

14. Modificaciones en los niveles de pensamiento crítico, al emplear estrategias filosóficas en el aprendizaje de la dualidad onda-partícula: Avances para una próxima investigación cualitativa

JESÚS DIEGO TUERO-O'DONNELL ZULAICA*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.219.14>

Resumen

En este trabajo se presentan los primeros pasos para una próxima valoración de la evolución de las habilidades de pensamiento crítico en estudiantes universitarios, a través del diseño de una secuencia didáctica enfocada en el pensamiento filosófico como herramienta, al estudiar el fenómeno cuántico de la dualidad onda-partícula, tanto ante la interpretación estándar como ante otras alternativas. La secuencia se desarrolla en 10 sesiones, mediante lecturas de artículos de divulgación, reflexiones y debates filosóficos, respuestas a cuestionarios y un test final, consistente en seis bloques de preguntas de doble nivel: conocimiento, comprensión, aplicación, análisis, síntesis y argumentación. Durante el año 2023 se llevaron a cabo dos pruebas piloto a grupos de 15 estudiantes de ingeniería de 4º semestre, en la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería (Colombia), extra-yéndose unos resultados preliminares, de tipo cuantitativo, que parecen indicar tendencias hacia el manejo de habilidades de pensamiento más elevadas, a medida que se aplica la secuencia didáctica, aunque con bases de comprensión frágiles. Se espera que el análisis cualitativo que se realizará durante el año 2024 describa con más detalle dichos procesos.

Palabras clave: *educación, filosofía, pensamiento crítico, onda-partícula.*

* Máster Universitario en Astronomía y Astrofísica. Profesor interno en el Centro de Ciencias Básicas de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), campus Montería, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4416-4417>

Introducción

Las dificultades que encuentran los estudiantes universitarios para poder aplicar procesos naturales de síntesis y emisión de juicios argumentados, al abordar problemas generales en su contexto personal y académico [1], les está llevando en muchas ocasiones a la deserción escolar [2] y provoca, incluso, cierres de programas académicos completos [3] al reducirse al mínimo el número de estudiantes matriculados. Así, este estudio se elabora en torno a una secuencia didáctica que, apoyándose en la teoría del cambio conceptual [4] y la filosofía, ponga en juego distintos niveles de pensamiento crítico, a través de lecturas y debates socráticos [5] para sacar a relucir el potencial de los estudiantes ante una de las primeras dificultades con las que se encuentran en el estudio de la física cuántica, las paradojas de la dualidad onda-partícula y las principales interpretaciones que de la misma se han desarrollado a lo largo de la historia.

Con esta investigación, se aporta una estrategia poco explotada [6], potenciándose las habilidades de pensamiento más elevadas, que son consideradas por la UNESCO como uno de los pilares en los que debe apoyarse todo sistema educativo, junto con la empatía y la creatividad [7]. Además, se ha demostrado que se puede verificar el cambio de nivel de desarrollo de pensamiento crítico, aplicando estrategias didácticas novedosas (por ejemplo, con el aprendizaje basado en problemas) en un solo semestre, fomentándose habilidades más elevadas de pensamiento, a medida que progresa la intervención [8]. Sin embargo, según el resultado de la revisión bibliográfica efectuada, ninguno de los test existentes, ni de las secuencias didácticas planteadas para el aprendizaje de la dualidad onda-partícula, se apoya en temas histórico-filosóficos, que consideren además el tema de las otras interpretaciones de física cuántica, más allá del modelo ortodoxo (interpretación de Copenhague), con preguntas abiertas, que busquen valorar cualitativamente cambios en los niveles de pensamiento crítico, por lo que esta investigación pretende cubrir dicho vacío.

El proyecto comenzó durante el primer semestre de 2023, en el entorno de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería (Colombia), con estudiantes de ingeniería, aplicado en la asignatura de Ondas y Física

Moderna (4º semestre), optando por un enfoque básicamente cualitativo fenomenológico, con unos mínimos apuntes cuantitativos, puesto que no se pretenden generar mediciones, ni generalizar a otras poblaciones, sino, más bien, adentrarse en un campo poco explorado, como es el del desarrollo de las asignaturas con el apoyo de la filosofía, y valorar sus efectos en un grupo de estudiantes concreto.

