro a partir de la circunferencia de la Tierra), la aplicación de estos elementos, eventualmente, muestra sus límites. La búsqueda de modificaciones que permitan superar estas limitaciones lleva a sustituir algunos componentes de la práctica científica por otros. Cuando los datos no permiten determinar, de manera directa, la reestructuración de otros elementos, algunos principios físicos pueden ser preferibles a otros para hacer posible dicha reestructuración, como el uso de la geometría. Como ya han señalado otros estudios de la medición:

[...] coordination succeeds because it increases coherence among elements of theory and instrumentation [...] It is only when one adopts a foundationalist view and attempts to find a starting point for coordination free of presupposition that this historical process erroneously appears to lack epistemic justification [...] Contrary to conventionalists, the new studies take a practice-oriented approach to the problem of coordination and highlight the empirical constraints that inform historical choices of measurement standards. (Tal, 2013: 1162)

En este caso, Poincaré concluye correctamente que, a partir de datos empíricos, se puede modificar la geometría utilizada o las leyes físicas, pero se equivoca al considerar que la única vía de solución posible es establecer la convención que permita la descripción más simple. Las prácticas de medición se desarrollan mediante un proceso histórico que genera criterios de decisión. Einstein recurre a las geometrías no euclidianas que, aunque no son más simples, son coherentes con principios físicos apoyados en resultados de mediciones previas. No hay una base fundacional para este razonamiento, sino un proceso de corrección mutua entre los distintos elementos que componen la práctica científica.

## CONCLUSIONES

Las preguntas que guiaron esta investigación fueron: *¿qué consideraciones acerca de la medición llevaron a Poincaré a concluir que no había manera de determinar la geometría del espacio físico y que el uso de una geometría euclidiana o no euclidiana, en física, sólo podía establecerse por convención?, ¿qué mecanismos le permitieron a Einstein determinar que era necesario utilizar geometrías no euclidianas, a pesar de que Poincaré había argumentado que esto nunca resultaría adecuado?, y ¿qué implicaciones tiene el estudio de las prácticas de medición, en este caso, para tesis filosóficas, como el convencionalismo, que parecen delimitar el alcance del conocimiento científico?*

En cuanto a la primera pregunta, para Poincaré *los datos que pueden proveer los instrumentos de medición no determinan, directamente, la geometría del espacio*. Los datos pueden concordar tanto con un modelo cognitivo basado en geometría euclidiana, como con uno no euclidiano, si los principios físicos se modifican adecuadamente. Por lo tanto, Poincaré considera que sólo la simplicidad permite convenir en el uso de un sistema de geometría particular, de la geometría euclidiana.

La respuesta a la segunda pregunta muestra que las conclusiones de Poincaré son sólo en parte correctas, pues *los datos, aunque no determinan directamente la geometría del espacio, sí permiten corregir los principios físicos de las prácticas de medición*. Estos principios físicos pueden determinar la manera en que se utilizan los sistemas de geometría. Este proceso queda establecido o atrincherado al producir predicciones acertadas de fenómenos antes inexplicables (corrimiento del perihelio de mercurio) o desconocidos (desviación de la luz debido a campos gravitacionales).

Finalmente, en cuanto a la tercera pregunta, el análisis de las prácticas de medición permite identificar algunas vías de decisión que los científicos han utilizado en su desarrollo. Esto es posible si el análisis de las prácticas de medición se hace mediante categorías que evidencien la dinámica entre los componentes de dichas prácticas y no se limiten a la relación directa entre datos y enunciados. No identificar correctamente esta dinámica puede ser lo que ha motivado tesis filosóficas como el convencionalismo. En particular, la posibilidad de seguir una vía, como la de Einstein, no fue considerada por Poincaré al formular su convencionalismo. Quizá algo similar se pueda decir de la tesis de la subdeterminación. En general, *es necesario identificar los mecanismos de decisión con los que operan las prácticas científicas antes de formular juicios filosóficos acerca de los alcances o límites del conocimiento científico*.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Ben-Menahem, Yemina (2001), "Convention: Poincaré and some of his critics", *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 52, núm. 3, pp. 471-513.
- Brown, Harvey R. (2005), *Physical Relativity. Space-Time Structure from a Dynamical Perspective*, Oxford, UK, Oxford University Press.
- Camp, Wesley Van (2011), "On kinematic versus dynamic approaches to special relativity", *Philosophy of Science*, vol. 78, núm. 5, pp. 1097-1107.
- Canales, Jimena (2015), *The Physicist & the Philosopher. Einstein, Bergson, and the Debate that Changed our Understanding of Time*, Nueva Jersey, Princeton University Press.
- Canales, Jimena (2009), *A Tenth of a Second: A History*, Chicago, The University of Chicago Press.
- Chang, Hasok (2012), *Is Water H<sub>2</sub>O? Evidence, Realism and Pluralism*, Nueva York, Springer Netherlands.
- Chang, Hasok (2004), *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress (Oxford Studies in Philosophy of Science)*, Nueva York, Oxford University Press.
- Einstein, Albert (2012 [c. 1922]), "The theory of relativity. Discussion remarks at a meeting of the Société Française de Philosophie", en *The Collected Papers of Albert Einstein (English Translation Supplement)*, vol. 13, doc. 131, Princeton, Princeton University Press, pp. 129-131.
- Einstein, Albert (2005 [c. 1905]), "Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento", pp. 1-30, en [[https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/jcuevas/Teaching/articulo-original.pdf](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jcuevas/Teaching/articulo-original.pdf)], fecha de consulta: 27 de febrero de 2015
- Einstein, Albert (2003 [c. 1949]), *Notas autobiográficas*, Madrid, Alianza Editorial.
- Einstein, Albert, (2002 [c. 1921]). "Geometry and experience", en *The Collected Papers of Albert Einstein (English Translation Supplement)*, vol. 7, doc. 52, Princeton, Princeton University Press, pp. 208-222.
- Einstein, Albert (1987a [c. 1915]), "On the General Theory of Relativity", en *The Collected Papers of Albert Einstein (English Translation Supplement)*, vol. 6, doc. 21, Princeton University Press, pp. 98-107.
- Einstein, Albert (1987b [c. 1915]), "Explanation of the perihelion motion of mercury from the General Theory of Relativity", en *The Collected Papers of Albert Einstein (English Translation Supplement)*, vol. 6, doc. 24, Princeton University Press, pp. 112-116.



