

Reflexiones sobre el tiempo en la física¹

Juan Carlos Castillo Ayala²

El tiempo viste un traje diferente para cada papel que desempeña en nuestro pensamiento.

Jhon Wheeler

Introducción

En este texto se abordan las concepciones de *tiempo* presentes en las ciencias de la naturaleza, particularmente en la física; se hace una descripción y análisis de algunas de éstas, en particular aquellas que se encuentran a la base de la física clásica, especialmente en la mecánica. También se analizan las teorías de la física moderna, para lo cual son tratadas las ideas de *tiempo* de la teoría Especial de la relatividad y de la mecánica cuántica. También son abordadas algunas concepciones contempladas en la termodinámica, la evolución, la vida y la edad de la Tierra, por ser muy ilustrativas para poner de manifiesto la diversidad conceptual que implica el tiempo en las ciencias de la naturaleza. Por último, se perfilan algunas implicaciones de estos análisis en la enseñanza de las ciencias.

¿Qué es el tiempo? esta pregunta reviste variadas consideraciones, ya que éste puede ser considerado como un elemento fundamental en la reflexión filosófica de la vida humana, de su conocimiento y de las formas de relación de los individuos con el mundo natural y social (Husserl, 1928) y como horizonte posible de comprensión del *Ser* en general (Heidegger, M., 1927, 1995; Olaya, 2007; Rivarola, 1994; además de estar implícito en la comprensión de nuestra vida y del mundo social, cultural y natural. Es importante resaltar que la pregunta por el tiempo y su naturaleza ha implicado desarrollos teóricos y reflexiones en diferentes órdenes. Como plantea Martins (2004), los abordajes realizados acerca del tiempo provienen de múltiples disciplinas, como la filosofía, la literatura, la historia, las artes y las ciencias naturales, entre otras.

1 Este trabajo se presenta como requisito para Candidatura de Doctorado en Educación. Trabajo orientado por la Doctora Adela Molina Andrade.

2 Profesor Departamento de Física. Universidad Pedagógica Nacional. Estudiante del Doctorado Interinstitucional en Educación, Énfasis en Enseñanza de las Ciencias. Sede Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Si bien el tiempo parece algo evidente en la vida del hombre, la amplia dimensión respecto de la cuestión sobre el mismo, emerge cuando nos preguntamos ¿qué experiencia tenemos acerca del tiempo?, es decir, ¿qué elementos nos permiten organizar las experiencias de acuerdo con una temporalidad específica?, ¿existe en nosotros alguna conciencia del tiempo?, ¿acaso, es el tiempo una condición del conocimiento humano?, ¿es posible que el tiempo exista independientemente del sujeto?, ¿qué relaciones se pueden establecer entre el tiempo y el espacio?, ¿cómo se explica el flujo incesante y unidireccional del tiempo/la flecha del tiempo?, ¿siempre experimentamos el tiempo de la misma forma, con el mismo ritmo y la misma cadencia, en las diferentes situaciones y etapas de nuestra vida?, ¿hay un tiempo común para todos, es decir, la concepción de tiempo es común a todos los individuos y grupos humanos?, ¿la concepción de tiempo tiene un carácter cultural? Estas son algunas preguntas que se han formulado desde distintas perspectivas; muy seguramente hay muchos más interrogantes que pueden ser planteados, dada la amplitud de la problemática. Estos son presentados en este texto, de manera introductoria, como ilustración de la complejidad implicada en la reflexión acerca del tiempo.

Por otra parte, las aproximaciones a este concepto muestran una diversidad de aspectos en relación con la categorización del mismo. Parafraseando a Wheeler, diríamos con respecto al tiempo que “viste un traje diferente para cada papel que desempeña” (Wheeler, 1990) en los distintos contextos disciplinares; éste puede aparecer de diferentes formas, como tiempo ontológico, tiempo físico, tiempo fenomenológico (Husserl, 1928), tiempo epistemológico, entre otros. También se pueden fijar controversias al respecto, como la existente entre tiempo absoluto y relativo, tiempo reversible e irreversible (Prigogine, 2001), tiempo con existencia real o como categoría del pensamiento (Kant, 1781), entre otras. Estas maneras de hablar acerca del tiempo, desde diferentes aspectos, están instauradas en el mundo del hombre, en las sociedades, en las culturas (Mashaal, 1995), en las religiones, en las formas explicativas de los diversos hechos y, más aun, en última instancia, en la experiencia de los individuos y de los grupos humanos, la cual se hace evidente en la discursividad; aspecto que puede entenderse como una relación íntima existente entre las concepciones de tiempo y de historia alrededor de las configuraciones de lenguaje (Orellana, 2003): “la manera que tiene un pueblo de experimentar las condiciones y limitaciones de su existencia aparece en su lenguaje y sus comportamientos” (Ricoeur, P.; Larre, C.; Panikkar, R.; Kagame, A.; Lloyd, G.; Neher, A.; Pattaro, G.; Gardet, L.; Gouveritch, A. 1975), aspecto que muestra una relación íntima entre la concepción de tiempo y la cultura, ya que la discursividad, ligada al lenguaje y los comportamientos de los grupos humanos, son constituyentes muy importantes de los espacios de significación, esto es, de la cultura.

En este texto se tiene como hipótesis de partida que en general las teorías científicas, al igual que las demás formas de relación de los individuos con el mundo natural y social, no pueden ser consideradas independientes de los contextos culturales (Elkana, 1983), ya que éstas cobran sentido para los individuos en tanto estén en resonancia con sus espacios de significación. En este orden de ideas, hacer un rastreo de los conceptos de tiempo presentes en distintas teorías físicas, permite visualizar cómo su significado varía, es decir, no hay un único concepto de tiempo en la física, aspecto que pone en evidencia que éste está ligado con los contextos teóricos (Saavedra, 1999), que igualmente están en estrecha relación con los contextos históricos (Kunh, 1970) y culturales (Elkana, 1983) en los que se originaron tales teorías; de acuerdo con el planteamiento de Elkana (1983), son estos contextos los que establecen la imagen de conocimiento, espacio de significación que posibilita el surgimiento, la difusión y la validación de las teorías científicas y, por supuesto, de las concepciones de tiempo que éstas implican.

Tomando en cuenta estos últimos aspectos, es claro que la diversidad de concepciones, ideas y conceptos del tiempo, presentes tanto en individuos procedentes de comunidades culturalmente diferenciadas como en las teorías científicas, plantea una problemática para la enseñanza de las ciencias, desde una perspectiva que sea sensible a las diferencias culturales. Así, el propósito de este trabajo es establecer un marco teórico en relación con las múltiples concepciones, ideas y conceptos de tiempo señaladas en las teorías científicas –particularmente en la física– que aporte elementos para la realización de un estudio acerca de las ideas de tiempo en estudiantes de licenciaturas en ciencias de la naturaleza, de los primeros semestres, de comunidades culturalmente diferenciadas.

Tiempo ciencia moderna y cultura

Con el surgimiento de la ciencia moderna en el siglo XVII, el tiempo adquiere un papel muy importante en las explicaciones del mundo físico, puesto que se constituye en un elemento estructurante de teorías físicas³, ya sea que se encuentre de manera explícita o implícita en sus explicaciones (Castillo, 2006). Especialmente en la física, con la aparición de la mecánica newtoniana y el consiguiente surgimiento del mecanicismo⁴

3 Es de anotar que la física, especialmente la mecánica, se constituye en el modelo de conocimiento científico debido a la abstracción y formalización matemática que logra, siendo por esta razón que el surgimiento de las teorías de la mecánica marcan de manera decisiva el nacimiento de lo que se conoce como ciencia moderna.

4 El mecanicismo es una cosmovisión que aparece con la ciencia moderna en el siglo XVII y que se hace hegemónica, la cual enmarca diversas teorías científicas y formas de proceder en el ámbito de la ciencia; los rasgos distintivos del mecanicismo pueden ser resumidos en los

como paradigma de conocimiento científico e imagen de conocimiento, el tiempo toma un papel fundamental ya que se constituye en un elemento imprescindible de las teorías físicas, no solo porque las descripciones involucran magnitudes que varían con el tiempo, sino porque es un concepto que se encuentra en las bases mismas de dichas teorías (Hertz, 1899); así, las leyes de la física incluyen explícita o implícitamente algún concepto o caracterización del tiempo.

El caso de la mecánica newtoniana es bastante ilustrativo, ya que Newton en su obra *Principios matemáticos de la filosofía natural*, en las definiciones, hace amplias disquisiciones con la pretensión de poner en claro lo que es el tiempo; más aun, en la primera ley –Ley de la Inercia– hay una caracterización implícita del mismo (Reichenbach, 1958).

Como se mencionó, el mecanicismo marca decisivamente la manera de estructurar explicaciones en el ámbito de las ciencias de la naturaleza, se reconoce la gran potencia que tienen los modelos mecánicos para la explicación de fenómenos de diversas clases, como los relativos al movimiento; más aun, las explicaciones de los diferentes fenómenos, aunque no acudan a modelos mecánicos, **sí se hacen a partir de descripciones espacio temporales**, muy propias de la mecánica (Castillo, 2006). Desde estos dos aspectos, el tiempo se involucra como elemento fundamental de las teorías de la física en general, y por supuesto, de la imagen de conocimiento implicada en el mecanicismo.

Es importante llamar la atención sobre el hecho de que el mecanicismo, como paradigma de conocimiento (Kunh, 1970), se instaura como base ideológica que determina lo que puede ser considerado como un conocimiento con validez científica. De acuerdo con Piaget y García (1982), la ideología sería el puente entre los contextos de descubrimiento y los de justificación, esto es, entre la cultura y los *corpus* de conocimientos; además, de acuerdo con Geertz (1992), la ideología es definida como un sistema cultural, aspecto que sitúa al mecanicismo en una relación íntima con los contextos culturales que hicieron posible su surgimiento y difusión. Tomando en cuenta lo anterior, es posible afirmar que el mecanicismo se instaura culturalmente y define lo que significa conocer y hacer ciencia, esto es, de acuerdo con Elkana (1983), el mecanicismo es una imagen de conocimiento. Así los desarrollos posteriores de la ciencia, particularmente de la física, están marcados por niveles de abstracción y formalización

siguientes: se le atribuye un orden y regularidad a la naturaleza, el cual se expresa mediante leyes universales que en general tienen su base en una idea de causalidad determinista; se recurre a imágenes espacio-temporales para la explicación de los diversos fenómenos; por último, las explicaciones a los diversos fenómenos están sustentadas en la reducción o la analogía con fenómenos mecánicos.

comparables con los de la mecánica; inclusive, los modelos mecánicos⁵ son utilizados como la explicación más potente de diversos fenómenos. En este contexto vale la pena resaltar que no son los métodos de abstracción y formalización de la mecánica los que determinan ideológicamente lo que es un conocimiento válido, sino es la concepción de mundo la que está a la base de éstos. “*El método científico permanece subordinado a la concepción de mundo y a la naturaleza de los problemas formulados*” (Piaget, J. y García, R. 1982), y es dependiente del horizonte de sentido que implica la visión de mundo; particularmente el mecanicismo está sustentado en la atribución de un orden y regularidad a la naturaleza bajo la suposición de una causalidad determinista, la cual está anclada en las concepciones de espacio y tiempo provenientes de la mecánica, particularmente de la newtoniana, la cual surge y se difunde gracias a una imagen de conocimiento y un contexto cultural que lo hicieron posible.