Pregunta principal y objetivos

El trabajo pretende responder esta pregunta principal: ¿Cómo se modifican los niveles de pensamiento crítico al priorizar el uso de la filosofía y la revisión histórica en estudiantes universitarios que se acercan por primera vez al estudio de la dualidad onda-partícula, en carreras de ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB, Colombia), durante un periodo de cuatro semanas? Siendo, por ello, su objetivo principal el de valorar los cambios en los niveles de pensamiento crítico, alcanzados con el uso de la filosofía y la revisión histórica en estudiantes universitarios que se acercan por primera vez al estudio de la dualidad onda-partícula en carreras de ingeniería de la UPB, durante un periodo de cuatro semanas. Para ello se plantean estas metas parciales:

1. Describir las soluciones propuestas por los estudiantes al dar respuesta, por primera vez, al problema de la dualidad onda-partícula, sin haber comenzado la implementación de secuencia didáctica alguna.
2. Examinar los argumentos filosóficos empleados por los estudiantes para debatir y argumentar sobre las interpretaciones de la física cuántica, en general, y sobre la dualidad onda-partícula, en especial, mientras se desarrolla una secuencia didáctica, diseñada para tal efecto.
3. Identificar los cambios conceptuales que puedan aparecer durante ese periodo.
4. Interpretar los efectos del uso de la filosofía en los niveles de pensamiento crítico manejados, después de terminar el periodo de docencia.

Marco teórico

Teoría del cambio conceptual

El estudio se apoya en la teoría del cambio conceptual. Esta teoría viene desarrollándose desde mediados del pasado siglo, a partir de las investigaciones de Jean Piaget y Lev Vigotski [9], pero ha ido modificándose a medida que se ha comprobado la dificultad de que desaparezcan por completo esquemas mentales erróneos, siendo habitual que se hable más de evolución que de cambio conceptual [10]. La incorporación de los conceptos cuánticos supone así un reto con el que poner en práctica esta teoría educativa, al enfrentar los modelos de pensamiento clásico con los cuánticos [4].

El pensamiento crítico

La Red Interamericana de Educación Docente (perteneciente a la OEA), en su informe de 2015, denominado Caja de Herramientas, Pensamiento crítico, propone la siguiente clasificación de los niveles de desarrollo de pensamiento crítico [11]: conocer, comprender; aplicar; analizar; sintetizar; y evaluar. Dichos niveles están basados en la taxonomía de Bloom [12] y se toman como referencia para esta investigación.

Existen varios test genéricos, enfocados cuantitativamente conocidos internacionalmente, como el de Watson Glaser Critical Thinking [13]; el de California Critical Thinking Skills [1]; el de California Critical Thinking Disposition Inventory [14]; el Test de Cornell Critical Thinking [15]; el de Halpern Critical Thinking Assessment using Everyday Situations (HCTAES), que llena un vacío en este tipo de test, al poder realizarse no solo estudios cuantitativos, sino cualitativos [16]; el de Ennis-Weir Critical Thinking Essay Test [17], pudiendo ser empleado como test o como instrumento de enseñanza en un curso largo, que está centrado en la habilidad de la argumentación y defensa de un punto de vista, y por ello se presenta en forma de cuestiones abiertas, configurando una carta a un director de un hipotético periódico (su enfoque sí es eminentemente cualitativo).

En Colombia (país donde se lleva a cabo la investigación en curso), tanto en educación media como universitaria, el Instituto Colombiano para la Educación Superior (ICFES) realiza unas pruebas estandarizadas [18] que guardan cierta relación con el uso del pensamiento crítico (cursos 3º, 5º, 9º y 11º, al término de la educación media), así como otra, Saber Pro, cerca del final de la carrera universitaria. En cuanto a test específicos internacionales se ha aplicado el de Halpern en dos contextos: educación media [19], aunque sin una validación previa, y en educación superior, desarrollando la metodología para una validación [20]. También Betancourth *et al.* [21] validaron recientemente una escala de pensamiento crítico para universitarios de Colombia, México y Chile.

