

8. Aprendiendo principios de física cuántica con filosofía: valoraciones cualitativas sobre su efecto en el pensamiento crítico



JESÚS DIEGO TUERO-O'DONNELL ZULAICA*

PAMELA GERALDINE OLIVO MONTAÑO**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.399.08>

Resumen

Este trabajo expone los primeros resultados cualitativos de una investigación comenzada en 2023, que pretende valorar la evolución del pensamiento crítico ante una estrategia filosófica dirigida hacia el aprendizaje de los principios básicos de la física cuántica entre estudiantes de ingeniería colombianos. Para ello, se diseñó una secuencia didáctica siguiendo el marco filosófico de Sumiacher y las indicaciones de la Red Interamericana de Educación Docente (RIED), basadas en la taxonomía de Bloom. Dicha secuencia consiste en diez unidades a desarrollar durante cuatro semanas, que incluyen recursos audiovisuales, lecturas de artículos de divulgación y debates socráticos, evaluándose el desempeño mediante el análisis de contenido dirigido (estudio cualitativo con categorización preasignada) de las respuestas a las preguntas abiertas distribuidas en cada sesión. Tras unas pruebas piloto, el examen se centró en el estudio de las habilidades de pensamiento crítico más elevadas, es decir, análisis, síntesis y evaluación, para adaptarse mejor a la estrategia filosófica empleada. El instrumento fue validado por expertos, con 21 preguntas

* Doctor en Ciencias en Física Educativa por el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4416-4417>

** Doctora en Filosofía de la ciencia con especialización en Comunicación Pública de la ciencia por la Universidad Nacional Autónoma de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2882-3626>

abiertas, siete por cada habilidad examinada. Las pruebas realizadas en 2024 indican que la estrategia contribuye al perfeccionamiento progresivo de las habilidades de análisis y síntesis, aunque la evaluación no fue concluyente. No se produjeron cambios conceptuales radicales, y hubo una coexistencia entre modelos de pensamiento clásicos y modernos. Un periodo más prolongado y la repetición de la experiencia podrían arrojar más luz sobre estos resultados.

Palabras clave: *pensamiento crítico, taxonomía de Bloom, filosofía, física cuántica, cambio conceptual.*

Introducción

La deserción en ingeniería responde a diversos factores (Aroca *et al.*, 2021), entre ellos, la escasa consolidación del pensamiento crítico, cuyo limitado desarrollo afecta el desarrollo de competencias científicas clave (Alias *et al.*, 2022). Debido a esto, se requieren estrategias pedagógicas innovadoras que superen las prácticas ineficaces habituales (Escobar-Moreno y Ramírez-Diez, 2023). En este contexto, la investigación se articula en torno a la siguiente pregunta: ¿cómo se modifican las habilidades de pensamiento crítico de estudiantes de ingeniería del caribe colombiano cuando, durante cuatro semanas, la filosofía se emplea como recurso didáctico central para introducir la dualidad onda-partícula de la física cuántica? La elección de este contenido resulta pertinente porque la física cuántica presenta notorias dificultades conceptuales, entre ellas la de relacionar su formalismo matemático con la realidad física, lo que obstaculiza el aprendizaje inicial (Bouchée *et al.*, 2022). Además, su tratamiento epistémico favorece tanto la reflexión filosófica como los cambios conceptuales y de paradigma, propios de la física moderna (Stadermann y Goedhart, 2020).

Antecedentes y marcos teórico

La investigación se basó en la didáctica filosófica de Sumiacher (2016), centrada en la reflexión previa, el diálogo socrático y el cierre reflexivo, que son

conducidos para detectar cambios conceptuales (Moreira y Greca, 2003) y la evolución del pensamiento crítico. Este último se abordó desde la taxonomía de Bloom (1990) —conocimiento, comprensión, aplicación, análisis, síntesis y evaluación— complementada por el marco teórico de Cano y Álvarez (2020), que retoma y aplica dicha clasificación en contextos afines.

