

# Implementación de Hojas de Actividades y Clases Interactivas Demostrativas con Simulaciones PhET en Física Conceptual

## *Implementation of Activities and Interactive Lecture Demonstrations with PhET Simulations in Conceptual Physics*

Karen Yael Castrejón Parga<sup>1</sup>, Jesús Manuel Sáenz Villela<sup>1</sup>✉, Eunice Sarai Lara Pérez<sup>1</sup>, Diana Berenice López Tavares<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Departamento de Física y Matemáticas, Programa de Ingeniería Física

<sup>2</sup>University of Colorado Boulder, PhET Interactive Simulations, PhET Global

### RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo presentar los resultados de la implementación de un compendio de Hojas de Actividades y Clases Interactivas Demostrativas basadas en los simuladores interactivos PhET. La implementación del compendio fue puesta a prueba en dos grupos piloto en la asignatura de Física Conceptual durante el semestre agosto-diciembre 2021 en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Se realizó un análisis de las respuestas de los grupos de estudiantes a las hojas de actividades y a las predicciones de las hojas de Clases Interactivas Demostrativas contenidas en el compendio. Los resultados del estudio muestran que la implementación tuvo una buena aceptación entre los grupos de estudiantes y el estudio de seguimiento de una muestra de estudiantes sugiere una mejora progresiva en sus predicciones. Las conclusiones derivadas del estudio identifican las áreas de oportunidad para la mejora de las hojas de trabajo y ayudan a obtener diversas perspectivas sobre el diagnóstico de las bases conceptuales del estudiantado de nuevo ingreso, ambas útiles en la mejora y rediseño del compendio.

**PALABRAS CLAVE:** PhET; simulaciones; física; aprendizaje; educación.

### ABSTRACT

This research presents the results of implementing a compendium of activities and Interactive Lecture Demonstrations based on PhET Interactive Simulations. The implementation of the compendium was tested in two pilot groups in the Conceptual Physics course during the August-December 2021 semester at the Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. The students' responses to the activity and Interactive Lecture Demonstrations sheets were analyzed. The study results show that the implementation had a good acceptance among the groups of students, and the follow-up study of a sample of students suggests a progressive improvement in their predictions. The conclusions derived from the study identify the areas of opportunity to improve the worksheets and help to obtain different perspectives on the diagnosis of the conceptual bases of the new student body, both helpful in the improvement and redesign of the compendium.

**KEYWORDS:** PhET; simulations; physics; learning; education.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Jesús Manuel Sáenz Villela.

**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología.

**DIRECCIÓN:** Av. del Charro núm. 450, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

**CORREO ELECTRÓNICO:** jessaenz@uacj.mx

**Fecha de recepción:** 17 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:** 6 de noviembre de 2023. **Fecha de publicación:** 17 de noviembre de 2023.



## I. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje, además de incrementar la interacción grupal y fomentar discusiones entre estudiantes, se implementaron Hojas de Actividades y Clases Demostrativas Interactivas (ILD, por sus siglas en inglés) para la asignatura de Física Conceptual en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a la cual están afiliados los autores del presente trabajo.

Las Hojas de Actividades e ILD están basadas en las simulaciones PhET Interactive Simulations desarrolladas por la Universidad de Colorado-Boulder <sup>[1]</sup>, que cuenta con talleres virtuales en donde se presentan los lineamientos sugeridos en el diseño de actividades basadas en PhET. En <sup>[2]</sup> se describe cómo las ILD permiten al estudiantado ejercitar tanto la escritura de sus predicciones como el dibujo de diagramas. Además, en <sup>[3]</sup> se tiene a disposición un taller virtual en donde se detallan las estrategias a seguir en la preparación e implementación de las Hojas de Actividades.

Las simulaciones PhET están diseñadas para facilitar la comprensión de varios conceptos y el diseño de las simulaciones está basado en resultados previos sobre investigación educativa <sup>[4]</sup>.

Existen estudios sobre la efectividad del uso de simulaciones, junto con otros recursos, como se discute en <sup>[5]</sup>, en donde se encontró que los grupos de estudiantes que recibieron enseñanza sobre óptica con el uso de PhET tuvieron un mejor desempeño en comparación con los estudiantes que se formaron de manera tradicional. El desempeño fue medido a través de los resultados de un examen sobre comprensión de los conceptos de óptica geométrica.