Sin embargo, es menos frecuente encontrar instrumentos enfocados a una rama científica particular, puesto que los antes comentados son generalistas. Encontramos trabajos como los de Tiruneh *et al.* [22], donde se diseña y valida un test para la temática de electricidad y magnetismo, o el de Laiton [8], haciendo uso del aprendizaje basado en problemas, aplicado a la física mecánica. Y en relación con los cursos introductorios a la física cuántica, existen investigaciones donde se analizan las dificultades encontradas por estudiantes de nivel medio y universitario para la comprensión de estos temas de física moderna, proponiéndose distintas estrategias de enseñanza, como en los recientes de Bouchée *et al.* [23] y Krijtenburg-Lewerisa *et al.* [24]. La alternativa histórico-filosófica es aún menos común, pero puede verse reflejada en trabajos como los de Hoehn *et al.* [25], y en proyectos más generales, como el expuesto por Böe y Viefers [6]. Como estrategia más cualitativa, también se han desarrollado tesis en Colombia, como la de Céspedes [26], precisamente enfocada en el problema de la dualidad onda-partícula.

En cuanto al diseño e implementación exclusivamente de test y cuestionarios pensados para cursos introductorios de física cuántica, estos se caracterizan por ser mayoritariamente de tipo cuantitativo, con preguntas de selección múltiple, buscando medir ganancias conceptuales en investigaciones experimentales. Se pueden mencionar, entre otros, a nivel universitario, las propuestas de Bentaleb *et al.* [27], de Ortiz-Pérez [28], de McKagan *et al.* [29], o la de Wutiprom [30]. Menos frecuente aún es encontrar test sobre física cuántica que separen cada pregunta en varios niveles de

cuestiones (pruebas multinivel), con el objetivo de extraer información sobre el grado de seguridad o tipo de respuesta que ha dado el estudiante a la cuestión fundamental de dicha pregunta. Así, se encuentran propuestas como las de Taslidere [31], quien desarrolla un test de tres niveles sobre el efecto fotoeléctrico, o la de Di Uccio *et al.* [32], de dos niveles, para el comportamiento ondulatorio, el problema de la medida y la teoría atómica.

Metodología

Secuencia didáctica

La investigación se realiza en un grupo de enfoque, mediante la aplicación de una secuencia didáctica presencial de 10 sesiones, para el aprendizaje de la dualidad onda-partícula, con una orientación cualitativa y enfoque histórico-filosófico, que fomenta selectivamente las seis habilidades de pensamiento crítico, según el tema a tratar. Cada sesión dura 100 minutos, siendo el desarrollo de las nueve primeras así:

- *Análisis de un video, lectura de un texto o de un artículo de divulgación científica:* 30 min. Las lecturas corresponden a los trabajos de Gherab-Martín [33], Chen [34], Lewis [35], Okon [36], Albert [37], así como la entrevista a Lord Kelvin en The Newark Advocate [38]. Algunos de los videos e ítems fueron extraídos del proyecto Rele-Quant, perteneciente a web de Recursos de Aprendizaje en Ciencias para escuelas secundarias del Centro Noruego para la Educación Científica [39].
- *Respuesta a un cuestionario de preguntas abiertas sobre la tarea anterior:* 30 min. A modo de ejemplo, en la figura 14.1 se muestra uno de los cuestionarios ofrecido a los estudiantes.
- *Debate socrático sobre el tema tratado:* 40 min. Se discuten los temas tratados en el video y las preguntas planteadas en el cuestionario.

Figura 14.1. Cuestionario aparecido en la sesión #6 de la secuencia didáctica

En relación con los apuntes leídos, con el artículo de Gherab-Martín (2022) y con la interpretación estándar, responde brevemente las siguientes preguntas.

Conocimiento

1. ¿Cómo se llama el principio que hace de puente entre las leyes clásicas y las cuánticas?

Comprensión

2. Explica qué significa esta frase: “El movimiento de las partículas sigue las leyes de probabilidad, pero la probabilidad misma se propaga según la ley de causalidad”.

Aplicación

3. Si la energía de cada fotón (en la visión corpuscular) es directamente proporcional a la frecuencia de su onda (en la visión ondulatoria): al aumentar la intensidad del campo electromagnético, ¿cómo cambiará el número de fotones detectados?

Análisis

4. ¿Qué quiso decir Einstein con la frase “Él no juega a los dados”? ¿A qué y a quién se refería? ¿Qué postura dejaba clara con esa sentencia?

Síntesis

5. ¿Cómo crees que las otras interpretaciones de la física cuántica darán respuesta al problema de la dualidad onda-partícula? Piensa en un modelo físico, realista, alejado del contradictorio que propone el modelo de Copenhague, que pudiera afrontar el fenómeno sin esa dificultad.