Para la enseñanza teórica de la física cuántica, se tomó como referencia la revisión de Okon (2014), que contextualiza los modelos estándar y alternativos. La literatura reciente, relativa a la enseñanza de la física cuántica, presenta diversas propuestas didácticas con metodologías e instrumentos propios (Waitzmann *et al.*, 2024; Tereshchuk *et al.*, 2023; Bentaleb *et al.*, 2022; Susilawi *et al.*, 2022; Bøe y Viefers, 2021; Stadermann y Goedhart, 2020), aunque el enfoque filosófico suele ser superficial, salvo en estudios como el de Tereshchuk *et al.* (2023), que hacen uso del racionalismo crítico y el método hipotético–deductivo como vía para un aprendizaje reflexivo y transferible a otras asignaturas de física.

Metodología

Se desarrolló una investigación longitudinal cualitativa con análisis de contenido dirigido (codificación deductiva), a partir del diseño de una secuencia didáctica con orientación filosófica (Sumiacher, 2016), la cual fue aplicada durante cuatro semanas en la asignatura “ondas y física moderna”, a estudiantes de ingeniería de una institución colombiana. La secuencia de 10 sesiones integró recursos audiovisuales, lecturas de artículos de divulgación científica, debates socráticos y preguntas abiertas escritas. Para la planificación de las clases y la redacción de las preguntas, se siguieron las recomendaciones de la Red Interamericana de Educación Docente [RIED] (2015), a partir de su documento titulado Caja de Herramientas de Pensamiento Crítico, que se apoya en la taxonomía de Bloom. Inicialmente se incluyeron 40 preguntas abiertas, repartidas entre las diez sesiones, más un test recopilatorio final.

Dos pruebas piloto realizadas en 2023 (Tuero-O’Donnell, 2024) permitieron delimitar el estudio a los niveles superiores de pensamiento crítico (análisis, síntesis y evaluación), al comprobarse que la estrategia filosófica

no favorecía de forma suficiente las habilidades inferiores, pues requerían otros recursos. También se excluyó la prueba final recopilatoria por no ser útil para examinar la evolución entre sesiones. El instrumento, validado por jueces expertos y con análisis estadístico mediante el índice V de Aiken, fue ajustado hasta llegar a su versión definitiva de 21 preguntas abiertas, distribuidas en partes iguales entre las tres habilidades. La ficha técnica y la presentación interactiva de las sesiones (accesible esta última para los estudiantes) están disponibles, respectivamente, en estos enlaces: [ficha técnica de la secuencia](#) y [presentación para estudiantes](#).

El análisis cualitativo de las respuestas a los cuestionarios se llevó a cabo mediante una categorización preasignada a partir de las ideas recogidas por Bloom (1990), junto con el marco teórico empleado por Cano y Álvarez (2020), que también hace uso de esa clasificación en un contexto socio-cultural similar al de esta investigación. El resultado se expresa en forma de un libro de códigos (tabla 1), con el que se codificaron las respuestas dadas por los estudiantes, haciéndolo de manera exhaustiva (no quedaron respuestas por codificar) y no excluyente (aceptándose más de una codificación por respuesta).

Tabla 8.1 Asignación de categorías y códigos para el análisis cualitativo de pensamiento crítico

Niveles de pensamiento crítico	Categorías principales	Códigos principales	Subcategorías y subcódigos		
			Para abstraer	Para generalizar	Para inferir
Análisis	- De elementos -De relaciones -De principios	AE AR AP	AEA ARE APE	AEG ARG APG	AEI ARI API
			Para recopilar	Para predecir	Para concluir
Síntesis	-En la comunicación -En la producción de un plan -En la derivación de relaciones abstractas	SC SP SA	SCR SPR SAR	SCP SPP SAP	SCC SPC SAC
			Para valorar	Para criticar	Para argumentar
Evaluación	-Según criterios internos -según criterios externos	-EI -EE	EIV EEV	EIC EEC	EIG EEG

Nota. Cada código tiene tres letras: la primera indica el nivel principal (A: para análisis; S: para síntesis; y E: para evaluación); la segunda letra indica la categoría principal en la que se divide el nivel; mientras que la tercera letra indica la subcategoría en la que se divide la categoría principal. Por ejemplo, ARI: análisis de relaciones para inferir; SCC: síntesis en la comunicación para concluir; EIV: evaluación según criterios internos para valorar, etc.