De acuerdo con lo anterior, un elemento que permite hacer un rastreo de los aspectos culturales implicados en la mecánica, y por supuesto en el mecanicismo, son las ideas o conceptos de tiempo que están presentes en la mecánica clásica, rastreo que está en consonancia con la hipótesis de Ricoeur, que plantea que hablar de las ideas de tiempo de un grupo humano es necesariamente develar su cultura (Ricoeur, P.; Larre, C.; Panikkar, R.; Kagame, A.; Lloyd, G.; Neher, A.; Pattaro, G.; Gardet, L.; Gouveritch, A. 1975). Así, se puede decir que las ideas o conceptos de tiempo implicados en el mecanicismo permiten develar los aspectos culturales implicados en él, aspecto relacionado con el análisis cultural que hace Elkana (Elkana, 1983), retomando a Geertz, en el cual considera que la ciencia es un sistema cultural, como la religión, el arte y el sentido común, entre otros, bajo la consideración de que todos estos sistemas son igualmente importantes y constituyen una cultura. De acuerdo con esta idea de Elkana, así como la cultura puede ser estudiada desde el arte o la religión, también lo puede ser desde la ciencia, y por supuesto, desde las ideas o conceptos de tiempo implicados, para lo cual establece la categoría de *imagen de conocimiento* que define qué es el conocimiento, cómo se conoce y qué es aquello que se conoce.

En este orden de ideas se puede concluir que todas las formas de conocimiento y de relación con el mundo natural y social, dentro de las cuales se encuentran las ciencias de la naturaleza y sus ideas o conceptos de tiempo implicados, no pueden ser consideradas externas a la cultura (Geertz, 1992; Elkana, 1983), ya que éstas se originan en contextos históricos y culturales muy particulares (Castillo, 2009); además, en el proceso de difusión y validación cobran sentido para los individuos y las comunidades en tanto estén

5 Modelos basados en el movimiento de partículas.

en consonancia con sus espacios de significación. Es en este contexto de reflexión que es posible evidenciar una relación estrecha entre las ideas de tiempo presentes en las teorías científicas, particularmente en la física, y la cultura como espacio de significación.

Con el fin de ampliar un poco más el espectro de elementos que permitan complejizar la discusión respecto al tiempo en la ciencia moderna y sus relaciones con la cultura, serán presentadas algunas ideas o conceptos de tiempo que están a la base de las ciencias, particularmente de algunas teorías físicas.

El tiempo en la mecánica clásica

Como se mencionó anteriormente, en la mecánica clásica el tiempo cumple un papel fundamental (Martins, A. F. P. y Zanetic, J. 2002) por encontrarse en las bases mismas de las teorías (Mach, 1949), aspecto que queda claramente fundamentado en la exposición que hace Heinrich Hertz⁶ de las diferentes representaciones de la mecánica en su obra *Los principios de la mecánica*⁷ (Hertz, 1899), de la cual, para el propósito de este texto, se han tomado algunos apartes; aunque en ella la intención del autor no es definir el tiempo, sí es posible ver cómo éste es un concepto fundamental de la mecánica en general. Si bien es posible encontrar una gran diversidad de teorías o representaciones de la mecánica, Hertz las agrupa en tres: las primeras de corte newtoniano, por estar basadas en el concepto de fuerza; las segundas, de corte energetista por estar basadas en el concepto de energía; y por último su representación, que está basada en el concepto de masa. La primera de las representaciones está caracterizada de la siguiente manera:

La representación usual de la mecánica nos da una primera imagen (...). Sus principales etapas están distinguidas por los nombres de Arquímedes, Galileo, Newton, Lagrange. Las concepciones sobre las que está basada esta representación son las ideas de espacio, tiempo, masa y fuerza (Hertz, 1899).

6 Heinrich Hertz, físico alemán alumno de Hermann von Helmholtz, quien en 1883 se interesó por la teoría electromagnética de James Clerk Maxwell, y dos años más tarde, ejerciendo la docencia en la Universidad Politécnica de Karlsruhe, produjo ondas electromagnéticas, a las que midió su velocidad y longitud de onda. Las traducciones al inglés de los artículos científicos que escribió fueron recogidas en tres volúmenes: *Electric Waves* (1893), *Miscellaneous Papers* (1896) y *Principles of Mechanics* (1899). En reconocimiento a su labor, la unidad de frecuencia de una onda lleva el nombre de hertz (hercio).

7 *Los principios de la Mecánica* es el tratado en el cual él presenta su propia teoría mecánica.

Aunque la representación de la mecánica que Hertz llama *usual* es un conjunto de teorías formuladas por distintos científicos, es claro que si bien las teorías pueden diferenciarse, los elementos o ideas en las que se basan son las mismas, dentro de las cuales está el tiempo. En esta presentación Hertz no hace referencia alguna acerca de la categoría en que pueden situarse tales ideas, pero, de acuerdo con los científicos a los que se refiere, es posible vislumbrar que éstas se pueden asumir como entidades físicas; es decir, en la representación usual de la mecánica, el tiempo tiene un carácter ontológico, refiriéndose aquí a que tiene una existencia en el mundo físico, es una entidad física. Hertz plantea una segunda imagen o representación de la mecánica, la cual caracteriza de la siguiente manera:

Hay una segunda imagen de los procesos mecánicos cuyo origen es mucho más reciente que los de la primera (...). Aquí partimos, como en el caso de la primera imagen, de cuatro ideas fundamentales independientes; y las relaciones entre ellas formarán los contenidos de la mecánica. Dos de ellas, espacio y tiempo, tienen un carácter matemático; las otras dos, masa y energía, son introducidas como entidades físicas que están presentes en cantidades dadas, y no pueden ser destruidas o inventadas (Hertz, 1899).

En la exposición que hace de la segunda imagen o representación de la mecánica, la cual corresponde a las teorías energetistas, llama la atención el hecho de que se refiere al carácter del espacio y del tiempo como matemático, aspecto que los sitúa categorialmente sin existencia física; en este orden de ideas el espacio y el tiempo se sitúan como conceptos que permiten hacer una organización de los fenómenos que implican transformaciones y cambios en las entidades físicas, en este caso la masa y la energía. Esta categorización del tiempo y del espacio como matemáticos establece una marcada diferencia con la representación usual, en el sentido en que si bien en ambas el tiempo y el espacio son conceptos fundamentales, categorialmente difieren puesto que en la primera hacen referencia al mundo físico, en tanto que en la segunda se refieren a la manera como los individuos comprenden el mundo físico, es decir, al conocimiento teórico del mundo físico, aspecto que las sitúa como categorías epistemológicas. Hertz plantea una tercera representación de la mecánica caracterizada así:

Un tercer arreglo de los principios de la mecánica es el que será explicado a lo largo de este libro. Se establecerán sus principales características de una vez, de tal manera que puedan ser criticadas de la misma forma que los otros dos. Difiere de ellas en este importante aspecto, ésta solamente comienza con tres concepciones fundamentales, tiempo, espacio y masa (Hertz, 1899).

Notemos cómo en la tercera representación de la mecánica, aunque Hertz afirma que es un arreglo distinto a los dos anteriores, es claro que el tiempo es un concepto fundamental como en las representaciones anteriores.

La presentación que hace Hertz de las diferentes representaciones de la mecánica, ha permitido poner de manifiesto que el tiempo es un concepto fundamental en la ciencia moderna, la cual tiene como uno de los paradigmas de conocimiento el mecanicismo, cuyo sustento está en las teorías mecánicas. Con el fin de avanzar un poco más en la elaboración de un panorama amplio en relación con las concepciones, ideas o conceptos de tiempo en la física, ahora se presentará, de manera más explícita, cómo es entendido el tiempo en algunas teorías mecánicas.

El tiempo en la mecánica newtoniana

La mecánica newtoniana se encuentra en y es la base de las teorías, que según Hertz, son la primera representación de la mecánica (Hertz, 1899); por otra parte, dentro de las teorías mecánicas, la mecánica newtoniana tiene un papel protagónico, no solamente por ser considerada como una revolución científica (Cohen, 1983), sino por ser la teoría mecánica más difundida en la enseñanza de la física;⁸ en este sentido cobra importancia ver cómo es entendido el tiempo en ella.

En la mecánica newtoniana el tiempo aparece como un concepto fundamental, aspecto que se pone de manifiesto en el hecho de que las descripciones de los fenómenos relativos al movimiento se pueden expresar en forma de ecuaciones diferenciales con respecto al tiempo (Prigogine, 2001), lo que le atribuye un carácter explicativo. Por otra parte Newton, en su obra *Principios matemáticos de la filosofía natural*, hace un esfuerzo por explicitar los sentidos que tiene el tiempo dentro de su teoría; es así que define dos tiempos, que si bien son diferentes, están relacionados: el tiempo absoluto y el tiempo relativo. Según la definición de Newton, “*El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí y por su propia naturaleza, sin relación a nada externo, fluye uniformemente y se dice con otro nombre duración.*” (Newton, 1687).