Argumentación

6. ¿Estás de acuerdo con la interpretación antirrealista, en el fenómenos onda-partícula, por el cual no existe una realidad objetiva “antes” de que experimentemos con el objeto, sino que nosotros mismos la creamos, al forzar una descripción de esa realidad, para que se nos aparente familiar a nuestros sentidos, como onda clásica o como partícula clásica?

Fuente: Gherab-Martín [40].

Test final de pensamiento crítico

En la última sesión se aplica un test final sobre todos los temas tratados, de tipo *two-tier questionnaire* (dos niveles por cada pregunta), evaluándose las seis habilidades de pensamiento crítico: en el primer nivel se plantea la pregunta abierta; en el segundo, se pide al estudiante que valore el grado de conformidad con el que ha respondido al nivel anterior (con una escala de 1 a 5, donde 1 significa totalmente en desacuerdo y 5 totalmente de acuerdo), para que pueda identificarse así el modelo de pensamiento empleado. En la figura 14.2 se expone una muestra de dichas preguntas, para la habilidad de síntesis, con sus dos niveles.

Figura 14.2. *Pregunta para la valoración de la capacidad de síntesis***Síntesis 1.1**

Estudiamos hace unas semanas que una onda electromagnética, además de presentar magnitudes de campo eléctrico y magnético, debía caracterizarse por su estado de polarización, es decir, por la manera en la que los campos cambian (giran) su dirección en el plano perpendicular a la dirección de desplazamiento de la onda.

Por tanto, en la visión corpuscular de la onda electromagnética un solo fotón, además de transportar energía y cantidad de movimiento, y poder describirse con una longitud de onda, también presenta la propiedad de polarización (la cual, como las demás, puede ser medida).

Por tanto, refiriéndonos a la dualidad onda-partícula (por ejemplo, para un electrón), ¿podrían tener también las partículas materiales estados de polarización? ¿Cómo te imaginas esos estados o los efectos que tendrían? Se te pide que unas tus conocimientos en ondas, mecánica y electromagnetismo para que generes ideas coherentes al respecto de esas preguntas.

Síntesis 1.2

- a) Los sistemas cuánticos están sometidos al principio de incertidumbre de Heisenberg, por lo que las leyes de conservación dejan de cumplirse y las medidas de las masas, polarizaciones, cargas, etc., están sometidas a leyes de probabilidad.
- b) Si las partículas presentan estados de polarización es porque se encuentran cargadas eléctricamente, para poder generar campos electromagnéticos a su alrededor.
- c) Un sistema aislado, como una partícula que se desplaza por el vacío, mantendrá constantes sus propiedades intrínsecas, como su carga y momentos (lineal y angular).

Fuente: elaboración propia.