Las Hojas de Actividades e ILD de Física Conceptual para el presente caso fueron diseñadas a lo largo del semestre agosto-diciembre 2021 en reuniones semanales de trabajo, siguiendo la filosofía de las actividades didácticas con PhET <sup>[2]</sup>, <sup>[3]</sup>, en donde se fomenta entre los estudiantes la exploración de los conceptos físicos, pero sin recibir instrucciones acerca de la manipulación de la simulación.

La asignatura de Física Conceptual está ubicada en el primer semestre y siempre se ha ofertado de forma presencial, en modalidad convencional, sin embargo, dada

la situación de la pandemia de COVID-19, cambió a distancia en 2020 y 2021 a través de Microsoft Teams. En 2020, la manera de trabajar fue que el docente hizo la exposición de los temas de la clase, con participación limitada de parte de los estudiantes, mientras que en 2021 consistió en el uso de las ILD y de Hojas de Actividades, en donde los estudiantes exploraron las simulaciones y contestaron una serie de preguntas.

Los temas tratados en la asignatura de Física Conceptual y abordados con la metodología expuesta en este trabajo son primera ley de Newton; movimiento rectilíneo; segunda ley de Newton; tercera ley de Newton; cantidad de movimiento; energía; rotación, gravedad; balística y satélites; naturaleza atómica de la materia; sólidos, líquidos, gases y plasmas; calor y temperatura; transferencia de calor; cambios de fase; y termodinámica.

La investigación educativa en estos temas es amplia, como se discute a continuación.

En cuanto a las leyes de Newton, en <sup>[6]</sup> se estudió las actitudes y comportamientos en el aprendizaje de las leyes de Newton con PhET, obteniendo resultados negativos. Sin embargo, el estudio se implementó en modalidad completamente virtual durante la pandemia, por lo que se contemplaron factores adicionales que pudieran afectar las actitudes del grupo de estudiantes. En <sup>[7]</sup> se usó una plataforma con PhET como laboratorio virtual para evaluar la motivación e independencia de un grupo de estudiantes. Los resultados muestran que el uso de PhET incrementó el nivel de independencia y motivación en el grupo. En <sup>[8]</sup> se encontraron resultados satisfactorios en un estudio sobre la implementación de PhET en un grupo de docentes en Indonesia. Según el grupo de docentes, las simulaciones PhET en temas de leyes de Newton mostraron ser adecuadas para cubrir el plan de las asignaturas.

La enseñanza de las leyes de Newton basada en actividades antes de la introducción de conceptos se presenta en <sup>[9]</sup> y un caso de la enseñanza basada en simuladores de la segunda ley de Newton se propone en <sup>[10]</sup>.

En el tema de movimiento rectilíneo, la interpretación de gráficas de posición, velocidad y aceleración por parte del grupo de estudiantes se discute en <sup>[11]</sup>. Por otro lado, el uso de simuladores PhET en la obtención de gráficas de posición y velocidad respecto al tiempo ha sido tratado en <sup>[12]</sup>. La asociación de los conoci-

mientos previos con la comprensión de la cinemática es discutida en [13].

El concepto de momento lineal usando simulaciones PhET es discutido en [14]. En [15], el uso de las simulaciones PhET en el tema de impulso y cantidad de movimiento mostró que se incrementan los resultados de aprendizaje en comparación con los métodos tradicionales. También, se encontró evidencia de entusiasmo y motivación entre los estudiantes asociados al uso de las simulaciones. Por otra parte, algunas estrategias de resolución de problemas de colisiones son exploradas en [16] y [17].

El concepto y definición de energía son discutidos en [18] y [19]. El uso de simuladores PhET para la enseñanza del concepto de trabajo y energía han sido explorados en [20] y [21].

Con respecto al movimiento rotacional, los preconceptos de parte de los estudiantes han sido estudiados en [22]. En [23] y [24] se presentan diversas estrategias pedagógicas sobre movimiento rotacional. En [25], las simulaciones PhET fueron usadas para evaluar el aprendizaje conceptual del tema de cinemática rotacional entre estudiantes de preparatoria. Los resultados muestran una mejor comprensión del tema en el grupo de prueba, en comparación con el grupo de control.