Fijémonos cómo en esta definición el tiempo absoluto tiene existencia ontológica, en el sentido en que para Newton es una entidad física que existe independientemente de la experiencia que se tenga del mismo; no

8 Si bien no se enseña estrictamente la mecánica newtoniana, en general la mecánica que es enseñada es de corte newtoniano, ya que se basa en las leyes de movimiento de Newton.

está relacionado con los fenómenos físicos, sino que depende de su propia naturaleza. Además su flujo uniforme, que se expresa en la linealidad de las ecuaciones con que se describe el movimiento, se pone de manifiesto en la primera ley del movimiento, Ley de la inercia. Un aspecto que es de resaltar, es que se entiende su existencia ontológica porque el tiempo absoluto es una entidad del mundo físico, lo cual queda expresado en la caracterización de *verdadero* que hace Newton del mismo. La calificación que le da al tiempo como matemático expresa, por un lado, que el tiempo absoluto es un concepto sin el cual es imposible la organización de cualquier experiencia, el tiempo es una categoría del conocimiento (Kant, 1781); por otra parte expresa la perfección del tiempo, la cual es la manifestación de una conciencia perfecta, Dios, aspecto que explicita de la siguiente manera en el escolio general:

Él es eterno e infinito, omnipotente y omnisciente; esto es, su duración se extiende desde la eternidad hasta la eternidad y su presencia del infinito al infinito (...). No es la eternidad ni el infinito, sino que es eterno e infinito; no es la duración ni el espacio, pero perdura y está presente. Perdura por siempre y está presente en todas partes, y por el hecho de existir siempre y en todas partes, Él constituye la duración y el espacio (Newton, 1687).

Este último aspecto llama la atención sobre el hecho de que la mecánica newtoniana está en relación íntima con una visión religiosa judeocristiana acorde con el contexto histórico en el cual surge (Force, J. E. y Popkin, R. H., 1999). Además, es de resaltar el hecho de que el tiempo absoluto, definido como dependiente de su propia naturaleza, no tiene un carácter físico en el sentido de ser definido en relación con fenómenos; asimismo, aunque es un concepto sin el cual es imposible cualquier organización de la experiencia, no puede ser situado como una simple estrategia de conocimiento de los individuos evidenciada en la teoría; así, los anteriores aspectos impiden situarlo como fenomenológico, ya que de éste no se tiene evidencia sensible, lo que se ve enfatizado por ser definido como infinito.

Ahora bien, ya que el tiempo absoluto-real no puede ser medido, puesto que es independiente de los fenómenos físicos, es posible preguntarse sobre qué experiencia se tiene del tiempo, cómo es posible medirlo. En relación con estas preguntas se puede asumir que Newton habla de otro tiempo, el relativo, al cual define así: “El tiempo relativo aparente y vulgar es alguna medida sensible y exterior (precisa o desigual) de la duración mediante el movimiento, usada por el vulgo, en lugar del tiempo verdadero; día, mes, año son medidas semejantes” (Newton, 1687).

Notemos cómo en esta definición es claro que el tiempo relativo se sitúa como una medida del tiempo, en la cual el movimiento, particularmente el de los cuerpos celestes, es la forma en que se realiza tal medida. En este orden de ideas, si bien el movimiento es un fenómeno del cual no depende el tiempo absoluto, sí es un principio de la duración, que sirve como una medida de éste. Aquí vale la pena resaltar que el tiempo relativo tiene un carácter físico, en cuanto solo es posible dar cuenta del mismo en relación con un fenómeno físico, el movimiento; además se puede afirmar que es fenomenológico, ya que requiere de una experiencia sensible, y por supuesto, de una conciencia que relacione tal experiencia (Husserl, 1928) –el movimiento– con una medida de tiempo. Este tiempo es relativo pues está relacionado con un fenómeno físico –el movimiento– y su medida depende del mismo; así, la medida del tiempo puede variar de acuerdo con el movimiento que se tome como referencia, siendo esta la razón por la cual la medida puede ser precisa o desigual. Llama la atención que el tiempo relativo, al que se refiere Newton, es aquel cuyo uso se le atribuye al vulgo/individuos no científicos, aspecto que lo sitúa con un arraigo cultural fuerte dentro de los grupos humanos no científicos (Ricoeur, P.; Larre, C.; Panikkar, R.; Kagame, A.; Lloyd, G.; Neher, A.; Pattaro, G.; Gardet, L.; Gouveritch, A., 1975).

Tiempo relativo en Leibnitz

De acuerdo con la clasificación que hace Hertz de las representaciones de la mecánica, la segunda tiene como una de sus bases conceptuales la energía; uno de los representantes más importantes de esta perspectiva es Leibnitz⁹, de quien se dice, mantuvo una extensa controversia con Newton por los que él consideraba los conceptos fundamentales de la mecánica: el espacio y el tiempo (Reichenbach, 1958). Leibnitz negaba la existencia de un espacio y un tiempo absolutos (Rada, 1980), con lo cual negaba de igual forma que éstos fueran entidades físicas. Leibnitz afirma que el espacio y el tiempo son de carácter matemático en el sentido en que expresan la relación de orden entre los eventos físicos (Leibnitz, G., en L. H. Leomker (Ed.). 1956), lo cual los sitúa como puramente relativos, aspecto que expresa de la siguiente manera: “He subrayado varias veces que con-

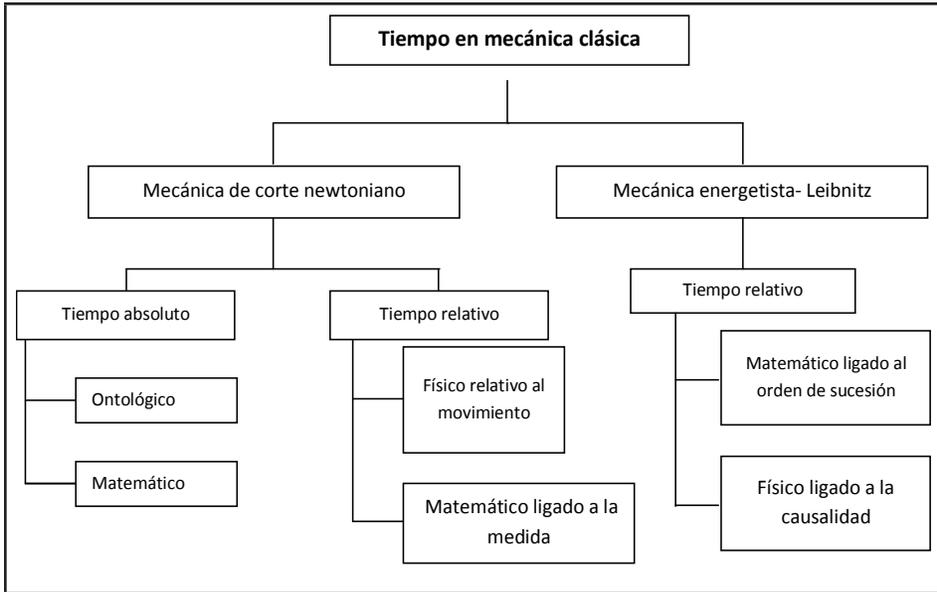
9 Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-Hannover, id., 1716). Filósofo y matemático alemán, planteó y defendió una física basada en el concepto de energía, la cual es situada como la causa que hace posible el movimiento. Por otra parte, de acuerdo con su metafísica, los elementos últimos que componen la realidad son las mónadas, puntos inextensos de naturaleza espiritual con capacidad de percepción y actividad que, aun siendo simples, poseen múltiples atributos; cada una de ellas recibe su principio activo y cognoscitivo de Dios, quien en el acto de la creación estableció una armonía entre todas las mónadas. Esta armonía preestablecida se manifiesta en la relación causal entre fenómenos, así como en la concordancia entre el pensamiento racional y las leyes que rigen la naturaleza.

sidero que el espacio, así como el tiempo, son algo puramente relativos: el espacio describe el orden de la existencia, y el tiempo describe el orden de sucesión.” (Leibnitz, G., en L. H. Leomker (ed.). 1956).

Es de destacar que, en contraste con la perspectiva newtoniana, el carácter *relativo* del tiempo no está relacionado con el hecho de que su medida se hace en correspondencia con el movimiento; la relatividad está dada por una relación del orden de los eventos físicos, que expresa la sucesión de dichos eventos; así, mientras el espacio describe el orden de los eventos que son permitidos simultáneamente, el tiempo describe el orden de sucesión de los eventos que no son permitidos simultáneamente (Gutiérrez, 2006); en este sentido se puede afirmar que los eventos permitidos simultáneamente no tienen una relación causal, en tanto que el tiempo establece un orden de los eventos que tienen relación causal; un evento que es causa de otro se sitúa –en orden de sucesión– antes que el otro, de esta forma se establece una relación entre tiempo y causalidad, que si bien no es enunciada explícitamente por Leibnitz, es identificable en su obra (Gutiérrez).

Ahora bien, el tiempo asociado a la causalidad lleva implícita una idea de dirección, ya que la relación causal entre eventos se constituye sobre la base de que la causa antecede al efecto; esta asociación entre orden temporal y causalidad puede ser vista desde dos aristas, una en la cual la relación causa efecto supone un orden temporal, y otra en donde el orden temporal supone que los eventos se relacionan causalmente (Gutiérrez, 2006); en el caso particular del tiempo relativo de Leibnitz, la relación causal entre eventos es la que constituye el orden de sucesión, así el orden temporal está dado por la relación causal; otros pensadores, como Kant, asumen, contrariamente a Leibnitz, que es el orden temporal el que establece una relación causal entre los eventos físicos, ya que el tiempo y el espacio son categorías *a priori* sin las cuales sería imposible hacer cualquier organización de la experiencia (Kant, 1781); la causalidad es una estrategia de los individuos para organizar la experiencia de acuerdo con un orden temporal (Bruner, 1993).

Un aspecto que vale la pena resaltar es que, independientemente de la manera como es asumida la relación entre tiempo y causalidad, ésta supone una dirección en el tiempo, la cual es asumida por Leibnitz como un orden de sucesión de los eventos; así, el tiempo relativo de Leibnitz es un tiempo direccionado, en oposición al tiempo absoluto de Newton, el cual por su “isotropía”, no permite diferenciar entre pasado, presente y futuro; de hecho, se afirma que en la mecánica newtoniana la dirección del tiempo aparece como un aspecto puramente fenomenológico (Prigogine, 2001). La siguiente gráfica resume las ideas plantadas anteriormente.



El tiempo direccionado e irreversible

Dentro de las teorías de la física, además del tiempo absoluto y el tiempo relativo –con sus diferentes significados–, es posible encontrar un tiempo direccionado e irreversible. En esta parte del texto se abordará la manera como puede ser entendido el tiempo desde las teorías que plantean explícitamente su dirección.