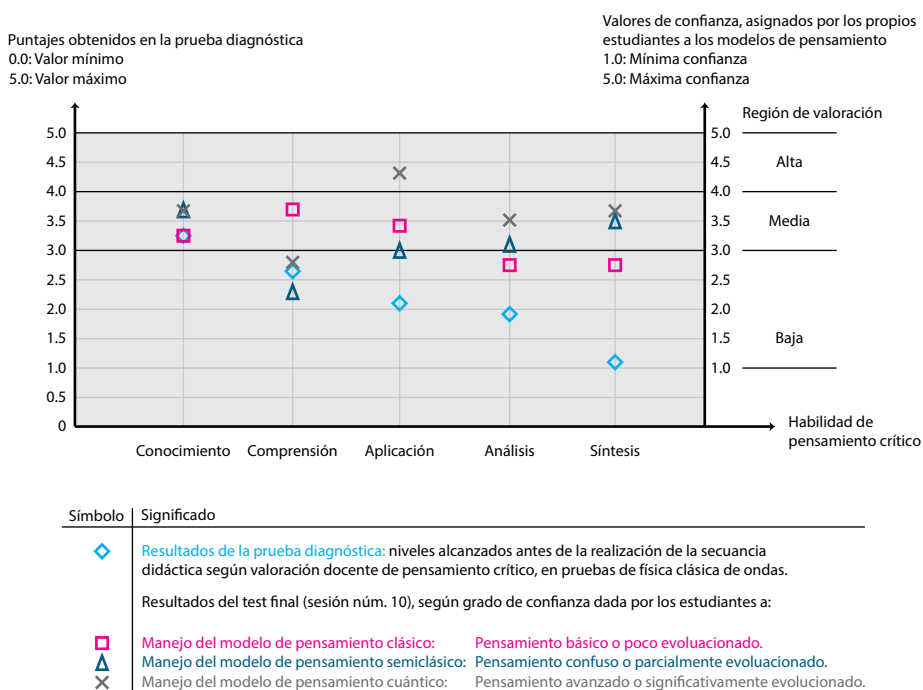
Análisis

Al final del primer semestre de investigación se puso en práctica una prueba piloto con un grupo de 15 estudiantes. A medida que se desarrollaba la prueba se fue detectando un cambio en la manera de pensar los problemas y cuestionar las ideas previas (aumentado paulatinamente la riqueza de los argumentos y capacidad de síntesis), así como en la de interpretar las teorías cuánticas, mientras los estudiantes adquirían costumbre en debatir y reflexionar, por lo que la teoría de la evolución conceptual parece prestarse adecuadamente como referencia para la investigación, tomando como base el debate filosófico y la revisión histórica. Se llevaron a cabo ajustes durante el mismo proceso de implementación de la secuencia, modificando las temáticas (ajustándose más al tema de la dualidad onda-partícula) y controlando más el tiempo de los debates.

Durante el segundo semestre se volvió a implementar la secuencia didáctica, reformándose los cuestionarios e incluyendo la novedad del doble

nivel en el test final (sesión 10). En la figura 14.3 se muestran unos resultados cuantitativos preliminares que comparan las puntuaciones obtenidas en el nivel 2 de las preguntas del test final con las de una prueba diagnóstica informal que había sido efectuada semanas antes, con temas no relacionados con la física moderna.

Figura 14.3. Valoraciones preliminares para las cinco primeras habilidades de pensamiento crítico (enfoque cuantitativo), por comparación entre los resultados diagnósticos iniciales y los promedios obtenidos en los niveles 2 de las preguntas del test final (confianza dada por los estudiantes a las afirmaciones presentadas en ese nivel)



Fuente: elaboración propia.

A falta de realizar la validación del instrumento (que se efectuará durante 2024, mediante la técnica de validación por expertos) y el correspondiente análisis cualitativo de la evolución en las respuestas ofrecidas en cada uno de los nueve cuestionarios que conforman las correspondientes sesiones, de la figura 14.3, parece deducirse que los modelos de pensamiento cuántico (los más correctos) consiguen sustituir a los otros dos, en todas las

habilidades, excepto en la de comprensión. Esto indicaría que el estudiante promedio sí evoluciona hacia habilidades de pensamiento más elevadas, pero no consigue hacerlo con una base sólida, porque se sigue apoyando mayoritariamente en ideas clásicas, aunque sea capaz de manejar un mayor número de conceptos que le facilitan resolver correctamente los ejercicios.

Conclusiones y trabajo futuro

La implementación de una secuencia didáctica, basada en la estrategia de fomento de los niveles más altos de pensamiento crítico, mediante lecturas histórico-filosóficas y debates socráticos, en torno al fenómeno de la dualidad onda-partícula, se está efectuando desde 2023 mediante pruebas piloto, a falta de validar por expertos dicho instrumento y comenzar el correspondiente análisis cualitativo, esperándose identificar rigurosamente los cambios y evoluciones en los modelos de pensamiento que los resultados preliminares cuantitativos parecen estar arrojando.

Con esta estrategia filosófica, aunque puede que se estén modificando al alza las habilidades de pensamiento crítico más elevadas, parece que estas se siguen apoyando mayoritariamente en modelos de pensamiento clásico, cuando se cuestiona a los estudiantes por el grado de comprensión de un fenómeno, a pesar de obtener buenos resultados en la habilidad de aplicación, en la cual otorgan un peso importante al modelo correcto, el cuántico, confirmando que siguen siendo capaces de resolver problemas correctamente, aunque con bases conceptuales débiles.

Ya que esta investigación no se trata de medir ganancias conceptuales, esta contrariedad no debe significar un factor de pesimismo, puesto que, aunque suene extraño, hay que recordar que no se pretende encontrar una estrategia pedagógica para que el estudiante mejore su comprensión de una fenomenología tan misteriosa y singular como es cualquiera relacionada con la cuántica, sino observar, identificar y valorar qué cambios mentales se producen al enfrentarse a esos fenómenos y cómo se expresan en forma de un distinto manejo de las habilidades de pensamiento crítico más elevadas, en particular las de síntesis y argumentación. Los resultados son esperanzadores, entre otras razones, porque no es habitual que a los estu-

diantes se les anime a desarrollar estas destrezas, más allá de las que se quedan en el conocimiento y la comprensión (las más bajas, aunque fundamentales para poder sostener a las demás).

