

## El principio de invarianza y su comprobación experimental

### The principle of invariance and its experimental verification

Julio R. Mairena Gómez <sup>a</sup>, Holvin E. Padilla Melgara <sup>b</sup>, Clifford J. Herrera Castrillo <sup>c</sup>

#### Abstract:

This essay focuses on presenting the principle of invariance and its implications for the development of modern physics, as well as its usefulness and application in everyday devices. The precursors of this principle are presented, as well as its relationship to Einstein's theory of relativity. Furthermore, the experiments and demonstrations that established their existence are discussed; in accordance with Special Relativity, this principle reaffirmed that the laws of physics are the same in all reference frames. However, regarding its implications within the framework of physical theories, this principle revolutionized the way we observe the universe, reorganizing and reading concepts that were previously taken for granted. Its implementation in satellite navigation is one of the most notable advancements of this principle in conjunction with the Special Theory of Relativity.

#### Keywords:

Invariance, Relativity, Experimentation, Principle

#### Resumen:

El presente ensayo está centrado en presentar el principio de invarianza y sus implicaciones en el desarrollo de la Física Moderna, así como su utilidad y aplicación en dispositivos de uso diario. Se presentan los precursores de este principio, así como su relación con la relatividad de Einstein, por otro lado, se muestra las experimentaciones y demostraciones que se realizaron las cuales fundamentaron la existencia de éste, en concordancia con la Relatividad Especial este principio reafirmo que las leyes de la física son iguale en todos los marcos de referencia. En cambio, con respecto a sus implicaciones en el marco de las teorías de la Física, este principio permitió revolucionar la forma de observar el universo, reorganizando y readaptando conceptos que se daban por sentado, su implementación en la navegación satelital es uno de los avances más notorios de este principio en conjunto con las Teoría Especial de la Relatividad.

#### Palabras Clave:

Invarianza, Relatividad, Experimentación, Principio

### Introducción

El presente ensayo se centra en el análisis del principio de invarianza, abordando su origen histórico y sus principales implicaciones en la ciencia contemporánea. Este principio tiene sus bases en los aportes de Galileo Galilei en el siglo XVII, quien, mediante observaciones y experimentos mentales, estableció que un mismo fenómeno puede ser interpretado de manera distinta por diferentes observadores, dependiendo del marco de referencia

inercial en el que se encuentren (Ortuño Blandón et al., 2025; Cuevas, 2017). En este sentido, como señala Tomé López (2017), los experimentos mentales de Galileo — como el del movimiento de objetos dentro de un barco en desplazamiento uniforme— evidencian que no es posible distinguir, a través de experimentos mecánicos internos, si un sistema se encuentra en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme, ya que los fenómenos ocurren de igual manera en ambos casos.

<sup>a</sup> Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua) | Centro Universitario Regional Estelí (CUR-Estelí) | Estelí-Estelí | Nicaragua, <https://orcid.org/0009-0004-8125-5714>, Email: mairenajulio784@gmail.com

<sup>b</sup> Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua) | Centro Universitario Regional Estelí (CUR-Estelí) | Estelí-Estelí | Nicaragua, <https://orcid.org/0009-0004-1931-6336>, Email: padillaholbin@gmail.com

<sup>c</sup> Autor de Correspondencia, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua) | Centro Universitario Regional Estelí (CUR-Estelí) | Estelí-Estelí | Nicaragua, <https://orcid.org/0000-0002-7663-2499>, Email: cliffor.herrera@unan.edu.ni

Posteriormente, este planteamiento fue ampliado por Albert Einstein mediante el principio de la relatividad, también conocido como principio de invarianza, el cual establece que todas las leyes de la física deben mantenerse invariantes en todos los marcos de referencia inerciales (López et al., 2025). De acuerdo con Cervantes-Cota y Rodríguez-Meza (2006), este principio implicó una revisión profunda de las teorías físicas existentes, planteando la necesidad de modificar las leyes clásicas para garantizar su coherencia con los fenómenos electromagnéticos descritos por Maxwell. En este contexto, Einstein optó por reformular la mecánica newtoniana, preservando la validez de las ecuaciones del electromagnetismo (Báez-Obando et al., 2024; Vásquez-Muñoz et al., 2025).