El tiempo en la termodinámica

La termodinámica se asume como una teoría de principios en la que se definen las condiciones de posibilidad de los procesos naturales, aspecto que se evidencia en su estructura, la cual se compone de tres conceptos, que si bien son independientes, son mutuamente complementarios: estado, cambio y proceso (Pedreros, R. y Castillo, J. C., 2007)¹⁰. Particularmente el concepto de proceso implica situar al tiempo en la descripción de los fenómenos físicos, ya que un sistema no puede encontrarse en dos estados respecto a una misma cualidad, simultáneamente¹¹; puesto que el proceso

10 Los conceptos de estado, cambio y proceso pueden ser considerados categorías epistemológicas, en el sentido en que son conceptos estructurantes para la explicación de una diversidad de fenómenos como los mecánicos, termodinámicos, electromagnéticos; y se encuentran como parte de las teorías físicas (Castillo, 2004).

11 Un cuerpo, por ejemplo, no puede estar frío y caliente al mismo tiempo.

supone que el cambio experimentado al ir de un estado a otro se hace de manera continua pasando por todos los estados intermedios, el concepto de proceso lleva implícita la idea de que los cambios se dan en el tiempo, tienen una duración determinada, un principio y un fin; esto significa que parte de un estado y llega a otro, poniéndose de manifiesto que el cambio requiere una duración (Castillo, 2004). Pensemos, por ejemplo, en una taza de café caliente dejada sobre la mesa; como consecuencia de su interacción con el ambiente se enfría hasta llegar al equilibrio térmico con éste. Dicha transición aparece como un objeto temporal, en el sentido de que la taza de café no puede instantáneamente pasar de estar caliente a estar a temperatura ambiente, sino que este cambio tiene una duración, la cual establece una relación íntima entre el concepto de proceso y el tiempo.

Si bien existe dicha relación, en la termodinámica clásica, por lo general, no es explicitada, ya que las descripciones del cambio de estado de los sistemas se hacen a través de ecuaciones que relacionan las variables de estado del sistema, *ecuaciones de estado* (Castillo, 2004); en este sentido se puede afirmar que estas descripciones involucran al tiempo de manera implícita, puesto que este no es considerado una variable termodinámica; esto es, el tiempo no es requerido para especificar el estado del sistema, el tiempo no es una variable de estado; aun así, es importante subrayar que aunque la descripción de los procesos termodinámicos no involucra al tiempo como variable, este se encuentra implícitamente involucrado a través del concepto mismo de proceso.

Hasta el momento se ha presentado brevemente cómo el tiempo se involucra implícitamente en las descripciones de la termodinámica clásica a través del concepto de proceso, descripciones que se hacen bajo la suposición de que el cambio de estado de un sistema se experimenta en condiciones de equilibrio, aspecto por el cual las ecuaciones de estado son suficientes para la descripción de los procesos (Ayala, M.; Malagón, F.; Castillo, J. C.; Garzón, M., 2003) sin involucrar el tiempo como variable. Si ahora se considera que la condición que posibilita el cambio de estado es el *desequilibrio*¹², es claro que los procesos se efectúan siempre en condiciones de *desequilibrio* (Plank, 1945; Castillo, 2004), y el cambio de estado que experimenta el sistema, se realizara para restablecer el *equilibrio*¹³ del mismo; una vez restablecido, éste no se *desequilibra* espontáneamente, aspecto que define la *equilibración* como un proceso irreversible (Plank; Groot, 1968), esto es, un

12 Desequilibrio es entendido como no homogeneidad en el estado de un sistema, lo cual se puede expresar como $\nabla\psi(r,t)=F(r,t)$, donde $\psi(r,t)$ es la variable que especifica el estado del sistema (Castillo, 2004).

13 $\nabla\psi(r,t)=0$

proceso que está direccionado. Si bien la ley de conservación de la energía da cuenta de los procesos que son posibles en la naturaleza, no establece la dirección de los mismos, la cual está relacionada con el restablecimiento del equilibrio; la dirección de los procesos está determinada por las restricciones que plantea la segunda ley de la termodinámica (Plank)¹⁴.

Las restricciones a los procesos que supone la segunda ley de la termodinámica establece plenamente una asimetría temporal, esto es, un tiempo direccionado, puesto que este queda involucrado en las descripciones termodinámicas a través del concepto de proceso, y de acuerdo con esta ley, los procesos están direccionados; la segunda ley de la termodinámica es conocida también como la ley que da cuenta del crecimiento irreversible de la entropía (Prigogine, 2001), por lo cual la dirección del tiempo está gobernada por el crecimiento de la entropía. Este aspecto llama la atención sobre el hecho de que el tiempo toma ahora un carácter termodinámico, ya que está relacionado íntimamente con los procesos irreversibles, lo que además de hacerlo un tiempo físico, lo hace direccionado o irreversible, que en el contexto de la termodinámica significa lo mismo (Plank, 1945).

El concepto de evolución en la termodinámica y los procesos irreversibles, es establecido por la dirección de dichos procesos, que a su vez está determinado por el crecimiento de la entropía (Plank, 1945): los procesos que experimenta un sistema lo llevan irreversiblemente hacia su estado más probable, el sistema evoluciona hacia el equilibrio, así, hablar de procesos irreversibles, implica ineludiblemente hablar de evolución (Mashaal, 1995); por ejemplo, la taza de café caliente se enfría espontáneamente hasta llegar a la temperatura ambiente, es decir, el sistema formado por la taza de café y el ambiente evoluciona hacia el equilibrio, pero no es posible que la taza de café se caliente espontáneamente de nuevo desde la temperatura ambiente, de la misma manera que un viejo no se hace joven; estos aspectos muestran claramente que la idea de evolución, ligada a la irreversibilidad, implica una manifestación de la asimetría temporal entre pasado y futuro, es decir, es manifestación de la dirección del tiempo (Prigogine, 1999; Groot, 1968).

Un punto que es importante resaltar, es que considerar el desequilibrio como condición de posibilidad de los procesos implica que las ecuaciones de estado ya no son adecuadas para su descripción, puesto que estas expresan relaciones que se cumplen en condiciones de equilibrio; para el caso de la descripción de procesos irreversibles –que se dan en condiciones de desequilibrio– es necesario involucrar el concepto de flujo y las

14 El calor no puede fluir espontáneamente de un cuerpo frío a un cuerpo caliente (un sistema no aumenta el desequilibrio térmico espontáneamente). También se puede expresar como la Ley del crecimiento de la entropía.

descripciones se harán mediante ecuaciones, como las de conducción, de continuidad y de difusión, relaciones que se expresan mediante ecuaciones diferenciales con respecto al espacio y al tiempo (Castillo, 2004), involucrándose de esta manera el tiempo en la descripción termodinámica de los procesos; cabe señalar que el tiempo en estas ecuaciones aparece como un parámetro, ya que su carácter termodinámico se lo da la idea misma de proceso irreversible.

En síntesis, la termodinámica define el tiempo en relación con el concepto de proceso, aspecto que lo establece como un tiempo físico; además, el concepto de proceso irreversible le imprime al tiempo un carácter termodinámico y le otorga una dirección, una asimetría entre pasado y futuro que, cabe resaltar, no es involucrada en la mecánica, aspecto que genera grandes problemas para las descripciones mecanicistas de los fenómenos termodinámicos (Prigogine, 2001, 1999).

Tiempo y evolución

Como se mencionó en el anterior apartado, el concepto de proceso irreversible, ligado con la dirección del tiempo, lleva a la idea de evolución como concepto que da cuenta del sistema a través del tiempo; esta idea está presente en la termodinámica de los procesos irreversibles además de ser muy importante en las descripciones mecanicistas de los fenómenos termodinámicos (Prigogine, 1999). Si bien la geología no es considerada estrictamente como una teoría física, es propuesta en este escrito puesto que hace uso de una gran cantidad de conceptos de la física, y quizá lo más importante para referenciarla, es que mediante ella es posible poner de manifiesto algunos aspectos que permiten visualizar la conexión que hay entre dirección del tiempo-irreversibilidad-evolución y la constitución de un tiempo histórico en las ciencias naturales, aspecto que se encuentra en la termodinámica de los procesos irreversibles, pero que se puede visualizar con más claridad en la geología.

La geología es una disciplina por excelencia histórica, que pretende dar cuenta de la evolución del planeta. Como se mencionó anteriormente, la evolución implica cambio, procesos irreversibles y, por supuesto, implica tiempo; así, el tiempo es un elemento fundamental del razonamiento y de la investigación en geología.

Uno de los mayores aportes de la geología es haber dado dimensión al tiempo mediante la invención del *tiempo geológico*, el cual se caracteriza por estar referido siempre a grandes escalas y por ser finito, ya que es el

tiempo de la edad de la Tierra (Hervé, 1999), esto es, inicia con la formación del planeta y se terminará con la extinción del mismo. Dentro de la geología se distinguen dos tiempos: el relativo y el absoluto.

Para el estudio de un sector cualquiera de la corteza terrestre, un yacimiento mineral o cualquier otro objeto geológico, una de las tareas centrales es establecer el orden de formación de las rocas, minerales o estructuras componentes de dicho sistema; esta sucesión de orden de formación se expresa como tiempo relativo, el cual establece qué elemento es más antiguo que otro (Hervé, 1999). Para el establecimiento del tiempo relativo son utilizados cuatro métodos de observación directa: superposición¹⁵, inclusión¹⁶, relaciones de corte¹⁷ y sucesión de faunas¹⁸; métodos que permiten determinar cuáles rocas son más antiguas y cuáles más jóvenes.

Fijémonos cómo el tiempo relativo de la geología –al igual que el tiempo relativo de Leibnitz– expresa un orden de sucesión, que en este caso permite establecer la manera como se ha venido formando cierto objeto geológico a partir de indicios –tipos de roca, secuencias de estas, fauna fósil– que se sitúan como datos temporales; así pues, estos datos temporales están ligados con un proceso que les imprime un carácter histórico, esto es, en las formas y objetos geológicos actuales está el rastro de las condiciones pasadas, y hace prever que las formas y objetos geológicos futuros estarán impresos con las condiciones actuales. Es de resaltar el hecho de que los órdenes de sucesión son establecidos de la misma manera que se construye la historia, es decir, interpretando y organizando datos a través de criterios construidos por los historiadores, en este caso los geólogos; los criterios quedan explícitos en los métodos de determinación de la edad de las rocas. También es importante poner de manifiesto que son las estructuras formadas por las rocas, junto con su interpretación, las que permiten establecer una historia de los objetos geológicos como un orden de sucesión.