Agradecimientos

Este trabajo está siendo supervisado por el doctor José Gilberto Castrejón Mendoza y la doctora Pamela Geraldine Olivo Montaña, a quienes se debe parte de la labor investigativa que se ha mostrado. Igualmente, es de reconocer el interés mostrado por el Instituto Politécnico Nacional de México, para dar visibilidad a la labor que están realizando sus estudiantes de posgrado.

Referencias

- [1] Facione, P. (2007). Pensamiento crítico: ¿Qué es y por qué es importante? *Insight Assessment*, 22, 23-56.
- [2] Aroca, S. Y., Fonseca, L. R- y Borges, R. E. (2021). Análisis de supervivencia aplicado a la deserción en estudiantes de ingeniería. *Noria: Investigación Educativa*, 1(7), 13-32.
- [3] Malaver, C. (2023, 13 de abril). Alerta por cierre de admisiones en programas académicos de la Distrital. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/bogota/universidad-distrital-alerta-por-cierre-de-programas-academicos-758823>.
- [4] Kalkanis, G., Hadzidaki, P., y Stavrou, D. (2003). An Instructional Model for a Radical Conceptual Change towards Quantum Mechanics Concepts. *Science Education*, 87(2), 257-80.
- [5] Efendi, M. Y., Cheng, T. H., Sa'diyah, E. H., Wulandari, D., Qosyim, A., y Suprpto, N. (2020). Study of the Implementation of Socratic Dialogue at History of Physics Course. *Studies in Philosophy of Science and Education*, 1(1), 7-20.
- [6] Boe, M. V., y Viefers, S. (2021). Secondary and University Students' Descriptions of Quantum Uncertainty and the Wave Nature of Quantum Particles. *Science & Education*, 32(2), 297-322.
- [7] Luna Scott, C. (2015, noviembre). *El futuro del aprendizaje, 2: ¿Qué tipo de aprendizaje se necesita en el siglo XXI?* (Investigación y Prospectiva en Educación: Documentos de Trabajo, 14). UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000242996_spa.
- [8] Laiton, I. (2010). ¿Es posible desarrollar el pensamiento crítico a través de la resolución de problemas en física mecánica? *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 8(1), 54-70.

- [9] Raynaudoa, G., y Peralta, O. (2017). Cambio conceptual: Una mirada desde las teorías de Piaget y Vygotsky Liberabit. *Revista Peruana de Psicología*, 23(1), 137-48.
- [10] Moreira, M. A., y Greca, I. M. (2003). Cambio conceptual: Análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. *Ciencia & Educacao*, 9(2) 301-15.
- [11] Red Interamericana de Educación Docente (RIED) (2015). Caja de herramientas: Pensamiento crítico. OEA. <https://www.oas.org/es/ried/pdf/pensamiento%20critico%20caja%20de%20herramientas.pdf>.
- [12] Pujawan, I. G., Rediani, N. N., Antara, I. G., Putri, N. N., y Bayu, G. W. (2022, marzo). Revised Bloom Taxonomy-Oriented Learning Activities to Develop Scientific Literacy and Creative Thinking Skills. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 11(1), 47-60. <https://doi.org/10.15294/jpii.v11i1.34628>.
- [13] Watson, G., y Glaser, E. (2002). *Watson-Glaser Critical Thinking Appraisal*. Pearson.
- [14] Facione, N. C., Facione, P. A., y Sánchez, C. A. (1994). Critical Thinking Disposition as a Measure of Competent Clinical Judgment: The Development of the California Critical Thinking Disposition. Inventory. *Journal of Nursing Education*, 33(8), 345-50. <https://doi.org/10.3928/0148-4834-19941001-05>.
- [15] Sahin, H. (2018). *Cross-Cultural Validation of the Cornell Critical Thinking Test: Evidence for Item and Measurement Invariance* [Tesis doctoral]. Washington State University, Estados Unidos.
- [16] Halpern, D. F. (1998). Teaching Critical Thinking for Transfer Across Domains: Disposition, Skills, Structure Training, and Metacognitive Monitoring. *American Psychologist*, 53(4), 449.
- [17] Ennis, R. H., y Weir, H. (1985). *The Ennis-Weir Critical Thinking Essay*. Midwest.
- [18] Ortiz-Morales, E. F. (2016). *Evaluación estandarizada del pensamiento crítico en la educación media colombiana: Elementos para promover practicas pedagógicas basada en perspectivas pedagógicas curriculares constructivistas* [Tesis doctoral]. Universidad de los Andes, Colombia.
- [19] Beltrán, M., y Torres, N. (2009). Caracterización de habilidades del pensamiento crítico en estudiantes de educación media a través del test HCTAES. *Revista del Instituto de Estudios en Educación Universidad del Norte*, 11, 66-85.
- [20] Gómez Velasco, N. Y., Emilce Jiménez, A., y Ortiz Padilla, M. (2019). Elementos de validación y fiabilidad del test HCTAES para estudiar el pensamiento crítico en estudiantes de Psicología [Ponencia]. XXI Encuentro Internacional Virtual Educa, Perú.
- [21] Betancourth, S., Zambrano, C. A., y Ceballos, A. K. (2022). Escala de pensamiento crítico adaptada en estudiantes universitarios de Colombia, México y Chile. *Revista de Educación*, 25(1), 157-174.
- [22] Tiruneh, D. T., De Cock, M., Weldeslassie, A. G., Elen, J., y Janssen, R. (2016). Measuring Critical Thinking in Physics: Development and Validation of a Critical Thinking Test in Electricity and Magnetism. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 15, 663-682.
- [23] Bouchee, T., De Putter-Smits, 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.