En la actualidad, las implicaciones del principio de invarianza trascienden el ámbito teórico, manifestándose en múltiples aplicaciones tecnológicas y científicas. Su influencia se evidencia en el desarrollo de instrumentos modernos y en la comprensión de fenómenos fundamentales del universo, consolidándose como uno de los pilares esenciales de la física moderna.

El valor distintivo de este trabajo radica en la integración de fundamentos teóricos, evidencia experimental y aplicaciones tecnológicas actuales, presentadas desde una perspectiva accesible para la divulgación científica, lo que permite acercar conceptos complejos de la física moderna a un público más amplio.

## Desarrollo

El principio de invarianza se fundamenta en la idea de que las leyes que rigen los fenómenos físicos permanecen constantes en cualquier sistema de referencia inercial, independientemente de si este se encuentra en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme. Este planteamiento constituye el eje central del primer postulado de la Teoría de la Relatividad Especial de Albert Einstein, el cual establece que "las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales" (Alva Castillo & Maco Vásquez, 2024). En consecuencia, ningún experimento físico realizado dentro de un sistema aislado puede determinar si dicho sistema está en reposo absoluto o en movimiento uniforme, lo que reafirma la inexistencia de un sistema de referencia privilegiado.

En este sentido, los postulados de la Relatividad Especial consolidan y amplían el principio de invarianza, al proponer que no solo las leyes mecánicas, como sugería Galileo, sino también las leyes del electromagnetismo deben ser invariantes en todos los marcos inerciales. Tal como menciona Cesín Gorostieta (2023), la relatividad

establece que las leyes de la física se conservan en todos los sistemas de referencia, lo cual se conoce como principio de relatividad. Este enfoque implicó una transformación profunda en la comprensión del espacio y el tiempo, al abandonar la noción clásica de magnitudes absolutas y dar paso a una concepción relativa, donde dichas magnitudes dependen del observador.

A partir de esta reformulación, se derivan consecuencias fundamentales, como la dilatación del tiempo, la contracción de la longitud y la equivalencia entre masa y energía, expresada en la conocida relación  $E = mc^2$ . Estos resultados evidencian que las mediciones de tiempo y espacio no son universales, sino que dependen del estado de movimiento del observador, manteniéndose inalterables únicamente las leyes físicas que describen dichos fenómenos.

Asimismo, el principio de invarianza ha tenido un impacto significativo en el desarrollo de la física moderna, ya que permitió unificar criterios en la descripción de fenómenos y sentó las bases para teorías posteriores (Portilla – Flores et al., 2025; Lopez, 2025). Su aplicación no se limita al ámbito teórico, sino que también se manifiesta en tecnologías actuales, como los sistemas de posicionamiento global (GPS), donde es necesario considerar efectos relativistas para garantizar la precisión en las mediciones. De este modo, el principio de invarianza no solo representa un avance conceptual, sino también una herramienta esencial para la comprensión y aplicación de la ciencia en la vida cotidiana.

## Invarianza de Lorentz

La invarianza de Lorentz se refiere a la propiedad según la cual las leyes fundamentales de la física conservan su forma al ser expresadas en diferentes sistemas de referencia inerciales relacionados mediante transformaciones de Lorentz (Méndez López et al., 2025). Este principio no solo reafirma la validez universal de dichas leyes, sino que también introduce una nueva estructura en la forma de describir el espacio y el tiempo, integrándolos en un marco común que depende del estado de movimiento del observador.

Desde una perspectiva histórica, la formulación de este principio respondió a la necesidad de reconciliar resultados experimentales con el marco teórico existente. En particular, la incompatibilidad entre las predicciones de la mecánica clásica y el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos llevó a replantear los supuestos tradicionales sobre el espacio y el tiempo. Así, las transformaciones de Lorentz sustituyeron a las transformaciones de Galileo, al proporcionar un modelo coherente en el que la velocidad de la luz permanece

constante y las leyes físicas mantienen su invariancia (Cesín Gorostieta, 2023).

En términos conceptuales, la invarianza de Lorentz implica que magnitudes como el intervalo espacio-temporal permanecen invariantes, aun cuando las coordenadas espaciales y temporales cambien entre observadores (Pascua Ramón, 2024). Esto supone un cambio profundo en la interpretación de la realidad física, ya que las medidas de longitud y tiempo dejan de ser absolutas y pasan a depender del sistema de referencia. Sin embargo, a pesar de estas variaciones, las relaciones físicas esenciales permanecen inalteradas, garantizando la consistencia de las leyes naturales.