En síntesis, la idea de evolución ligada al orden de sucesión en la formación de las estructuras geológicas, imprime una asimetría temporal entre pasado y futuro, ya que incluye la historia como parte fundamental de la explicación, entendiéndose aquí la historia como una forma de temporalidad que distingue el pasado del presente y del futuro. La historia es asumida como forma de temporalidad, ya que es en sí un objeto temporal que hace conciencia sobre un devenir de estados, de eventos que se organizan de

15 Una roca depositada sobre otra es más joven que ésta.

16 Si un fragmento de roca se encuentra dentro de otra roca, ésta es más joven.

17 Si el límite de un cuerpo rocoso corta a los límites entre otras rocas, este cuerpo rocoso es más joven que las otras rocas.

18 Las faunas fósiles, ordenadas cronológicamente por diferentes métodos, proporcionan información sobre la edad de las rocas que las contienen.

acuerdo con un orden que presupone la duración de un trecho entre un estado y otro; duración que aparece cuando la historia se hace relato (Husserl, 1928).

Si bien el tiempo relativo de la geología está constituido sobre un orden de sucesión de la formación de los cuerpos rocosos y da cuenta de la evolución de los objetos geológicos, no da cuenta de estos eventos en relación con la evolución misma del planeta. Para ello se requiere del tiempo absoluto, el cual está relacionado con la edad de la Tierra y es un concepto cuantitativo de la duración del tiempo geológico que se extiende desde la formación del planeta, siendo este tiempo quizá la contribución más importante de la geología, pues ha proporcionado al hombre una amplia comprensión de la naturaleza y su lugar en esta, además de estar relacionada con la formulación de teorías como la de la evolución de las especies y la del actualismo (Hervé, 1999). Aunque el concepto de tiempo absoluto de la geología –tiempo de la edad de la Tierra– tiene un sustento muy firme en las ciencias básicas y en la geología misma, la estimación de éste ha estado envuelta en una diversidad de polémicas que se ponen de manifiesto en las distintas formas que se han propuesto para su medida. Miremos algunas de las formas de medición y estimación planteadas.

En 1658 el arzobispo anglicano James Ussher publicó una cronología que permitía estimar la edad del planeta, basada en cierta interpretación de la genealogía bíblica de acuerdo con la cual se estimaba que la Tierra había sido creada en la tarde del 22 de octubre del año 4004 antes de Cristo (Hervé, 1999). El dato estimado por el arzobispo Ussher fue puesto como pie de página en la biblia inglesa editada en 1701, permaneciendo allí hasta 1900. Aunque este dato fue concebido en el contexto de la religión anglicana, se constituyó en el marco temporal que condicionaba las hipótesis catastrofistas y creacionistas que hasta comienzos del siglo XIX se ponían en juego para explicar la sucesión y diversidad de las faunas fósiles que se conocían en las rocas. Es de resaltar que esta forma de dar cuenta del tiempo absoluto establece su carácter de tiempo histórico, ya que su estimación está dada por el relato bíblico, el cual es en sí mismo un relato histórico. Además se debe subrayar que esta determinación de la edad de la tierra no acude a indicio fenomenológico alguno, aspecto que hace que el tiempo absoluto de la geología no sea ni físico ni fenomenológico; esta forma de estimar la edad de la Tierra se puede considerar que tiene un arraigo cultural judeocristiano en el contexto de la religión anglicana del siglo XVII.

La edad para la Tierra propuesta por el arzobispo Ussher, fue puesta en duda por geólogos y físicos en el siglo XVIII y con especial énfasis en la primera mitad del siglo XIX. El geólogo inglés Sir James Hutton, en su *Teoría*

de la Tierra (1758), basado en extensas y rigurosas observaciones geomorfológicas y estratigráficas, llegó a la conclusión de que no es posible determinar un comienzo ni una posible “fecha de finalización” de la Tierra, es decir, no hay indicios de la edad del planeta, no es posible estimar el tiempo absoluto. A pesar de la rigurosidad y la extensión de las observaciones de Sir Hutton, su respuesta causó controversia, lo cual llevó a la invención de métodos para calcular la edad de la Tierra. Estos métodos se basaron en una idea de tiempo físico, es decir, partieron de la base de que para medir el tiempo se requiere conocer un proceso cíclico o progresivo de tasa de variación constante del cual se conozcan los estados inicial y final.

Con el avance obtenido por la termodinámica y la astronomía, en el siglo XIX se desarrollan dos métodos basados en cálculos físicos y astronómicos; estos son el enfriamiento de la Tierra y la física orbital. Además de estos, se crearon dos métodos basados en observaciones de procesos geológicos: la química de los océanos y la acumulación de sedimentos observables en las rocas, produciéndose mediante estas formas una diversidad de resultados (Hervé, 1999).

Es importante destacar que la estimación de la edad de la Tierra, la cual establece el tiempo absoluto mediante los métodos físicos y geológicos, le atribuyen a este tiempo un carácter físico, en el sentido de medirlo en relación con fenómenos físicos; también es importante tener en cuenta que el método del enfriamiento, el de la química de los océanos y el de acumulación de sedimentos, están relacionados con procesos irreversibles, aspecto que establece una relación íntima entre el tiempo absoluto y la idea de evolución, en tanto que el método basado en la física orbital es un tiempo que deviene de una medición sustentada en la idea de regularidad, expresada en la periodicidad de los fenómenos naturales.

En síntesis, se puede afirmar que en el ámbito de la geología se encuentran dos tiempos, el relativo y el absoluto. El tiempo relativo es un tiempo físico, en el sentido en que se establece a partir de la interpretación de datos físicos, estructuras geológicas desde las cuales se instaura un orden de sucesión de condiciones que se revelan en la actualidad; esto le otorga un carácter de tiempo histórico ligado con la evolución. Por otra parte el tiempo absoluto –el de la edad de la Tierra–, el cual es un tiempo finito, inicia con la formación o creación del planeta y finaliza con el fin del mismo, suscita una diversidad de polémicas y genera distintas formas para su estimación y medición, las cuales van desde la interpretación de los relatos bíblicos hasta los métodos termodinámicos y químicos; formas de estimación que lo caracterizan como tiempo histórico al relacionarlo, por un lado, con los relatos de pasados distantes, y por el otro, con los procesos irreversibles.

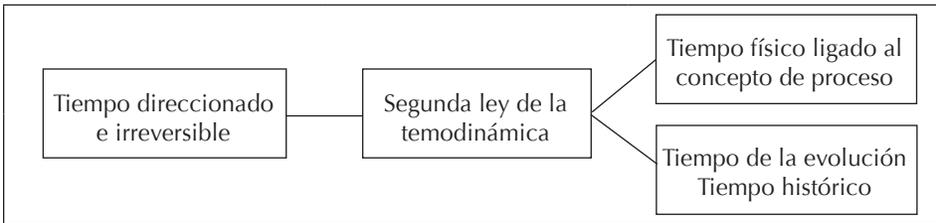
Con el fin de ampliar un poco más las ideas referentes a la relación entre tiempo, irreversibilidad y evolución, se mostrarán algunos aspectos de la *Teoría de la Evolución* de Darwin, que aunque no es una teoría física, está relacionada con la física a través de la idea de irreversibilidad y de evolución, y está vinculada también con la geología a través del tiempo de grandes escalas y de la idea de evolución; por otra parte, para la reflexión del presente documento en relación con el tiempo resulta muy ilustrativa, además de ser una teoría que marca un paradigma en la ciencia occidental moderna.

La teoría de la evolución de Darwin, basada en la idea de adaptación, se aleja de las concepciones provenientes de la tradición judeocristiana (Mojica, L. y Molina, A., 2004) que asumen que en las especies las formas y funciones de sus diversos órganos proceden de un “diseño”; por tomar algún ejemplo, el pico de las águilas tiene forma de gancho, ya que está diseñado para rasgar la carne de sus presas. En contraposición a la idea de diseño, la teoría de la evolución asume que la forma y función que tienen los diversos órganos de las especies provienen de un proceso de adaptación a las diversas condiciones de supervivencia por las que deben atravesar. Así pues, la forma y la función están ligadas con un proceso que imprime un carácter histórico a las especies, esto es, en las formas y funciones actuales está el rastro de las condiciones pasadas, y hace prever que las formas y funciones futuras estarán impresas con las condiciones actuales.

Fijémonos cómo asumir las formas y funciones ligadas a un proceso de adaptación las sitúa como datos temporales, es decir que la evolución es un evento temporal que presupone una duración de los estados, referidos estos a las formas y funciones anteriores y a la duración de los estados actuales, como también a la duración del cambio mismo, ya que un sistema no puede estar en dos estados simultáneamente; así, el cambio de un estado al otro presupone una duración. En este orden de ideas, la mutación que sufre una especie por adaptación está ligada a una duración. Por otra parte, la idea de evolución adaptativa imprime una asimetría temporal entre pasado y futuro, ya que incluye la historia como parte fundamental de la explicación, entendiéndose aquí la historia como una forma de temporalidad que distingue el pasado del presente y del futuro; la historia es asumida como forma de temporalidad, ya que es en sí un objeto temporal que hace conciencia sobre un devenir de estados, de eventos que se organizan de acuerdo con un orden que presupone la duración de un trecho entre un estado y otro; duración que aparece cuando la historia se hace relato (Husserl, 1928), como se había mencionado anteriormente.

Notemos que la temporalidad que aparece deviene de la asunción del proceso que se ancla en las evidencias de pasados distantes que se pueden transformar en relatos¹⁹ que son objetos temporales. Si bien no se experimenta la duración del proceso, se tiene experiencia de la duración de la historia a través de los relatos contruidos con las evidencias de los pasados distantes; aquí los datos fenomenológicos desde los que se constituye la idea del tiempo irreversible de la evolución, no son otra cosa que los relatos contruidos con evidencias de pasados distantes.

Algunos aspectos de la teoría de la evolución de Darwin, enunciados en la anterior síntesis, llaman la atención sobre la íntima relación que se puede establecer entre el tiempo direccionado-irreversible y la idea de tiempo histórico; en este orden de ideas es posible afirmar que el tiempo direccionado de la termodinámica de los procesos irreversibles es también un tiempo histórico. La siguiente gráfica sintetiza las ideas planteadas anteriormente.