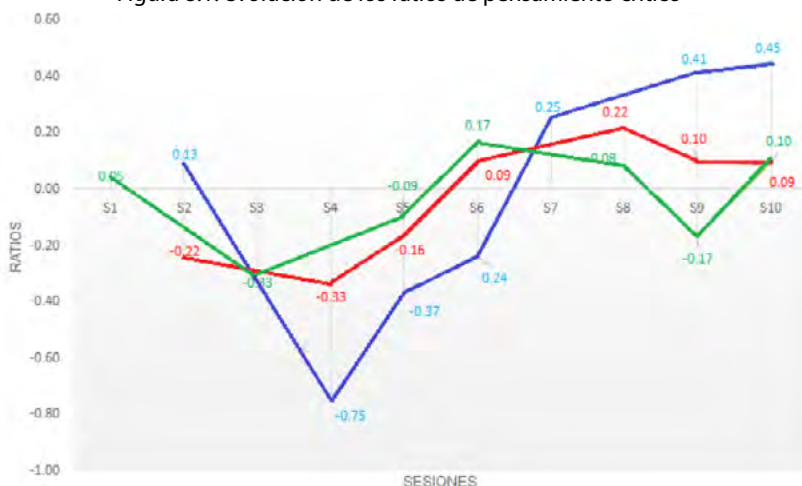
A cada categoría se le añadió una codificación adicional: COD (+) para respuestas profundas o acertadas, y COD (-) en caso contrario. La categorización, realizada con Atlas.ti, permitió calcular un ratio por sesión, r , a partir de dichas respuestas:

$$r = \frac{\text{COD}(+) - \text{COD}(-)}{\text{COD}(+) + \text{COD}(-)}$$

Resultados

La categorización de las respuestas estudiantiles en 2024 permitió calcular los ratios mostrados en la figura 1, los cuales, junto con los informes recogidos en cada sesión, facilitaron una valoración preliminar de la evolución del pensamiento crítico bajo la estrategia filosófica.

Figura 8.1: evolución de los ratios de pensamiento crítico



Fuente: elaboración propia.

Habilidad de análisis

La dificultad para llevar a cabo generalizaciones e inferencias rigurosas se dejó ver desde el comienzo, con reticencias a interpretar críticamente los contenidos examinados. En la segunda sesión, se produjo una caída abrupta en el rendimiento, al analizar un artículo sobre la influencia de la tesis doctoral de Louis de Broglie en el pensamiento de Einstein. Este descenso no resulta inesperado, considerando la mayor complejidad temática y la menor posibilidad de formular inferencias sin incurrir en errores. Las dificultades para realizar abstracciones se tradujeron en una cantidad significativa de codificaciones negativas, lo que limitó la calidad del razonamiento durante el debate socrático. Los estudiantes aceptaron con pasividad las nuevas propuestas, sin lograr un análisis riguroso del texto, principalmente por la dificultad para identificar los principios subyacentes en las ideas de De Broglie y Einstein, llegando, incluso, a confundir los planteamientos de cada uno. Sin embargo, el desarrollo de las sesiones posteriores mostró un incremento sostenido del ratio, con una tendencia a la consolidación del pensamiento analítico en las tres últimas sesiones, principalmente por la mejora significativa en la habilidad de análisis de principios.

Habilidad de síntesis

Desde las primeras intervenciones, se evidenciaron limitaciones en la capacidad de integrar ideas y comunicar razonamientos de manera sintética. La mayoría de los estudiantes encontró dificultades al debatir conceptos como la órbita estable del electrón en el átomo de hidrógeno. La escasa base teórica impidió articular adecuadamente la noción de onda estacionaria con la trayectoria orbital, obstaculizando la construcción de una representación coherente. Aunque algunos participantes lograron elaborar modelos conceptualmente adecuados, no pudieron expresarlos con suficiente claridad. Con el transcurso de la intervención, se observó una mejora progresiva en la capacidad de establecer relaciones abstractas y de formular conclusiones

más estructuradas. En las últimas dos sesiones se evidenció una leve disminución en el rendimiento, posiblemente atribuible a la mayor dificultad de los temas tratados. Aun así, la forma en que los estudiantes organizaron y articularon sus ideas al final del proceso fue metodológicamente coherente, incluso cuando las conclusiones no siempre resultaron correctas.