En el tema de gravedad, en [26] se investigó la viabilidad de la implementación de hojas de trabajo basadas en las simulaciones PhET. Los resultados muestran que la hoja de actividades propuesta en ese estudio puede ser usada como material didáctico de laboratorio virtual. Por otra parte, algunos enfoques didácticos en la enseñanza de la gravedad pueden encontrarse en [24], [27] y [28]. También, en [29], el aprendizaje del concepto de fuerza gravitacional fue estudiado con base en una hoja de actividades e indagación guiada con PhET. Los resultados exponen ganancia en la comprensión en aquellos estudiantes con un conocimiento previo aceptable pero pérdida en la comprensión en casos de estudiantes con conocimientos previos deficientes. Los preconceptos sobre gravedad han sido explorados en [30].

En cuanto al movimiento de proyectiles, en [31] se encontró que el uso de simulaciones computacionales, donde PhET fue una de las usadas, mejora la comprensión de las gráficas de movimiento de proyectiles, permitiendo una mejor conexión entre el dominio del concepto con

su representación gráfica. El uso de simuladores, software, teléfonos inteligentes y enfoques alternativos es discutido en [32]-[35]. En [36] se estudió algunos conceptos erróneos sobre el movimiento de proyectiles con el apoyo de las simulaciones PhET.

Algunos enfoques didácticos sobre el modelo atómico de la materia y los conceptos introductorios de la física nuclear son narrados en [37]-[39]. En [37] se usó la simulación PhET sobre la estructura atómica con la intención de incrementar la motivación de los estudiantes y mejorar los resultados de aprendizaje, lo cual fue verificado en el estudio. En [38] se encontraron mejoras en los resultados de aprendizaje del concepto de vida media al usar las simulaciones PhET como laboratorio virtual.

La enseñanza sobre los conceptos relacionados con los estados de la materia se expone en [40]. En [41] se muestra una estrategia didáctica factible apoyada en simuladores PhET sobre el tema de gases ideales.

En [42] se presenta un efecto positivo en los resultados de aprendizaje en el tema de calor y temperatura, luego de la implementación de actividades basadas en simulaciones PhET. En [43] se muestra un efecto positivo en la evaluación del pensamiento crítico de estudiantes de preparatoria en el tema de procesos termodinámicos con material didáctico basado en las simulaciones PhET. Finalmente, en [44]-[46] se tienen propuestas didácticas para la enseñanza de los conceptos de calor y temperatura.

Aunque la lista de referencias no es exhaustiva, solo en [6], [7], [8], [10], [12], [14], [15], [20], [21], [25], [26], [29], [31], [32], [34], [36], [37], [38], [39], [41], [42], [43] se incorpora el uso de simulaciones PhET como estrategia didáctica, pero enfocado a algún tema de la física en particular. El presente estudio analiza los resultados de la implementación de simulaciones PhET en varios temas de la asignatura de Física Conceptual y es similar a [39] en cuanto a la elección de criterios y sus limitantes para analizar respuestas de estudiantes.

La carta descriptiva de la asignatura de Física Conceptual está basada en los temas descritos en el libro de texto de Hewitt [47], por lo que en el diseño de Hojas de Actividades e ILD propuestas en este trabajo no se consideraron cálculos numéricos con el uso de ecuaciones.

Los propósitos de las Hojas de Actividades e ILD basadas en simulaciones PhET son mejorar la interacción estudiantes-docentes y facilitar el proceso de enseñanza-aprendizaje.

De forma general, las ILD fomentan la indagación grupal y facilitan la implementación de metodologías didácticas basadas en indagación y participación grupal [10]. En este sentido, las ILD descritas en el presente trabajo concuerdan con la metodología didáctica basada en cuestionamiento, como la discutida en [10] y [48].

Las Hojas de Actividades e ILD han mostrado resultados prometedores en cuanto a su implementación como metodología educativa, como se discute en [49], en donde se reportan resultados favorables en la implementación de actividades, especialmente en lo referente al cambio de rol de los estudiantes en la modalidad a distancia con respecto a la convencional. En este sentido, la presente investigación también explora la factibilidad del uso de simulaciones PhET en la modalidad a distancia de la asignatura de Física Conceptual.

Además, en [49] se contempla la posibilidad de diseñar un curso completo basado en Hojas de Actividades e ILD. En este aspecto, el presente trabajo de investigación muestra un ejemplo de la implementación para un curso de Física Conceptual completo.