El tiempo en las teorías contemporáneas de la física

Los aportes de Faraday y Maxwell consolidaron al electromagnetismo como una teoría fundamental de la física, no solamente porque la formalización que hace Maxwell de los trabajos experimentales y teóricos de Faraday, que queda expresado en las ecuaciones de Maxwell, resultan ser una excelente explicación para los fenómenos electromagnéticos, sino, porque instaura la visión de campos en el seno de las teorías físicas, siendo este contexto teórico el que posibilita el hallazgo, por parte de Hertz, de las ondas electromagnéticas (Berkson, 1981).

Las ondas electromagnéticas u ondas hertzianas, se constituyen en un importante punto de partida de dos de las teorías de la física moderna: la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Paradójicamente, aunque el nacimiento de las ondas electromagnéticas se da en el seno de la física clásica, son éstas las que llaman la atención sobre las grietas de esta

¹⁹ Relato se asume como cronología, mapas temporales, relatos en el sentido habitual, en general, formas de manifestar el carácter histórico (Husserl, 1928).

cosmovisión; por un lado, el estudio relacionado con el medio de propagación de las ondas electromagnéticas, particularmente de la luz —éter lumínico— y los aspectos relacionados con la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, muestran la necesidad de revisar los conceptos de espacio y tiempo de la mecánica de corte newtoniano, revisión que da origen a la teoría de la relatividad (Sánchez, 2007). Por otro lado, el estudio de la interacción radiación-ondas electromagnéticas-materia, pone de manifiesto la necesidad de establecer una teoría que indague sobre el comportamiento de la materia a nivel microscópico, es decir, una teoría de la estructura de la materia. Esta es la mecánica cuántica, teoría que establece un rompimiento importante con los fundamentos epistemológicos de la mecánica clásica (Rueff, 1968), ya que pone de manifiesto la imposibilidad de la objetividad en el conocimiento del mundo físico. Es importante destacar que la importancia de estas teorías no radica solamente en sus hallazgos, sino en la ruptura que éstas representan para la concepción de mundo físico y el conocimiento del mismo. En esta sección se abordarán algunos aspectos relativos al concepto de tiempo en la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica.

El tiempo en la teoría de la relatividad

Como se mencionó anteriormente, los trabajos de Faraday —y la posterior formalización que hizo Maxwell de los mismos— establecieron un nuevo paradigma (Kuhn, 1970) en la física, que se concretó con la *Teoría de Campos electromagnéticos* de J. C. Maxwell (Berkson, 1981) y el consiguiente hallazgo de las ondas electromagnéticas por parte de H. Hertz; la teoría electromagnética de campos, al romper con la idea de la acción instantánea y a distancia, e instaurando la concepción de que las acciones se transmiten a través y por medio del espacio, socava las bases mismas de la tradición newtoniana, en el sentido de que sustituye la idea de espacio absoluto e inerte por un espacio físico con propiedades, y que se define en relación con los fenómenos físicos que en él se experimentan.

Por otra parte, el estudio de la electrodinámica abre aun más la brecha con la tradición newtoniana, ya que los fenómenos relativos al comportamiento de los campos eléctrico y magnético, cuando los cuerpos están en movimiento, establece contradicciones entre las leyes del electromagnetismo²⁰ y las de la mecánica de corte newtoniano. En 1905 Einstein, en un artículo publicado en la revista *Annalen der Physik* bajo el título “Acerca de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”, el cual instituye las

20 Ecuaciones de Maxwell.

bases de la Teoría Espacial de la Relatividad, llama la atención sobre el hecho de que reconciliar las contradicciones entre las leyes de la mecánica y las del electromagnetismo requiere de un replanteamiento de los conceptos de espacio y tiempo de la mecánica. Einstein, en el mencionado artículo, afirma que el propósito de la mecánica es relacionar eventos que ocurren en diferentes puntos del espacio y en tiempos diferentes, para lo cual las coordenadas espaciales se expresan como funciones del tiempo; sin embargo, advierte que es inevitable tener en cuenta que una descripción matemática de este tipo carece de significado físico si no se tiene claro lo que es el tiempo (Saavedra, 1999).

La brecha de contradicciones entre las leyes de la mecánica y las del electromagnetismo fue cerrada, en gran medida, por la teoría especial de la relatividad, la cual desecha la idea de tiempo absoluto verdadero y matemático²¹, asumiendo una idea de tiempo relativo, entendido como una forma de relacionar eventos físicos; esto es, el tiempo da cuenta de la organización de acontecimientos mediante una sucesión, en la cual unos eventos anteceden a otros, suceden a otros, o son simultáneos (Einstein, 1922). Particularmente para esta manera de definir el tiempo, la simultaneidad es fundamental puesto que la organización temporal de los eventos físicos deviene de ella: si digo, por ejemplo, que el tren llegó a la estación a las cinco, lo que estoy afirmando es que la llegada del tren a la estación se dio simultáneamente (coincidió) con el evento de que las manecillas del reloj de la estación, marcaban las cinco; aun más, si digo que la llegada del tren a la estación fue simultánea a la llegada de otro tren a una estación distante, es decir, ambos trenes llegaron a su estación respectiva a las cinco, lo que se está afirmando es que ambos trenes llegaron a su estación simultáneamente al evento de que las manecillas del reloj, colocado en cada estación, marcaran las cinco, bajo la condición de que juntos relojes estuviesen sincronizados²².

Ahora bien, en este sentido un evento antecede al otro si la marcación del reloj, simultánea con tal evento, antecede a la marcación simultánea con el otro, bajo la condición de que los relojes estén sincronizados. Otro aspecto importante es que eventos simultáneos en un marco de referencia específico, pueden no serlo vistos desde otro marco de referencia; si, por ejemplo,

21 Matemático en el sentido newtoniano

22 La sincronización de relojes distantes es un procedimiento que se hace tomando en cuenta el intervalo de tiempo que demora en viajar una señal luminosa de un lugar al otro, es decir, es un procedimiento que no se hace de manera directa. Una definición de sincronización equivalente –pero más intuitiva– es la siguiente: decimos que los relojes en A y B están sincronizados si los observadores correspondientes los han puesto en marcha en el momento de recibir una señal luminosa que ha sido encendida en el punto medio de la recta que une los puntos A y B (Saavedra, 1999).

simultáneamente a la llegada de los trenes a sus respectivas estaciones se envía una señal luminosa de cada estación hacia la otra, un observador que se encuentre en reposo respecto a ambas estaciones, a la mitad de la distancia entre ellas, recibirá las dos señales simultáneamente, con lo cual deducirá que la llegada de los trenes a las estaciones respectivas fue simultánea, ya que la distancia entre el observador y la primera estación es igual a la distancia entre éste y la segunda estación, con lo cual el tiempo que demora en llegar la señal luminosa de la primera estación al observador, es el mismo que demora en llegar la señal proveniente de la segunda.

Si otro observador que se mueve de la primera estación a la segunda, pasa por la mitad de la distancia entre las estaciones recibiendo las señales luminosas provenientes de éstas, este segundo observador podrá deducir que la señal proveniente de la primera estación fue enviada después de la proveniente de la segunda estación, puesto que la velocidad de la luz, aunque es muy grande, no es infinita, con lo cual concluirá que la llegada del tren a la segunda estación antecede a la llegada del otro tren a la primera estación; siendo así tales eventos, desde su marco de referencia, no son simultáneos.

Es importante señalar dos aspectos fundamentales de la manera como se define el tiempo en la teoría espacial de la relatividad; un primer aspecto es que hablar de tiempo implica necesariamente referirse a la simultaneidad de eventos físicos, lo que sitúa al tiempo categorialmente como tiempo físico; y el segundo, es que se habla del tiempo como aquello que miden los relojes, como Einstein mismo la afirma:

El tiempo de un suceso es el dado simultáneamente con el suceso por un reloj estacionario ubicado en el lugar del suceso; este reloj debe estar sincronizado con un reloj estacionario especificado. ¡El tiempo es, ni más ni menos, lo que mide un reloj! (Eistein, 1922).

En este sentido, el tiempo está relacionado con una métrica que establece un orden de sucesión de eventos, el cual no expresa una relación causal entre los mismo, ya que el orden de sucesión depende de los marcos de referencia, aspecto por el cual la idea de simultaneidad es indispensable para definir el tiempo (Saavedra, 1999). Por otra parte, fijémonos cómo esta teoría no indaga ni establece existencia de un tiempo objetivo, sino simplemente asocia el tiempo con una organización de eventos físicos, que no es manifestación de naturaleza alguna de un tiempo objetivo, sino que es, en sí misma, el tiempo; en este orden de ideas, el tiempo de la relatividad es fenomenológico, en el sentido en que deviene de la experiencia y de la conciencia del individuo, experiencia y conciencia de la simultaneidad o sucesión de eventos.

Es importante llamar la atención sobre el papel fundamental que juega la invariancia de la velocidad de la luz²³ en la definición de tiempo en la teoría especial de la relatividad, ya que la sincronización de relojes distantes se hace mediante señales luminosas, al igual que la determinación de la simultaneidad de eventos que se dan en diferentes lugares (Saavedra, 1999). Pero la invariancia de la velocidad de la luz tiene una implicación importante sobre la medida del tiempo: la *dilatación del tiempo*. Supóngase un reloj ubicado en un marco de referencia que se mueve en una línea recta respecto a otro, en el cual hay un conjunto de relojes estacionarios idénticos y sincronizados entre sí; la teoría de la relatividad demuestra que todo intervalo de tiempo medido en el primer reloj, corresponde a un intervalo de tiempo mayor medido en los relojes estacionarios. Es importante resaltar que son los observadores en reposo respecto del conjunto de relojes estacionarios, los que miden un intervalo de tiempo siempre mayor que el intervalo de tiempo correspondiente medido por el reloj en movimiento. De ahí el nombre de dilatación del tiempo.