- Einstein, Albert (1987c [c. 1915]), “The field equation of gravitation”, en *The Collected Papers of Albert Einstein (English Translation Supplement)*, vol. 6, doc. 25, Princeton, Princeton University Press, pp. 117-120.
- Einstein, Albert (1987d [c. 1915]), “On the special and the General Theory of Relativity (A popular account)”, en *The Collected Papers of Albert Einstein (English Translation Supplement)*, vol. 6, doc. 42, Princeton University Press, pp. 247-420.
- Einstein, Albert (1987e [c. 1913]), “Outline of a generalized Theory of Relativity and of a Theory of Gravitation”, en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English Translation Supplement)*, vol. 4, doc. 13, Princeton University Press, pp.151-188.
- Einstein, Albert (1987f [c. 1907]), “On the relativity principle and the conclusions drawn from it”, en *The Collected Papers of Albert Einstein. (English Translation Supplement)*, vol. 2, doc. 47, Princeton University Press, pp. 252-311.
- Einstein, Albert (1982 [c. 1922]), “How I created the theory of relativity?”, *Physics today*, vol. 35, núm. 8, pp. 45-47.
- Einstein, Albert (1970 [c. 1922]), *The Meaning of Relativity*, Princeton, Princeton University Press.
- Friedman, Michel (2014), “Space, time, and geometry”, en Michel Janssen y Christoph Lehner (eds.), *The Cambridge Companion to Einstein*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 398-420.
- Galison, Peter (2005), *Relojes de Einstein, mapas de Poincaré. Imperios del tiempo*, Barcelona, Crítica.
- Grünbaum, Adolf (1973), *Philosophical Problems of the Space and Time*, Dordrecht/Boston, D. Reidel Publishing Company.
- Guillaumin, Godfrey (2016), *Génesis de la medición celeste. Una historia cognitiva del crecimiento de la medición científica*, México, Universidad Autónoma Metropolitana.
- Holton, Gerald (1969), “Einstein, Michelson, and the ‘crucial’ experiment”, *Isis*, vol. 60, núm. 2, pp. 132-197.
- Hon, Giorin y Bernerd Goldstein (2005), “How Einstein made asymmetry disappear; symmetry and relativity in 1905”, *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 59, núm. 5, pp. 437-544.
- Howard, Don (1993), “Was Einstein really a realist?”, *Perspectives on Science*, vol. 1, núm. 2, pp. 204-251.
- Howard, Don (1984), “Realism and conventionalism in Einstein’s philosophy of science: The Einstein-Schlick correspondence”, *Philosophia Naturalis*, vol. 21, pp. 618-629.