En [50] se reportan resultados favorables respecto al uso de simulaciones PhET como herramienta didáctica, apoyadas con Hojas de Actividades como tareas asignadas a grupos de estudiantes en los temas de circuitos eléctricos. Los análisis de la ganancia conceptual, factor de concentración y test de retención muestran que el uso de las simulaciones en secuencias didácticas es efectivo. Por otra parte, la opinión de los grupos de estudiantes sobre el uso de las simulaciones fue favorable.

La problemática didáctica sobre el uso de las simulaciones PhET por parte de docentes y la información relevante para su diseño ha sido explorado en [51], en donde se concluye que los docentes requieren información sobre el uso de las simulaciones por parte de los estudiantes para evaluar de una mejor manera su desempeño y aprendizaje, y para evaluar y rediseñar las Hojas de Actividades.

Una posibilidad no explorada en esta investigación fue la aplicación de exámenes previos al uso de las simu-

laciones, debido a que el tiempo transcurrido apenas fue suficiente para implementar para implementar y responder las Hojas de Actividades e ILD y dar retroalimentación a los grupos de estudiantes a través de las discusiones grupales, reduciendo notoriamente la posibilidad de emplear tiempo de la clase a la aplicación de pre exámenes. El objetivo de esta investigación está centrado en indagar si la implementación del compendio [53] para el temario completo de la asignatura de Física Conceptual es factible, teniendo oportunidades para la mejora de su diseño, lo cual se valoró a partir de las respuestas de las Hojas de Actividades o de las ILD.

## II. METODOLOGÍA

En el presente estudio, el proceso de diseño de Hojas de Actividades e ILD basadas en simuladores PhET constó de varias etapas, en la primera de las cuales se identificaron las simulaciones disponibles que sirvieron para cubrir los temas del formato de planeación didáctica de la asignatura de Física Conceptual. Cada tema de la asignatura fue asociado a una simulación que sirvió como base para diseñar la actividad o ILD correspondiente.

En el diseño de las Hojas de Actividades e ILD se tomaron como guía las ideas de la filosofía PhET, que se discute en [52], donde los objetivos de aprendizaje deben ser específicos, usando verbos que sean medibles y que provean retos para que los estudiantes puedan explorar las simulaciones.

El compendio de Hojas de Actividades e ILD diseñadas para la asignatura de Física Conceptual está disponible en [53].

La selección de datos para el análisis presentado en este trabajo se derivó de la elección y evaluación de reactivos representativos de las Hojas de Actividades y las ILD.

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS HOJAS DE ACTIVIDADES

El proceso de diseño de las Hojas de Actividades basadas en simulaciones PhET inició con una reunión de docentes, en la cual se plantearon los objetivos de los temas de la asignatura y cómo las simulaciones serían usadas para desarrollar actividades.

Las Hojas de Actividades diseñadas se implementaron en el aula. Con base en la respuesta de los estudiantes,

se identificaron áreas de oportunidad para mejorarlas. También se identificaron algunas problemáticas relacionadas con la implementación, cuyos detalles se describen en la sección de conclusiones.

Las Hojas de Actividades fueron distribuidas al grupo y trabajaron de forma independiente con el uso de las simulaciones. Después, los temas y preguntas se revisaron en el grupo correspondiente para dar retroalimentación. Para este estudio, las respuestas del grupo se clasificaron en tres categorías: satisfactoria (S), parcialmente satisfactoria (PS) y no satisfactoria (NS).

Una de las limitantes en este trabajo relacionada con la clasificación es que no se distinguen las respuestas satisfactorias que hayan surgido de la interacción estudiante-simulación, complementando sus conocimientos previos, de aquellas respuestas satisfactorias que se deben mayormente a los preconceptos de cada estudiante.

#### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS ILD

El proceso de diseño e implementación de las ILD en la asignatura de Física Conceptual se basó en la misma metodología para el diseño de Hojas de Actividades. Las Clases Interactivas Demostrativas constan de hojas de respuestas en las cuales los estudiantes respondieron con base en sus creencias o conocimientos previos. Después, las docentes procedieron a usar la simulación correspondiente al tema de la clase. Los grupos de estudiantes pudieron volver a contestar las preguntas basándose en los resultados de la simulación. De esta manera obtuvieron retroalimentación inmediata, pudiendo contrastar las predicciones iniciales contra lo mostrado por la simulación.