Habilidad de evaluación

Desde el inicio de la intervención se identificó una tendencia predominante al uso de criterios internos poco fundamentados, con argumentaciones escasamente desarrolladas. Esta limitación es comprensible en etapas tempranas del proceso, pero, a lo largo de las sesiones, no se evidenció una evolución sostenida del ratio. Fue común la evasión de respuestas o la formulación de juicios con escaso respaldo conceptual, reflejo de una inseguridad persistente en los principios básicos. Esta situación dio lugar a argumentaciones poco confiables, donde el uso de criterios externos resultó muy mecánico, mientras que el recurso a criterios internos derivó en valoraciones superficiales, evidenciando dificultades por la falta de conexión entre el nivel fenomenológico (los observables) y los modelos ontológicos (sus significados). En conjunto, estos resultados sugieren que, aunque se lograron avances en habilidades cognitivas de menor nivel, dichas mejoras no fueron suficientes para sostener un progreso consolidado en la habilidad de evaluación.

Discusión

La estrategia filosófica implementada generó efectos positivos en el desarrollo del pensamiento crítico, coherentes con lo reportado por Didiş y Pospiech (2024), quienes emplearon debates y la reflexión entre pares. El desplazamiento del foco desde el formalismo matemático hacia la problematización filosófica no menoscabó la resolución de ejercicios: esta constatación converge con las conclusiones de Bøe y Viefers (2021), quienes, además, desde una perspectiva sociocultural, subrayan la necesidad de profundizar en las reflexiones epistemológicas ante cuestiones complejas. No obstante,

dichos autores advierten —en línea con nuestros propios resultados— que la duración limitada de las intervenciones puede restringir la evaluación final de las transformaciones conceptuales, por lo que se recomiendan programas de mayor alcance temporal.

En cuanto a las habilidades de síntesis y evaluación, emergen matices diferenciados. El progreso observado en la integración de ideas y la planificación argumentativa coincide con los hallazgos de Doyan *et al.* (2022) en entornos mixtos presencial-virtual; sin embargo, la persistente dificultad para explicar fenómenos —vinculada a la intersección entre la evaluación y la comprensión— contrasta con dichos autores y reproduce la baja abstracción inicial descrita por Susilawati *et al.* (2022). La complejidad de articular la física cuántica con la experiencia cotidiana, destacada por Stadermann y Goedhart (2020), se manifiesta en la incapacidad de los estudiantes para vincular los resultados observacionales con los modelos teóricos. Adicionalmente, la tendencia a recurrir mecánicamente a criterios externos, sin una crítica profunda, converge con algunas de las observaciones epistemológicas de Patterson y Ding (2025). Además, las divergencias terminológicas sobre la naturaleza de los criterios internos y externos, no definidas igual por otros autores (Saulis *et al.*, 2021), dificultan comparaciones más precisas. De igual forma, la ausencia de resultados diferenciados por habilidades específicas en el estudio de Tereshchuk *et al.* (2023) —quienes confirman la eficacia en el pensamiento crítico de un enfoque hipotético-deductivo durante el aprendizaje de la física cuántica— impide contrastar la evolución de habilidades específicas, como se hizo en la presente investigación, dificultando la comparación entre trabajos.

El análisis desde la óptica del cambio conceptual revela una marcada inercia de los paradigmas clásicos, coherente con la persistencia señalada por Bentaleb *et al.* (2022) en temas de medición cuántica que exigen altos niveles de abstracción. Aunque se detectan ajustes graduales en las estructuras conceptuales al examinar textos disciplinares, dichos desplazamientos reproducen los conflictos ontológicos descritos por Zuccarini y Malgieri (2024), caracterizados por intentos de asimilación mediante generalizaciones de conceptos previos. No se constatan, sin embargo, transformaciones ontológicas profundas en el sentido planteado por Chi y Slota (1993), pues el conflicto cognitivo activado aún resulta

insuficiente. Además, a pesar de la advertencia explícita de evitar analogías clásicas, los estudiantes continúan recurriendo a ellas sin reconocer sus limitaciones, fenómeno igualmente registrado por Vilarta-Rodríguez *et al.* (2025) y Bitzenbauer *et al.* (2024).

Limitaciones y trabajo futuro

El diseño de instrumentos para el aprendizaje de la física cuántica aún carece de consenso en la comunidad académica (McKagn *et al.*, 2010), como se evidenció durante la validación del instrumento sobre pensamiento crítico. Lo mismo ocurre con la introducción arbitraria de la filosofía en estos cursos (Stadermann *et al.*, 2019). Aunque queda pendiente un análisis cualitativo más profundo de las coocurrencias entre categorías, se reconoce que una intervención más prolongada podría ofrecer resultados más significativos. Además, se espera complementar el estudio con una segunda prueba que confirme estos hallazgos.