De esta manera, la invarianza de Lorentz no solo constituye un principio matemático, sino también un fundamento epistemológico que redefine la forma de construir conocimiento en física (Garay, 2023). Su incorporación marcó el tránsito de una visión clásica a una moderna, en la que la objetividad científica ya no reside en las magnitudes observadas de forma aislada, sino en las leyes que permanecen invariantes frente a diferentes perspectivas del observador.

### El experimento de Michelson y Morley

Uno de los experimentos más influyentes en el desarrollo de la física moderna es el realizado por Albert Michelson y Edward Morley, cuyo objetivo principal era detectar el denominado “viento de éter”, entendido como el medio hipotético a través del cual se propagaba la luz. Para ello, Michelson diseñó un dispositivo experimental conocido como interferómetro, basado en un sistema de espejos y un divisor de haz semitransparente. Este dispositivo permitía dividir un rayo de luz en dos trayectorias perpendiculares; posteriormente, ambos haces eran reflejados por espejos y recombinados, generando un patrón de interferencia observable mediante un telescopio.

Tal como se muestra en la Figura 1, el principio de funcionamiento del interferómetro consistía en comparar los tiempos de recorrido de los dos haces de luz. Si el éter existiera, se esperaba detectar diferencias en dichos tiempos debido al movimiento de la Tierra a través de este medio, lo que produciría variaciones en el patrón de interferencia. Sin embargo, los resultados obtenidos fueron negativos. Según señalan Martín del Rey y Martín del Rey (2010), “al juntar los dos rayos y observar el patrón de interferencia obtenido, el interferómetro dio un resultado negativo, es decir, no había pruebas de la existencia del éter” (p. 1).

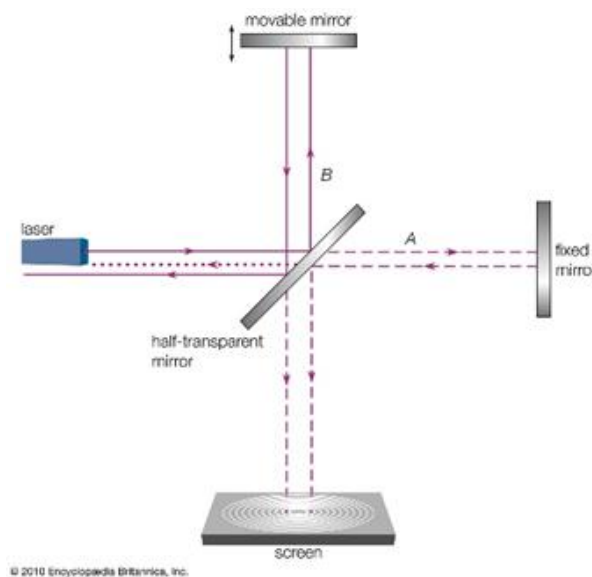


Figura 1. Experimento de Alberth Michelson y Edward Morley.

Este resultado representó un punto de inflexión en la física, ya que contradecía directamente las expectativas de la teoría clásica, la cual asumía la existencia de un medio absoluto para la propagación de la luz. La imposibilidad de detectar el éter evidenció limitaciones en los modelos teóricos vigentes y planteó la necesidad de una nueva interpretación de los fenómenos físicos (Herrera-Castrillo, 2024).

En este contexto, Einstein propuso un cambio conceptual profundo al interpretar el resultado nulo no como un error experimental, sino como una evidencia fundamental: la velocidad de la luz es constante e independiente del movimiento del observador. Para que esta afirmación fuera compatible con el principio de relatividad, fue necesario sustituir las transformaciones de Galileo por las transformaciones de Lorentz. De este modo, la invarianza de Lorentz emergió como un principio clave para explicar coherentemente los resultados experimentales.

En consecuencia, el experimento de Michelson y Morley no solo refutó la existencia del éter, sino que también impulsó una transformación radical en la física, generando un intenso debate en la comunidad científica de la época y sentando las bases para el desarrollo de la relatividad moderna.

### Los Muones y la dilatación temporal

Según Pivetta (2021), el muón es un leptón cargado como el electrón, pero tiene una masa 206,77 veces mayor. El electrón es estable (hasta donde sabemos), pero el muón es inestable y se desintegra (en reposo) en un electrón en solo 2,2  $\mu$ s. Aun viajando a velocidades relativistas, clásicamente apenas recorrerían 660 metros antes de

desintegrarse, lo que haría imposible que alcanzaran la superficie terrestre. Sin embargo, se detectan en abundancia. Desde el marco de referencia de la Tierra, su "reloj interno" o vida media se dilata debido a las transformaciones de Lorentz, lo que les permite completar el trayecto.