En cuanto a la clasificación de respuestas a las ILD, dado que están basadas en predicciones e ideas que cada estudiante aporta previo a la simulación, se consideró medir en este trabajo el impacto que esta tuvo en cada tema, es decir, se clasificaron como alto impacto (AI) si las predicciones están alejadas de la respuesta correcta, mediano impacto (MI) si están relacionadas medianamente con la respuesta correcta y nulo impacto (NI) si son considerablemente consistentes con la respuesta correcta, lo cual sugiere que el estudiante ya sabía la respuesta previamente a la demostración hecha en clase.

Dado que se consideró que *a priori* las predicciones hechas por los grupos de estudiantes no deben clasificarse

como correctas/incorrectas o satisfactorias/insatisfactorias, se optó en este trabajo por observar el contraste entre las predicciones y las respuestas basadas en la simulación PhET.

#### ESTUDIO DE SEGUIMIENTO DE ESTUDIANTES

Para evaluar globalmente la implementación de las Hojas de Actividades e ILD se hizo un estudio de seguimiento a 17 estudiantes que cumplieron con la entrega de todos los trabajos. Esto es una limitante del seguimiento, ya que sería deseable que una mayor cantidad de estudiantes cumpliera con la entrega de todos los trabajos. A cada estudiante se le asignó un índice promedio entre 0 y 1, dependiendo de la clasificación de las respuestas seleccionadas mencionadas en este estudio, para darle seguimiento a lo largo del semestre.

En las Hojas de Actividades se les dio seguimiento a las respuestas de la primera ley de Newton, tercera ley de Newton y energía. Por otro lado, se le dio seguimiento a las ILD de la segunda ley de Newton, colisiones, gravedad, movimiento de proyectiles, naturaleza atómica y líquidos.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la implementación de las Hojas de Actividades e ILD basadas en PhET propuestas en el compendio mostrado en <sup>[53]</sup>. No se incluye en esta sección el análisis de las respuestas a la actividades de rotación, de gases ni de cambios de fase, debido a que en un grupo no se aplicaron las actividades de gases y cambios de fase y en los dos grupos se abordaron versiones diferentes a la actividad de rotación mostrada en <sup>[53]</sup>.

#### ACTIVIDAD SOBRE LA PRIMERA LEY DE NEWTON

Los objetivos de aprendizaje de esta actividad están centrados en la definición del concepto de fuerza, fuerza neta y equilibrio de fuerzas <sup>[53, p. 2]</sup>.

De la actividad sobre la primera ley de Newton, basada en la simulación PhET Fuerzas y Movimiento, se seleccionó para este estudio estas preguntas: 1.- Juega con la simulación y define con tus propias palabras: ¿qué es una fuerza?; 7.- ¿Cómo le puedes llamar a esa suma de fuerzas? y 8.- ¿En cuál de los tres casos tu carrito de dulces está en equilibrio? Se analizaron 50 Hojas de Actividades.



En cuanto a la pregunta 1, se encontró que hubo 38 S (satisfactoria), 9 PS (parcialmente satisfactoria) y 3 NS (no satisfactoria). Se determinó que las clasificadas como PS se debió a respuestas incompletas: usaron términos o conceptos incorrectos o, aunque algunos fueron parcialmente correctos al referirse a la fuerza como una “cantidad vectorial”, no aportaron información relacionada con el movimiento o estado de un objeto.

En relación con la pregunta 7, se encontró que hubo 43 S, 1 PS, 5 NS. Las PS se clasificaron de esta forma dado que la fuerza neta se explicó como una “diferencia de fuerzas” o ideas similares. Las 5 NS se clasificaron de esa manera debido a que no identificaron la suma de fuerzas como una fuerza neta o resultante. Finalmente, en la pregunta 8 se encontraron 50 S. La Figura 1 resume los resultados.

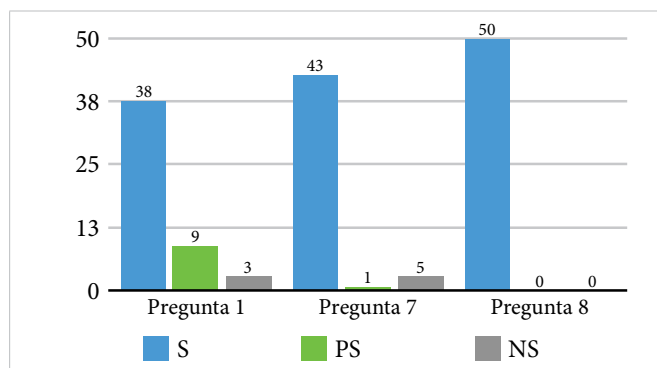


Figura 1. Resultados del análisis de respuestas de la actividad sobre la primera ley de Newton. La clasificación es satisfactorias (S), parcialmente satisfactorias (PS) y no satisfactorias (NS).