Conclusiones

La inclusión de estrategias filosóficas en la enseñanza de la física cuántica parece favorecer el desarrollo de habilidades de análisis y síntesis, sin embargo, su impacto en la habilidad de evaluación no ha resultado concluyente. Esta última capacidad parece depender mucho de la complejidad del problema abordado, pues los estudiantes no logran sostener un nivel argumentativo crítico, recurriendo con frecuencia a la repetición de leyes externas o a elucubrar sin mucho sentido, si lo hacen con argumentos internos. Así, las mejoras observadas en los niveles de análisis y síntesis no resultan suficientes, en un periodo de cuatro semanas, para consolidar la exigencia cognitiva que implica la más elevada habilidad en la taxonomía de Bloom –la evaluación–. Además, se evidencia una alternancia contextual de modelos mentales, sin que se produzcan transformaciones ontológicas profundas que permitan sustituir concepciones erróneas propias de la física clásica. Queda pendiente profundizar en el

análisis de coocurrencias entre categorías y replicar la experiencia para afianzar los hallazgos.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional por su apoyo a lo largo del desarrollo de esta investigación, la cual forma parte del proyecto: “Aspectos ontológicos y epistemológicos sobre entidades de la física moderna en el desarrollo de la comprensión conceptual y la argumentación”. Registro SIP-20253791.

Referencias

- Alias, A., Mohtar, L. E., Ayop, S. K. y Rahim, F. R. (2022). A Systematic Review on Instruments to Assess Critical Thinking & Problem-Solving Skills. *Educatum Journal of Science, Mathematics and Technology*, 9, 38-47. <https://doi.org/10.37134/ejsmt.vol9.sp.5.2022>
- Aroca, S., Fonseca, L. y Borges, R. (2021). Análisis de supervivencia aplicado a la deserción en estudiantes de ingeniería. *Noria Investigación Educativa*, 1(7), 13-32. <https://doi.org/10.14483/25905791.17359>
- Bentaleb, K., Dachraoui, S., Alibrahimi, E., Hassouni, T., Chakir, E. y Belboukhari, A. (2022). Development of a Survey to Assess Conceptual Understanding of Quantum Mechanics among Moroccan Undergraduates. *European Journal of Educational Research*, 11(4), 2219-243. <https://doi.org/10.12973/eu-jer.11.4.2219>
- Bitzenbauer, P., Faletič, S., Michelini, M., Tóth, K. y Pospiech, G. (2024). Design and evaluation of a questionnaire to assess learners' understanding of quantum measurement in different two-state contexts: The context matters. *Physical Review Physics Education Research*, 20(2), 020136. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.020136>
- Bloom, B. S. (1990). *Taxonomía de los objetivos de la educación* (Décima ed.). El Ateneo.
- Bøe, M. y Viefers, S. (2021). Secondary and University Students' Descriptions of Quantum Uncertainty and the Wave Nature of Quantum Particles. *Science & Education*, 32(2), 297-326. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00297-w>
- Bouchée, T., de Putter-Smiths, L., Thurlings, M. y Pepin, B. (2022). Towards a better understanding of conceptual difficulties in introductory quantum physics courses. *Studies in Science Education*, 58(2), 183-202. <https://doi.org/10.1080/03057267.2021.1963579>
- Cano Vásquez, L. y Álvarez Barrera, L. D. (2020). *Pensamiento Crítico: un marco para su*