Tal como se muestra en la Figura 2, el proceso de desintegración del muón ilustra este fenómeno relativista, evidenciando cómo el tiempo no es absoluto, sino dependiente del sistema de referencia.

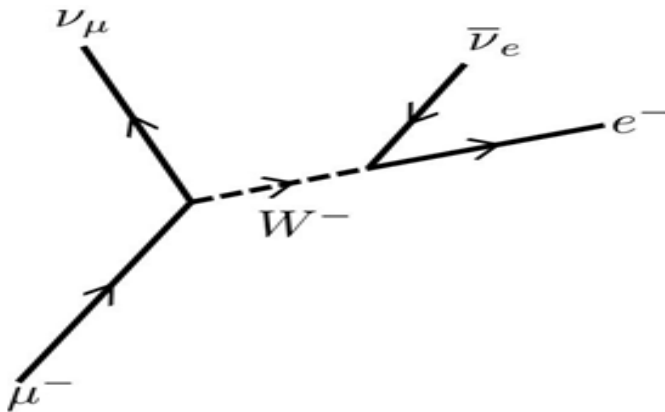


Figura 2. Proceso de desintegración de un muón.

El hecho de que la detección de estas partículas sea frecuente, en contraste con lo que predice la física clásica (Vilchez-Ruiz et al., 2026), constituye una evidencia directa de que el intervalo de tiempo no es absoluto, sino que se transforma conforme a lo establecido por la invarianza de Lorentz.

### El momento relativista en el LHC

El momento relativista es fundamental para comprender por qué la velocidad de la luz representa un límite físico. Su formulación permite determinar la fuerza necesaria para acelerar una partícula a velocidades cercanas a la de la luz. A diferencia del momento clásico, el momento relativista incorpora los efectos de la relatividad especial, lo que explica el comportamiento de las partículas en condiciones extremas (Cuevas, 2017).

En aceleradores de partículas como el LHC, el haz de protones es guiado mediante campos magnéticos. La fuerza requerida para curvar la trayectoria de una partícula depende de su momento relativista ( $p = \gamma mv$ ). El incremento significativo del factor  $\gamma$  a velocidades cercanas a  $c$  implica que el momento es considerablemente mayor que el previsto por la mecánica clásica (Altamirano & Rivera, 2024).

La necesidad de realizar cálculos complejos, donde pequeñas variaciones adquieren gran relevancia debido al

factor de Lorentz, constituye una evidencia clara de la validez de la invarianza en la relatividad. En este contexto, el factor  $\gamma$  resulta crucial para describir con precisión los fenómenos físicos mediante modelos matemáticos de alta complejidad.

### La velocidad de la luz como constante

De acuerdo con el segundo postulado de la Teoría Especial de la Relatividad de Einstein, "la luz viaja en el vacío con la misma velocidad  $c$  en cualquier dirección en todos los marcos inerciales" (López et al., 2025). Este principio implica que la velocidad de la luz es independiente del movimiento de la fuente emisora o del observador.

Por ejemplo, la luz emitida por partículas cargadas que se desplazan a velocidades cercanas a  $c$ , como ocurre en fenómenos astrofísicos (púlsares), llega a la Tierra manteniendo dicha velocidad constante. Esto confirma la invarianza de  $c$  en contextos observables y cuantificables. En consecuencia, no importa si la fuente se encuentra en reposo o en movimiento relativista respecto al observador; la velocidad medida de la luz permanece invariable.

Más allá de los experimentos de laboratorio o de escala cósmica, la tecnología moderna proporciona una validación práctica de estos principios. El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) requiere correcciones relativistas para garantizar su precisión. Los relojes atómicos en los satélites, al moverse a alta velocidad y encontrarse en un campo gravitacional distinto, experimentan variaciones temporales que, de no corregirse, generarían errores significativos en la localización.

En este sentido, como señalan Alva Castillo & Maco Vásquez (2024), los efectos combinados de la relatividad especial y general provocan diferencias temporales medibles entre los relojes de los satélites y los de la superficie terrestre. Sin dichas correcciones, el sistema acumularía errores de varios kilómetros por día.