### ACTIVIDAD SOBRE LA TERCERA LEY DE NEWTON

Esta actividad está basada en la simulación PhET sobre la tercera ley de Newton-gravedad y órbitas. Los objetivos de aprendizaje de esta actividad fueron identificar las fuerzas de acción-reacción y describir cualitativamente la fuerza de interacción entre el sol y la tierra [53, p. 5].

De la actividad sobre la tercera ley de Newton se seleccionaron las preguntas 1.5 y 1.6, que respectivamente consisten en dibujar un diagrama de fuerzas de acción-reacción e identificar las cantidades físicas que determinan la magnitud de la fuerza en el sistema sol-tierra. Se analizaron 46 Hojas de Actividades.

De los resultados para la pregunta 1.5, se tuvieron 19 S (satisfactoria), 22 PS (parcialmente satisfactoria) y 5 NS

(no satisfactoria). Se determinó que la principal causa para clasificar las respuestas a la pregunta 1.5 como PS se debió a la falta del diagrama solicitado. La Figura 2 muestra un ejemplo de los diagramas considerados como satisfactorios. Se tomaron medidas al respecto para hacer más clara esta pregunta, como se discutirá más adelante. La obtención de las NS se debió principalmente a que no se respondió a esta pregunta.

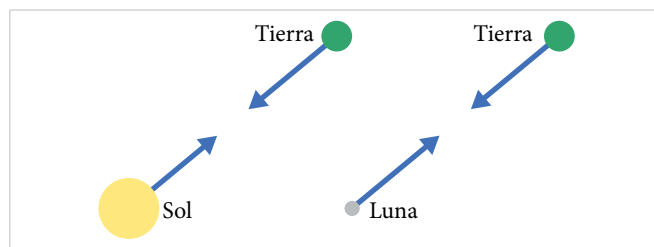


Figura 2. Ejemplo de respuesta clasificada como satisfactoria (S) de la pregunta 1.5 de la actividad sobre la tercera ley de Newton.

En la pregunta 1.6 se obtuvo 41 S, 3 PS y 2 NS. Se consideró PS a las respuestas que omitieron la masa o la distancia. La razón por la que se clasificó una respuesta como NS fue principalmente porque la respuesta no está relacionada con las cantidades de masa y distancia en los sistemas mostrados en la simulación. La Figura 3 resume los resultados de la actividad.

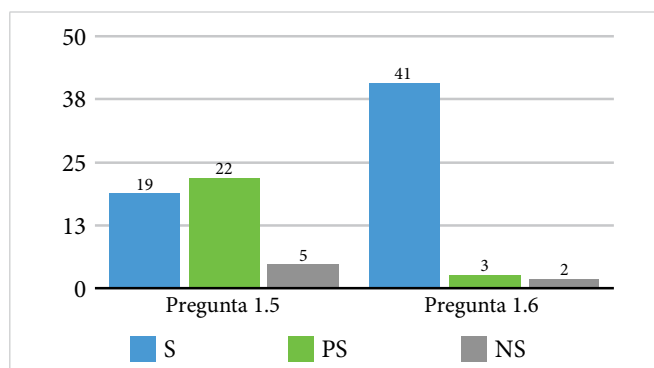


Figura 3. Resultados del análisis de respuestas de la actividad sobre la tercera ley de Newton.

### ACTIVIDAD SOBRE ENERGÍA

La actividad de energía tuvo como objetivo de aprendizaje la definición de los conceptos de energía mecánica, cinética y potencial, así como explicar el principio de conservación [53, p. 9].

En este trabajo, se seleccionó la pregunta 1, que está relacionada con la información que muestra la simulación PhET Energía en la Pista de Patinaje, para identificar la

energía cinética y la energía potencial de una persona en una patineta. En específico, se seleccionaron las preguntas 1.1, que consiste en describir las energías cinética, potencial y total en el punto más alto de la rampa de la patineta, y 1.2, que consiste en describir las mismas energías en el fondo de la rampa. Se analizaron 40 Hojas de Actividades.