Ahora bien, la relatividad del tiempo y la invariancia de la velocidad de la luz implican que el espacio, al igual que el tiempo, sea relativo, puesto que, en la medición que hacen los observadores en reposo respecto del conjunto de relojes estacionarios, no solamente el tiempo se dilata, sino también las longitudes se contraen²⁴. Este último hecho tiene consecuencias trascendentales sobre los conceptos de espacio y tiempo, ya que no es posible separarlos, como se hace en la mecánica de corte newtoniano, sino que se constituyen en un solo concepto, el *espacio-tiempo*, como lo planteara Minkowski²⁵ en el discurso de inauguración de la reunión número 80 de la Asamblea general alemana de científicos naturales y físicos realizada el 21 de septiembre de 1908:

Las ideas sobre el espacio y el tiempo que deseo mostrarles hoy descansan en el suelo firme de la física experimental, en la cual yace su fuerza. Son ideas radicales. Por lo tanto, el espacio y el tiempo por separado están destinados a desvanecerse entre las sombras y tan solo una unión de ambos puede representar la realidad (Minkowski, 1908).

23 La invariancia de la velocidad de la luz consiste en que ésta es independiente del marco de referencia, es decir que el valor de la velocidad de la luz es el mismo en todos los marcos de referencia; esta afirmación es uno de los dos postulados de la Teoría de la Relatividad.

24 La medición de longitudes, al igual que la medición del tiempo, se hace basándose en eventos simultáneos.

25 Hermann Minkowski. 1864-1909. Matemático alemán de origen judío que desarrolló la teoría geométrica de los números. Sus trabajos más destacados fueron realizados en las áreas de la teoría de números, la física matemática y la teoría de la relatividad.

Es de notarse que la teoría de la relatividad, al establecer el concepto de espacio-tiempo, rompe la independencia de estos dos conceptos, con lo cual el tiempo pierde su identidad y se integra con el espacio como una coordenada del espacio-tiempo.

A manera de síntesis se puede decir que el tiempo en la teoría de la relatividad es definido como aquello que miden los relojes, medida que es relativa a los marcos de referencia; el tiempo como medida carece de carácter ontológico, no es una entidad física para situarse como un tiempo físico, un tiempo relativo a los fenómenos físicos. El tiempo como medida está basado en la simultaneidad y en la sincronización, ideas en las cuales la invariancia de la velocidad de la luz juega un papel fundamental; además, esta invariancia no solo afecta la medida del tiempo sino también la del espacio, aspecto que unifica estos dos conceptos como espacio-tiempo, haciendo que no se pueda pensar el tiempo independiente del espacio.

El tiempo en la mecánica cuántica

La mecánica cuántica es otra de las teorías de la física moderna, basada en dos principios fundamentales: el de complementariedad y el de incertidumbre. Pone de manifiesto que el conocimiento deviene de la organización que el sujeto hace de la experiencia, la cual se realiza mediante los modelos que tiene para hacer inteligible el mundo físico (Rueff, 1968). En este sentido, gran parte de la indagación de esta teoría son estos modelos, aspecto que la aproxima ampliamente a la epistemología. El mundo físico que es puesto en juego en la mecánica cuántica, está especialmente relacionado con la explicación a los fenómenos referidos a la interacción materia-energía, de los cuales la experiencia que se tiene son los espectros electromagnéticos, y para dar cuenta de éstos se acude a modelos de estructura de la materia²⁶.

En 1927 Heisenberg estableció una nueva e importante ley que rige los fenómenos físicos: el principio de incertidumbre. Este principio expresa la imposibilidad de conocer un sistema físico, ya que toda observación del mismo implica perturbarlo; ese puede expresar así: es imposible medir simultáneamente y con absoluta precisión la posición en el espacio y la cantidad de movimiento²⁷ de una partícula atómica, por ejemplo de un electrón; es decir, es imposible dar cuenta del estado mecánico del sistema.

26 En general son modelos espacio-temporales.

27 La cantidad de movimiento o *momentum* de un cuerpo es el producto de su masa por la velocidad.

Así, si q representa la coordenada que mide la posición de una partícula y p la cantidad de movimiento correspondiente, entonces, de acuerdo con el principio de incertidumbre, estas variables solo pueden conocerse con imprecisiones, Dq y Dp respectivamente, de tal manera que si se reducen estas imprecisiones al mínimo valor posible, el producto de ambas queda determinado por el valor numérico de una constante universal, esta es la constante h , que recibe el nombre de constante de Planck, la cual expresa la perturbación inherente a la observación. Así se cumple que:

$$Dq \cdot Dp = h$$

La constante de Planck resulta ser un número extraordinariamente pequeño, sin embargo juega en la mecánica cuántica un papel semejante al desempeñado por la velocidad de la luz, en el sentido en que ambas establecen límites a nuestro conocimiento posible de la naturaleza. Supóngase, por ejemplo, que se desea conocer con absoluta precisión la posición de un electrón, lo cual implica la posibilidad de diseñar un experimento que permita hacer esta medición, es decir, medir la coordenada q con una imprecisión Dq nula, es decir, $Dq = 0$. Pero entonces, en virtud del principio de incertidumbre, se pierde automáticamente toda información acerca de su cantidad de movimiento, ya que para satisfacer la ecuación en esas condiciones es necesario que Dp se haga infinito para poder obtener la constante de Planck; así pues, conocer una cantidad con imprecisión infinita es equivalente a no conocerla. De acuerdo con este principio, la medición exacta de una variable implica perder toda información de la otra; así, es privilegio del observador elegir qué variable desea conocer con certeza absoluta, pero esta elección es siempre doble: elige qué conocer, pero al mismo tiempo elige qué no conocer. Así la incertidumbre implica un conocimiento limitado del mundo físico. Dicha limitación es, en sí misma, una ruptura epistemológica con la física clásica, en el sentido en que rompe con el determinismo característico de la mecánica clásica, teniendo como efecto que no haya determinismo en las descripciones de la mecánica cuántica (Dirac, 1930), aspecto que hace necesario incluir la probabilidad, cuya consecuencia es el carácter probabilístico de las descripciones de la mecánica cuántica. Es importante poner de manifiesto que la incertidumbre no se refiere a una condición de la naturaleza, sino a una condición del conocimiento humano, aspecto que expresa el carácter epistemológico de las relaciones de incertidumbre.

Dentro de las relaciones de incertidumbre se encuentra la que introduce la energía del sistema en un tiempo determinado, $DE Dt = h$. En este caso, el Dt no hace referencia a la incertidumbre de la medición del tiempo, lo cual no daría información acerca del estado del sistema, puesto que el tiempo

no es una variable de estado, sino que está relacionado con la evolución del sistema; es decir, para una dispersión DE de energía, el tiempo Dt es un tiempo que mide el ritmo de evolución del propio sistema, y que es característico del mismo. Como ya se señaló, en la mecánica cuántica no hay determinismo en el sentido clásico, y lo que se predice es la probabilidad de que la medición de una cualidad observable del sistema dé como resultado alguno de los valores posibles de la variable de estado, los cuales están dentro de un conjunto que caracteriza la propiedad observada²⁸. La distribución estadística de resultados probables en general varía con el tiempo; así, el Dt que aparece en la relación de incertidumbre da cuenta del tiempo requerido para que esta distribución se encuentre notablemente modificada, es decir, el tiempo en que la evolución ha modificado el sistema mismo.

Nótese que en el caso de la mecánica cuántica, el tiempo está ligado a la evolución del sistema, la cual es entendida en términos de variación de la distribución estadística del conjunto de los estados posibles de un sistema, aspecto que implica que la información que se pueda obtener al observar un sistema varía en las diferentes observaciones que se hagan. Además, en cada observación se obtiene una única distribución, es decir, cada medición da cuenta de un estado, en el que queda el sistema después de ser observado. En este contexto, la idea de evolución del sistema es una forma de organización que hace el sujeto, de las diferentes observaciones que pueda realizar del sistema; esto es, organiza los estados del sistema en una secuencia, que no expresa un orden de sucesión causal²⁹, sino la organización misma que hace el sujeto de la experiencia –referida esta a la interacción entre sujeto y objeto–. Así, la evolución del sistema como forma de organización de la experiencia, se instaura al tiempo como una estrategia adoptada por el sujeto para hacer inteligible en mundo físico, aspecto por el cual el tiempo adquiere un carácter epistemológico en la mecánica cuántica.

Es importante resaltar que los conceptos de estado y evolución presentes en la mecánica cuántica son diferentes a los de la física clásica, no en su significado³⁰, sino en que mientras para la física clásica el estado es un aspecto que caracteriza al sistema físico observado, es decir, lo identifica en cuanto a los cambios que puede experimentar, y la evolución identifica la manera como se dan los cambios del sistema, en mecánica cuántica estos dos conceptos son expresión de la estrategia de organización de la experiencia que tiene el sujeto; esto significa que son una muestra de la

28 El conjunto de valores propios de la variable de estado.

29 Causal en el sentido clásico.

30 Estado. Forma de estar de un sistema en relación con una cualidad. Evolución. Proceso de cambio irreversible del estado del sistema.

manera como el sujeto conoce, por lo cual su carácter es epistemológico. El siguiente esquema recoge algunas de las ideas expuestas anteriormente.

Algunas consideraciones finales

El recorrido que se hizo por las distintas teorías de la física –y algunas otras que tienen relación con ésta– permite hacer una síntesis de las concepciones acerca del tiempo que se encuentran en la física; también hace posible ver cómo el tiempo desempeña diferentes papeles en las teorías, además de encontrarse una diversidad de conceptos para el mismo. Esta reflexión muestra cómo el tiempo se encuentra en el núcleo de las teorías como un concepto estructurante de las mismas, aspecto que puede ser entendido como la muestra de la obviedad del tiempo en la vida humana, pero que a su vez revela paradójicamente la complejidad que reviste tratar de comprenderlo plenamente, como afirmaba San Agustín, de quien se dice fue el primero en experimentar las dificultades de la pregunta por el tiempo: *“el tiempo nos es de sobra conocido mientras nadie decida poner a prueba nuestra comprensión de él”* (Husserl, 1928); más aun, la filosofía contemporánea le da una especial relevancia a la noción de tiempo, de igual manera que las teorías científicas actuales no se abstraen de la preocupación de asirlo y de por fin desentrañarlo.