De este modo, tanto la evidencia experimental como las aplicaciones tecnológicas confirman que la invarianza de Lorentz no es únicamente un constructo teórico, sino un principio fundamental que describe con precisión la realidad física.

Los resultados y fundamentos presentados coinciden con lo expuesto por Cervantes-Cota y Rodríguez-Meza (2006), quienes destacan que la invariancia de las leyes físicas constituye un eje estructural de la relatividad moderna. No obstante, a diferencia de enfoques más teóricos, el presente trabajo enfatiza la validación

experimental mediante casos como los muones y el sistema GPS, lo que permite evidenciar la aplicabilidad del principio en contextos reales. En este sentido, se amplía la discusión al integrar ejemplos contemporáneos que fortalecen la comprensión didáctica del concepto.

Sin embargo, algunos estudios abordan la invariancia desde un enfoque estrictamente matemático, limitando su comprensión en contextos educativos. En contraste, este ensayo propone una visión integradora que articula teoría, experimentación y aplicación tecnológica, lo cual resulta fundamental para la enseñanza de la física moderna en educación superior.

Estos hallazgos permiten reflexionar sobre la necesidad de fortalecer estrategias didácticas que vinculen los principios abstractos con evidencias experimentales, favoreciendo un aprendizaje significativo en estudiantes de ciencias e ingenierías.

### Conclusiones

El principio de invarianza se consolida como uno de los fundamentos esenciales de la física moderna, al establecer que las leyes físicas mantienen su validez en todos los marcos de referencia inerciales. Este planteamiento, iniciado por Galileo y formalizado por Einstein, permitió superar las limitaciones de la física clásica, dando paso a una nueva comprensión del espacio y el tiempo como magnitudes relativas y no absolutas.

A lo largo del desarrollo del ensayo, se evidenció que la invarianza de Lorentz no solo representa un constructo teórico, sino que posee un sólido respaldo experimental. Experimentos como el de Michelson y Morley demostraron la inexistencia del éter y abrieron el camino hacia una reinterpretación de la propagación de la luz, mientras que fenómenos como la dilatación temporal observada en los muones constituyen una confirmación directa de las predicciones relativistas en contextos naturales.

La articulación entre teoría y aplicaciones, como el sistema GPS y los aceleradores de partículas, posiciona este trabajo como un recurso útil tanto para la enseñanza como para la comprensión de fenómenos físicos en contextos reales, especialmente en áreas de ingeniería y tecnología.

Asimismo, el análisis del comportamiento de partículas en aceleradores y la constancia de la velocidad de la luz refuerzan la validez universal de este principio, mostrando que las leyes físicas no dependen del observador, sino que se mantienen invariantes bajo transformaciones adecuadas. Esto implica un cambio epistemológico

profundo, en el cual la objetividad científica se fundamenta en la invariancia de las leyes y no en la percepción individual de los fenómenos.

En consecuencia, el principio de invarianza no solo transformó la manera de entender el universo, sino que también se constituye como un eje articulador entre la teoría y la evidencia experimental. Su vigencia en la física contemporánea confirma que las transformaciones de Lorentz describen con precisión la realidad, consolidando este principio como una base indispensable para el desarrollo científico y tecnológico actual.