Con respecto a la pregunta 1.1, se obtuvo 33 S (satisfactoria), 6 PS (parcialmente satisfactoria) y 1 NS (no satisfactoria). Las respuestas se clasificaron como PS en los casos en donde se omitió mencionar la energía cinética, la energía potencial o la energía total. La respuesta NS se clasificó de esta forma debido a que no se contestó la pregunta.

En lo relacionado con la pregunta 1.2, del análisis de las Hojas de Actividades se obtuvo 24 S, 6 PS y 10 NS. El criterio de clasificación de las respuestas PS se basó en si la respuesta es clara o no. Se observó que 3 de las 6 PS tenían una redacción confusa, mientras que las otras 3 estaban incompletas en el mismo sentido que la pregunta 1.1. Las respuestas NS fueron clasificadas de esta manera principalmente porque mencionaron que la persona en la patineta estaba en reposo, lo cual contradice a lo mostrado en la simulación. Hay indicios que 4 de las 6 NS se basaron en una interpretación incorrecta de la imagen mostrada en la simulación. Los resultados del análisis presentado en esta sección condujeron a la conclusión de la necesidad de reformular la pregunta 1.2, como se discutirá en la sección de conclusiones. La Figura 4 resume los resultados de la actividad.

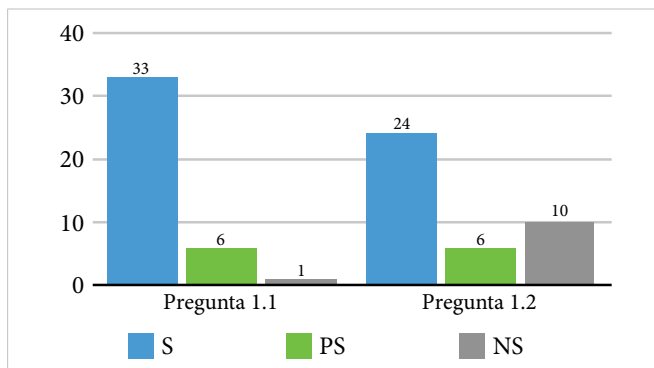


Figura 4. Resultados del análisis de respuestas de la actividad sobre la energía cinética y potencial.

#### ILD SOBRE MOVIMIENTO EN UNA DIMENSIÓN

Los objetivos de la ILD sobre movimiento rectilíneo fueron que el grupo hiciera predicciones de la forma de

la gráfica de posición con respecto al tiempo en diversas situaciones, por ejemplo, que un objeto se mueva de cierta posición a otra a rapidez constante o que se mueva al ser empujado por una fuerza constante. También se pidió que hicieran predicciones sobre las gráficas de velocidad y tiempo y aceleración con respecto al tiempo, y que justifiquen sus respuestas. La ILD sobre movimiento en una dimensión estuvo basada en la simulación PhET Fuerzas en una Dimensión [53, p. 18].

Para el análisis presentado en este trabajo se seleccionó la demostración 1 de la ILD, la cual consiste en que se predigan y dibujen las gráficas de posición, velocidad y aceleración de un objeto que se mueve desde la posición de  $-10$  m hasta la posición  $+10$  m a rapidez constante. Se seleccionaron 13 hojas de respuestas, dado que el resto de las hojas de trabajo se basaron en una versión distinta a la del compendio [53, p. 18].

Los resultados del análisis consisten en 11 AI (alto impacto), 0 MI (mediano impacto) y 2 de NI (nulo impacto) en cuanto a la predicción de la gráfica de posición. Las predicciones acerca de la gráfica de velocidad del objeto fueron clasificadas como 10 AI, 0 MI y 3 NI. En lo que respecta a las predicciones sobre la gráfica de aceleración, las respuestas fueron clasificadas como 11 AI, 0 MI y 2 NI. Los resultados son claros: la gran mayoría de las predicciones dibujadas no concordaron con las gráficas de posición, velocidad y aceleración del problema discutido, previo al uso de la simulación. La Figura 5 resume los resultados de la actividad.

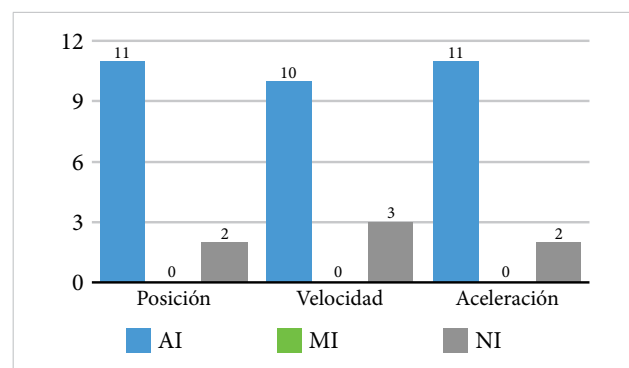


Figura 5. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre movimiento en una dimensión.