- [24] Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., y Van Joolingen, W. R. (2017). Insights into Teaching Quantum Mechanics in Secondary and Lower Undergraduate Education. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109>.
- [25] Hoehn, J. R., Gifford, J. D., y Finkelstein, N. D. (2019). Investigating the Dynamics of Ontological Reasoning across Contexts in Quantum Physics. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010124. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010124>.
- [26] Céspedes Guevara, N. Y. (2026). *Análisis del fenómeno dualidad onda-partícula desde la producción del conocimiento* [Tesis doctoral]. Facultad de Educación, Universidad Santo Tomas, Colombia.
- [27] Bentaleb, K. A., Dachraoui, S., Alibrahimi, E. M., 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.
- [28] Ortiz-Pérez, R. (2017). Test conceptual de Física cuántica para estudiantes de ingeniería. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 19(4), 35-49.
- [29] 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>.
- [30] Wuttirom, S., Sharma, M. D., Johnston, I. D., Chitree, R., y Soankwan, C. (2009). Development and Use of a Conceptual Survey in Introductory Quantum Physics. *International Journal of Science Education*, 31(5), 631-54.
- [31] Taslidere, E. (2016). Development and Use of a Three-Tier Diagnostic Test to Assess High School Students' Misconceptions about the Photoelectric Effect. *Research in Science & Technological Education*, 34(2), 164-186.
- [32] Di Uccio, U. S., Colantonio, A., Galano, S., Marzoli, I., Trani, F., y Testa, I. (2019). Design and Validation of a Two-Tier Questionnaire on Basic Aspects in Quantum Mechanics. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010137. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010137>.
- [33] Gherab-Martin, K. (2022). Visualización de los objetos cuánticos en la interpretación de Copenhague: Una aproximación histórico-filosófica. *International Visual Culture Review*, 9(2), 371-395.
- [34] Chen, E. K. (2019). Realism about the Wave Function. *Philosophy Compass*, 14(7).
- [35] Lewis, P. J. (2019). *Quantum Ontology: A Guide to the Metaphysics of Quantum Mechanics*. Oxford University.
- [36] Okon, E. (2014). El problema de la medición en mecánica cuántica. *Revista Mexicana de Física E*, 60(2), 130-140.
- [37] Albert, D. Z. (1994). *Quantum Mechanics and Experience*. Harvard University.
- [38] Utter Impracticability of Aeronautics & Favorable Opinion on Wireless [Entrevista a Lord Kelvin]. (1902, 26 de abril). *The Newark Advocate*. https://zapatopi.net/kelvin/papers/interview_aeronautics_and_wireless.html.
- [39] ReleQuant (s/f). Quantum Physics. <https://www.viten.no/filarkiv/quantum-physics>.