### Referencias

- Altamirano, F., & Rivera, E. (2024). Experimentación y demostración de los postulados de Broglie y las propiedades ondulatorias de las partículas a través de simuladores virtuales. (Tesis de grado para optar a Licenciado en educación con mención en física-matemática). [Tesis de Grado. UNAN-Managua/CUR-Estelí]. UNAN-Managua/CUR-Estelí, Estelí, Nicaragua. Obtenido de <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/22185>
- Alva Castillo, G. S., & Maco Vásquez, W. (2024). Leyes de conservación de la masa y del momento para un fluido ideal en el marco inercial de la relatividad especial. *SCIENDO INGENIUM*, 20(3), 23-38. <https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2024.03.02>
- Báez-Obando, D. F., Rivera-Rivera, D. F., Centeno-Centeno, F. J., & Herrera Castrillo, C. J. (2024). Explorando la Magnetización de Fluidos: Un Enfoque Interactivo con Electromagnetismo y Simuladores Virtuales. *Educación Superior*(37), 91-108. <https://doi.org/10.56918/es.2024.i37.pp91-108>
- Cervantes-Cota, J., & Rodríguez-Meza, M. (2006). La Teoría de la Relatividad: ayer y hoy. *CIENCIA ergo-sum*, 13(3), 253-264. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5167023>
- Cesín Gorostieta, R. (2023). Estudio de Invariancia de Lorentz con el Observatorio de Rayos Gamma HAWC. [Tesis de maestría]. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Obtenido de [https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/2497/1/CESINGR\\_MA.pdf](https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/2497/1/CESINGR_MA.pdf)
- Cuevas, G. (2017). Relatividad General - Una explicación. *Temas Nicaragüenses*, 1(113), 144-163. Obtenido de <https://www.bionica.info/Biblioteca/RTN/rtn113.pdf#page=145>
- Garay, F. J. (2023). "Caminos geométricos" en el espacio bidimensional de Minkowski para obtener las transformaciones de Lorentz y sus consecuencias. *Revista de la Escuela de Física*, 11(1), 114-126. <https://doi.org/10.5377/ref.v11i1.16825>
- Herrera-Castrillo, C. J. (2024). Práctica pedagógica en mecánica relativista: enfoques, estrategias y su impacto educativo. *Wani*, 40(80), 4-22. <https://doi.org/10.5377/wani.v40i80.17642>
- Lopez, C. (2025). ¿Qué significa "invertir el tiempo" en física? *Culturas Científicas*, 6(1), 18-40. <https://doi.org/10.35588/cc.v6d7828>
- López, L. J., Rivera, R. E., Carrasco, S. d., & Herrera, C. J. (2025). Guía de aprendizaje una alternativa para la enseñanza de la Relatividad de la Simultaneidad. *Revista Científica Estelí*, 14(54), 11-130. <https://doi.org/10.5377/esteli.v14i54.20780>

- Martín del Rey, M., & Martín del Rey, Á. (2010). La influencia del experimento de Michelson y Morley en la teoría de la relatividad. *Ciencias*, 94(94), 5-11. Obtenido de <https://revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/14846>
- Méndez López, H. A., Quiroz González, O. E., Gaitán Rizo, H. J., & Herrera-Castrillo, C. J. (2025). Metodología Activa Novedosa para la evaluación por competencia en el aprendizaje de las Ecuaciones de Lorentz (MANPEC). *Revista Oratores*, 1(22), 39-55. <https://doi.org/10.37594/oratores.n22.1721>
- Ortuño Blandón, A. I., Ferrufino Amador, E. A., Herrera Castrillo, C. J., & López Maradiaga, E. O. (2025). Cuento didáctico: un camino hacia la relatividad desde un modelo por competencias. *Educación Superior*(39), 53-72. <https://doi.org/10.56918/es.2025.i39.pp53-72>
- Pascua Ramón, G. (2024). Fenomenología de violación de invariancia Lorentz en la física de neutrinos de muy alta energía. [Trabajo Fin de Grado]. Universidad de Zaragoza. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/149484>
- Pivetta, M. (2021). El enigma de los muones. *Revista Pesquisa Fapesp*(304). Obtenido de <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/el-enigma-de-los-muones/>
- Portilla – Flores, R. F., Jara – Martínez, P., & Recalde – Caicedo, L. C. (2025). Instauración del Análisis Vectorial: una revisión crítica de su evolución teórica y de su influencia en la formalización de las Ciencias Físico–Matemáticas. *Tesla Revista Científica*, 5(2), 1-18. <https://doi.org/10.55204/trc.v5i2.e564>
- Tomé López, C. (2017). *El principio de relatividad (3): la invariancia de Galileo*. Obtenido de *Cultura Científica*: <https://culturacientifica.com/2017/12/05/principio-relatividad-3-la-invariancia-galileo/>
- Vásquez-Muñoz, D. U., Gutiérrez Talavera, A. J., Zamora Rivera, F. A., Triminio Zavala, C. M., & Herrera Castrillo, C. J. (2025). Laboratorio Experimental para el uso de simuladores en el aprendizaje del electromagnetismo. *Revista Científica Tecnológica*, 8(2), 38-53. Retrieved from <https://revistas.unan.edu.ni/index.php/ReVTec/article/view/5100>
- Vilchez-Ruiz, M. I., López-Gutiérrez, E., & Herrera-Castrillo, C. J. (2026). Software para la adquisición de datos de Física Clásica utilizando sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS). *Revista Científica Ciencia y Método*, 4(1), 154-169. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v4/n1/119>