- medición, comprensión y desarrollo desde la perspectiva cognitiva. Escuela de Educación y Pedagogía. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana. <http://doi.org/10.18566/978-958-764-836-2>
- Chi, M. T. y Slotta, J. D. (1993). The ontological coherence of intuitive physics. *Cognition and Instruction*, 10(2), 249-260. <https://doi.org/10.1080/07370008.1985.9649011>
- Didiș, K. N. y Pospiech, G. (2024). Examination of students' quantum physics knowledge construction with peers and metacognitive evaluations. *Physical Review Physics Education Research*, 20(2), 020153. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.020153>
- Doyan, A. S. y Muliyadi, L. (2022). Effectiveness of quantum physics learning tools using blended learning models to improve critical thinking and generic science skills of students. *Jurnal Penelitian Pendidikan*, 8(2). <https://jppipa.unram.ac.id/index.php/jppipa/article/view/1625/1186>
- Escobar-Moreno, F. y Ramírez-Díaz, M. H. (2023). Diseño, implementación y resultados de un taller para estudiantado reprobado de física universitaria en ingeniería química. *Revista Electrónica Educare*, 27(1), 42-67. <http://dx.doi.org/10.15359/ree.27-1.14275>
- McKagan, S. B., Perkins, K. K., y Wieman, C. E. (2010). Design and validation of the quantum mechanics conceptual survey. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 6(2), 020121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020121>
- Moreira, M. A., Greca, I. M. (2003). Cambio conceptual: análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. *Ciência & Educação*, 9(2), 301-315. <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/PT4qZyPn3vfHNdtzFMx8Zjx/?format=pdf&lang=es>
- Okon, E. (2014). El problema de la medición en mecánica cuántica. *Revista mexicana de física E*, 60(2), 130-140. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S187035422014000200007&script=sci_abstract&lng=pt
- Patterson, Z. y Ding, L. (2025). Epistemic framing analysis of secondary students during instruction on quantum physics. *Physical Review Physics Education Research*, 21(1), 010116. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.21.010116>
- Red Ineramericana de Educaicón Docente. (2015). Caja de Herramientas Pensamiento Crítico. Washington, D.C., EEUU: Red Interamericana de Educación Docente. OEA. <https://oas.org/es/ried/PDF/Pensamiento%20Critico%20Caja%20de%20Herramientas.pdf>
- Saulius, T. y Malinauskas, R. K. (2021). Involvement of Critical Thinking Education in University Studies: A Qualitative Research. *European Journal of Contemporary Education*, 10(1), 113-126. <https://doi.org/10.13187/ejced.2021.1.113>
- Stadermann, H. K. y Goedhart, M. J. (2020). Secondary school students' views of nature of science in quantum physics. *International Journal of Science Education*, 42(6), 997-1016. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1745926>
- Stadermann, H. K. Van Den Berg, E. y Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 0101301-01013025. <https://doi.org/10.1103/>

- Sumiacher. (2016). La didáctica filosófica. En Á. A. Salas, *Filosofía con niños y adolescentes*. México: UNAM. <https://cecapfi.com/descargas/SUMIACHER,%20D.,%20La%20dida%CC%81ctica%20filoso%CC%81fica.pdf>
- Susilawati, S., Doyan, A., Mulyadi, L. A. y Pineda, C. I. (2022). The effectiveness of modern physics learning tools using the phet virtual media assisted inquiry model in improving cognitive learning outcomes, science process skills, and science scientific creativity of prospective teacher students. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 8(1), 291-295. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i1.1304>
- Tereshchuk, S., Sharov, S., Tereshchuk, A., Kolmakova, V. y Sharova, T. (2023). Critical thinking and hypothetic-deductive scheme for studying the elements of quantum theory. *International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE)*, 12(3), 1497-1506. <https://doi.org/10.11591/ijere.v12i3.25249>
- Tuero-O'Donnell Zulaica, J. D. (2024). Modificaciones en los niveles de pensamiento crítico, al emplear estrategias filosóficas en el aprendizaje de la dualidad onda-partícula: Avances para una para una próxima investigación cualitativa. En J. A. Flóres Cruz, & R. Sánchez Sánchez, *Nuevas perspectivas de la investigación en física educativa* (págs. 267-281). Comunicación Científica. <https://doi.org/10.52501/cc.219.14>
- Vilarta Rodriguez, L., Van der Veen, J. T. y De Jong, T. (2025). Role of analogies with classical physics in introductory quantum physics teaching. *Physical Review Physics Education Research*, 21(1), 010108. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.21.010108>
- Waitzmann, M., Scholz, R. y Wessnigk, S. (2024). Testing quantum reasoning: Developing, validating, and application of a questionnaire. *Physical Review Physics Education Research*, 20(1), 010122. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.010122>
- Zuccarini, G. y Malgieri, M. (2024). Modeling and representing conceptual change in the learning of successive theories: The case of the classical-quantum transition. *Science & Education*, 33(3), 717-761. <https://doi.org/10.1007/s11191-022-00397-1>