Por otra parte, la diversidad de conceptos de tiempo que se encuentra en las teorías de la física, puede ser entendida también como una diversidad categorial, ya que estos conceptos permiten categorizar el tiempo de maneras diversas así: el tiempo absoluto de la mecánica newtoniana como un tiempo ontológico, en el sentido de ser una entidad del mundo físico; el tiempo relativo de la mecánica newtoniana, un tiempo físico relativo al movimiento, particularmente a los movimientos cíclicos de los planetas, que lo liga a una métrica; igualmente el tiempo de la teoría de la relatividad es un tiempo físico, en el sentido de ser el tiempo de los eventos que se manifiesta en lo que miden los relojes, inseparable del espacio, que a su vez es también físico; el tiempo físico de los procesos termodinámicos, que se constituye en un tiempo histórico en el momento en que se le atribuye dirección y se le da el carácter de irreversible, aspecto que lo vincula con la idea de evolución; y por último, el tiempo de carácter epistemológico de la mecánica cuántica, vinculado a las formas de organización de la experiencia de los sujetos.

Esta diversidad de conceptos y categorías acerca del tiempo, que se evidencia en las diferentes teorías de la física, muestra el carácter polisémico del mismo, ya que su significado está en estrecha relación con los contextos

teóricos en los cuales se encuentra, sin dejar de lado el hecho de que las teorías están ancladas en un contexto de significación más amplio que está dado por las condiciones históricas y culturales que posibilitaron la constitución de las mismas, su difusión y validación. Este último punto llama la atención sobre la relación entre tiempo y cultura, de la cual las ciencias naturales no se pueden escapar por el carácter cultural de las ciencias (Elkana, 1983; Castillo, 2008).

La revisión que se hizo acerca del concepto de tiempo en las teorías de la física –y en otras teorías que pueden ser relacionadas con ésta– no solamente pone de manifiesto la complejidad de la pregunta por el tiempo, complejidad que sigue presente aunque se reduzca el ámbito de indagación a algunas de las teorías de la física. La reflexión que se hace alrededor del tiempo en la física, llama la atención sobre la importancia de no dejar de lado la discusión acerca del tiempo en la enseñanza de las ciencias en general, y de la física en particular, ya que por no haber un único concepto y forma de categorizar el tiempo en las ciencias naturales, se hace necesario abordarlo como temática de estudio con el fin de ampliar la comprensión de las teorías y establecer un **diálogo más significativo de éstas con los problemas de enseñanza** que son abordados en la clase de ciencias.

Por último, la revisión hecha en relación con el concepto de tiempo en la física, pone de manifiesto el carácter polisémico del tiempo en las ciencias, como se había mencionado, aspecto que puede ser una muestra de la polisemia del concepto en sí; sus múltiples significados y formas de categorización –no solo en las ciencias– varían de acuerdo con los contextos culturales (Ricoeur, P.; Larre, C.; Panikkar, R.; Kagame, A.; Lloyd, G.; Neher, A.; Pattaro, G.; Gardet, L.; Gouveritch, A., 1975), siendo esto un elemento que llama aun más la atención sobre la importancia de su abordaje en las clases de ciencias, las cuales pueden ser consideradas un espacio de encuentro de individuos que tienen diferencias culturales, dentro de las cuales la idea de tiempo puede constituirse en una de ellas; o sencillamente la o las ideas de tiempo de los estudiantes pueden no estar en resonancia con las de las ciencias, por lo cual abordar y explicitar los múltiples conceptos de tiempo es de vital importancia para la enseñanza de las ciencias como actividad de construcción de significados en relación con el mundo natural.

Bibliografía

- Ayala, M.; Malagón, F.; Castillo, J. C. y Garzón, M. (2003). *La elasticidad y la perspectiva de estados*. Anales VIII Conferencia Interamericana sobre Educación en la Física. Habana: Universidad de la Habana.
- Bachelard, G. (1999). *La intuición del instante*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Berkson, W. (1981). *Las teorías de los campos de fuerza desde Faraday hasta Einstein*. Madrid: Alianza.
- Bruner, J. (1993). *Derecha e izquierda: dos maneras distintas de activar la imaginación*. Madrid, España: Alianza.
- Castillo, J. C. (2004). *El concepto de corriente y la perspectiva dinámica*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional. Facultad de Ciencia y Tecnología. Departamento de física.
- _____ (2009). *La historia de las ciencias y la formación de maestros: la recontextualización de saberes como herramienta para la enseñanza de las ciencias*. Nodos y Nudos (25), 73.
- _____ (2006). *Sobre la relación mecánica electromagnetismo (De los fenómenos mecánicos al mecanismo)*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional. Departamento de Física.
- Cohen, B. (1983). *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas*. Madrid, España: Alianza.
- Dirac, P. (1930). *Principios de mecánica cuántica*. Barcelona, España: Ediciones Ariel.
- Eistein, A. (1922). *Sobre la teoría especial y la teoría general de la relatividad. El significado de Relatividad*. Madrid España: Planeta Agostini.
- Elkana, Y. (1983). La ciencia como sistema cultural: Una aproximación antropológica. En: *Boletín Sociedad Colombiana de Epistemología*, 65-80.
- Force, J. E. y Popkin, R. H. (1999). *Newton and religion. Context and influence*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Friedman, M. (1983). *Fundamentos de las teorías del espacio-tiempo*. L. Bou (Trad.). Madrid: Alianza.
- Geertz, C. (1992). *La interpretación de las culturas*. Barcelona, España: Gedisa.

- Groot, S. R. (1968). *Termodinámica de los procesos irreversibles*. Madrid, España: Alambra, S. A.
- Gutiérrez, C. (2006). La flecha del tiempo. En: *Ciencia ergo sum*, 13 (3), 246-252.
- Heidegger, M. (1995). *El concepto de tiempo*. Madrid: Mínima trota.
- _____ (1927). *El ser y el tiempo*. México-Madrid-Buenos aires: Fondo de Cultura Económica.
- Hertz, H. (1899). *Los principios de la mecánica*. New York: Dover Publications.
- Hervé, F. (1999). Estudios [El tiempo en un geólogo]. En: *Anales de la Universidad de Chile*, Sexta serie (9).
- Husserl, E. (1928). *Lecciones de fenomenología de la conciencia interna del tiempo*. Madrid: Trotta.
- Kant, I. (1781). *Crítica de la razón pura*. P. Rivas (Trad.). Madrid: Alfaguara.
- Kunh, T. (1970). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Loemker, L. (1956). *Leibniz, G. W., Philosophical Papers and Letters*. Boston: D. Reidel Publishing Co.
- Mach, E. (1949). *Desarrollo histórico-crítico de la mecánica*. Buenos Aires: Espasa.
- Martins, A. (2004). *Concepcoes de estudantes acerca do conceito do tempo: uma análise á luz da epistemologia de Gaston Bachelard*. Sao Paulo, Brasil: U. d. Educacao, Ed.).
- Martins, A. F. P. y Pacca, J. L. A. (2005). *Crian do um "Instrumento teórico" para análise de concepcoes a cerca do tempo, a partir da epistemologia de gaston Bachelard*. Sao Paulo, Brasil: Departamento de Educação, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, UFRN.
- Martins, A. F. P. y Zanetic, J. (2002). **O Tempo na mecânica: de coadjuvante a protagonista**. En: *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 2 (19), 149-175.
- Mashaal, M. (1995). El tiempo en física. En: *Mundo Científico*, 14 (143).
- Minkowski, H. (1908). Discurso inaugural de la 80ª Reunión de la Asamblea general Alemana de científicos naturales y físicos.
- Mojica, L. y Molina, A. (2004). Las teorías de la evolución en los textos escolares: análisis crítico histórico-epistemológico de Philipp Mathy. En: *Cuadernos de investigación*, 69-91.

- Molina, A. (2004). Investigaciones acerca de la enseñanza, el aprendizaje y los textos escolares en la evolución de la vida: enfoques culturales. En: *Cuadernos de investigación*, 9-31.
- Newton, I. (1687). *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Barcelona, España: Alianza.
- Olaya, S. (2007). *Memorias IV Coloquio latinoamericano de fenomenología "Fundadores de la Fenomenología"*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Orellana, O. (2003). El tiempo como el orden subyacente e implicado en el espacio y el lenguaje. Una reflexión desde Zubiri y las ciencias. En: *Cuaderno del seminario 3*. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María Chile 89.
- Panza, M. (2002). Newton et les origines de l'analyse: 1664-1666. En: *Hyper Articles en Ligne*. Disponible en: <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/11/67/44/PDF/MsPr.pdf>, 1 (27).
- Pedrerros, R. y Castillo, J. C. (2007). La organización de los fenómenos térmicos. Módulo de trabajo. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional. Facultad de ciencia y Tecnología. Departamento de Física.
- Piaget, J. y García, R. (1982). *Psicogénesis e historia de las ciencias*. México: Siglo XXI Editores.
- Plank, M. (1945). *Treatise on thermodynamics*. New York, USA: Dover.
- Prigogine, I. (2001). *El fin de las certidumbres*. España: Taurus.
- _____ (1999). *Las leyes del caos*. Barcelona: Crítica.
- Rada, E. (1980). *La polémica Leibnitz-Clarke*. Madrid: Taurus.
- Reichenbach, H. (1956). *The direction of time*. Berkeley: University of California Press.
- _____ (1958). *The philosophy of space and time*. New York: Dover.
- Ricoeur, P.; Larre, C.; Panikkar, R.; Kagame, A.; Lloyd, G.; Neher, A.; Pattaro, G.; Gardet, L. y Gouveritch, A. (1975). *Las culturas y el tiempo. Estudios resumidos para Unesco*. Sao Paulo: Vozes, Editorial de la Universidad de Sao Paulo.
- Rivarola, J. (1994). *La no existencia física del tiempo: revelación de un enigma milenario*. Asunción: Imprenta salesiana.
- Rueff, J. (1968). *Visión cuántica del universo*. Madrid, España: Guadarrama.
- Saavedra, I. (1999). El tiempo en la física. En: *Annales de la Universidad de Chile*.

- Salazar, J. (2009). *Jerome Bruner: mente conocimiento y cultura*. Medellín: Universidad de Antioquía. Instituto de Filosofía.
- Sánchez, J. M. (2007). Einstein y la filosofía del siglo XX. En: *ARBOR Ciencia, pensamiento y Cultura*. Disponible en: arbor.revistas.csic.es/index.php/arbor/article/download/147/147
- Wheeler, J. A. (1990). *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Madrid: Alianza.
- Whitrow, G. (1993). *O Tempo na história: concepções do tempo da pré-história aos nossos dias*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 2005 (tradução da 1a. edição inglesa, *What is time? The classic account of the nature of time*, Oxford University Press, de 1972).