- Jammer, Max (1993), *Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics*, Nueva York, Dover Publications INC.
- Janssen, Michel (2012), “No Success Like Failure [...]” Einstein’s Quest for General Relativity, 1907–1920, en *The Cambridge Companion to Einstein*, Michel Janssen y Christoph Lehner (eds.), Cambridge University Press, pp. 167-227.
- Janssen, Michel, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer y John Stachel (2007), “Introduction to volumes 1 and 2: The Zurich notebook and the genesis of general relativity”, en Jürgen Ren (ed.), *The Genesis of General Relativity*, vol. 1: *Einstein’s Zurich Notebook: Introduction and Source*, Nueva York/Berlín, Springer, pp. 7-20.
- Janssen, Michel y Jürgen Renn, (2007), “Untying the knot: How Einstein found his way back to field equations discarded in the Zurich notebook”, en *The Genesis of General Relativity Vol. 2*, Jürgen Renn (ed.), *Einstein’s Zurich Notebook: Introduction and Source*, Nueva York/Berlín, Springer, pp. 839-925.
- Mari, Luca (2003), “Epistemology of measurement”, *Measurement*, vol. 34, núm. 1, pp. 17-30.
- Martínez, Sergio y Xiang Huang (2011), “Introducción. Hacia una filosofía de la ciencia centrada en prácticas”, en Sergio Martínez, Xiang Huang y Godfrey Guillaumin (eds.), *Historia, prácticas y estilos en la filosofía de la ciencia. Hacia una epistemología plural*, México, Universidad Autónoma Metropolitana/Miguel Ángel Porrúa, pp. 5-63.
- Norton, John D. (2004), “Einstein’s investigations of Galilean covariant electrodynamics prior to 1905”, *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 59, núm. 1, pp. 45-105.
- Norton, John D. (1984), “How Einstein found his field equations: 1912-1915”, *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 14, núm. 2, pp. 253-316.
- Pais, Abraham (2005 [c. 1982]), *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*, Nueva York, Oxford University Press.
- Poincaré, Henri (2011 [c. 1905]), *Science and Hypothesis*, Nueva York, The Walter Scott Publishing Co., [<https://www.gutenberg.org/files/37157/37157-pdf.pdf>], fecha de consulta: 3 de febrero de 2016.
- Poincaré, Henry (2007 [c.1906]), “On the dynamics of the electron”, en Jürgen Renn (ed.), *The Genesis of General Relativity*, vol. 3: *Theories of Gravitation in the Twilight of Classical Physics*, Dordrecht, Springer, pp. 253-271.

## MIGUEL AGUSTÍN AGUILAR SANDOVAL

- Poincaré, Henri (1913 [c. 1897]), “The measure of time”, en *The Foundations of Science (The Value of Science)*, Nueva York, Science Press, pp. 222-234.
- Putnam, Hilary (1975), “The refutation of conventionalism”, en *Mind, Language and Reality Philosophical Papers*, vol. 2: *Hilary Putnam*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 153-191.
- Reichenbach, Hans (1957), *The Philosophy of Space and Time*, Nueva York, Dover Publications INC.
- Renn, Jürgen (2007), “Classical physics in disarray. The emergence of the riddle of gravitation”, en Jürgen Renn (ed.), *The Genesis of General Relativity*, vol. 1: *Einstein’s Zurich Notebook: Introduction and Source*, Nueva York/Berlín, Springer, pp. 21-80.
- Renn, Jürgen y Tilman Sauer (2007), “Pathways out of classical physics: Einstein’s double strategy in his search for the gravitational field equation”, en Jürgen Renn (ed.), *The Genesis of General Relativity*, vol. 1: *Einstein’s Zurich Notebook: Introduction and Source*, Nueva York/Berlín, Springer, pp. 113-312.
- Soler, Léna (2008), “Introduction”, en Léna Soler, Howard Sankey y Paul Hoynin-gen-Huene (eds.), *Rethinking Scientific Change and Theory Comparison: Stabilities, Ruptures, Incommensurabilities?*, Dordrecht, Springer, pp. 1-17.
- Stachel, John, (2007), “The first two acts”, en Jürgen Renn (ed.), *The Genesis of General Relativity vol. 1. Einstein’s Zurich Notebook: Introduction and Source*, Nueva York/Berlín, Springer, pp. 81-111.

- Stachel, John (1980), "Einstein and the rigidly rotating disk", en A. Held (ed.), *General Relativity and Gravitation. One Hundred Years After the Birth of Albert Einstein vol. 1*, Nueva York, Plenum Press, pp. 1-16.
- Tal, Eran (2013), "Old and new problems in philosophy of measurement", *Philosophy Compass*, vol. 8, núm. 12, pp. 1159-1173.
- Van Fraassen, Bas C. (2008), *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*, Oxford, Oxford Clarendon Press.
- Walter, Scott (1999), "The non-Euclidean style of Minkowski relativity", en Jeremy Gray (ed.), *The Symbolic Universe. Geometry and Physics 1890-1930*, Nueva York, Oxford University Press, pp. 91-127.

**MIGUEL AGUSTÍN AGUILAR SANDOVAL:** Licenciado en Física por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Maestro en Humanidades (2017), Área de Concentración Filosofía, en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

**D. R. © Miguel Agustín Aguilar Sandoval, Ciudad de México, enero-junio, 2019.**