#### ILD SOBRE LA SEGUNDA LEY DE NEWTON

La ILD sobre la segunda ley de Newton solicitó predicciones acerca de la magnitud de la fuerza aplicada de varios objetos de diferente masa en comparación con la

fuerza de fricción entre el piso y el objeto, si es que se quiere moverlos.

Para el análisis se usaron las respuestas de las hojas ILD Segunda Ley de Newton, basada en la simulación PhET Fuerzas y Movimiento [53, p. 24]. Las preguntas seleccionadas para el análisis fueron la 1, que consiste en predecir la magnitud de la fuerza aplicada con respecto a la fuerza de fricción entre el piso y un cajón de madera, y la 3, que consiste en dibujar un diagrama de fuerzas en donde se muestre la fuerza aplicada y la fuerza de fricción para varios objetos, como una cubeta con agua, una persona, un refrigerador y una niña. Se analizaron las respuestas en el caso específico de una fuerza de 500 N aplicada a una cubeta con agua con una masa de 100 kg. Se analizaron 43 hojas de respuestas de la ILD sobre la segunda ley de Newton.

Los resultados obtenidos en este análisis para la pregunta 1 fueron 1 AI (alto impacto), 0 MI (mediano impacto) y 42 NI (nulo impacto). Esto significa que la gran mayoría de las predicciones concuerdan con que la fuerza necesaria para mover el cajón debe ser mayor que la fuerza de fricción entre el piso y el cajón de madera.

Respecto a la pregunta 3, los resultados obtenidos fueron 8 AI, dado que no se incluyó el diagrama solicitado, 2 MI, dado que las magnitudes mostradas en los diagramas parecen ser arbitrarias (como las de la Figura 6), y 33 NI, en las que se mostraron diagramas razonables.


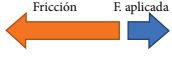
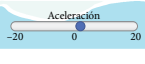

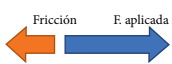





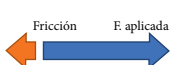
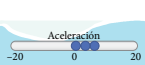
| Objeto  | Con una fuerza de 500 N, ¿se movería el objeto? Explica.  | Dibuja el diagrama de fuerzas (aplicada y de fricción).                             | Dibuja cómo quedaría el medidor de aceleración.                                     |
|---|---|---|---|
|  | No, creo que el bote está muy pesado como para que se mueva con tan poca fuerza.                                    |  |  |
|  | Yo creo que sí, pero su aceleración sería un poco menor a la que se generó con la caja de 50 kg, pero sí se movería |  |  |
|  | No, si con una caja de 50 kg la aceleración ya se ve reducida, no me imagino con un refrigerador.                   |  |  |
|  | Definitivamente, la niña se movería y tendría incluso más aceleración que la caja, ya que es menos pesada.          |  |  |

Figura 6. Ejemplo de predicciones de la pregunta 3, clasificadas como mediano impacto (MI).

Los resultados de la pregunta 5 fueron 15 respuestas AI, dado que en las predicciones no identificaron ni a la masa ni a la fuerza neta como necesarias para conocer la aceleración de un objeto; 8 MI, dado que se omitieron la masa o la aceleración, y 20 NI, en las que correctamente se identificó a la masa del objeto y a las fuerzas que actúan sobre dicho objeto como necesarias para conocer la aceleración.

Un hallazgo importante del estudio de las respuestas AI es que más de la mitad mencionaron al tiempo y a la velocidad del objeto como necesarios para conocer su aceleración, probablemente porque los estudiantes tienen conocimiento previo de las ecuaciones de la cinemática. Sin embargo, las consideraciones de la ILD sobre la segunda ley de Newton están basadas en cambiar la masa de algún objeto y la magnitud de la fuerza aplicada para saber si se mueve con cierta aceleración o no, por lo que el omitir las cantidades físicas de masa y fuerza neta en la predicción fue considerado como respuesta AI. La Figura 7 resume los resultados de la actividad.

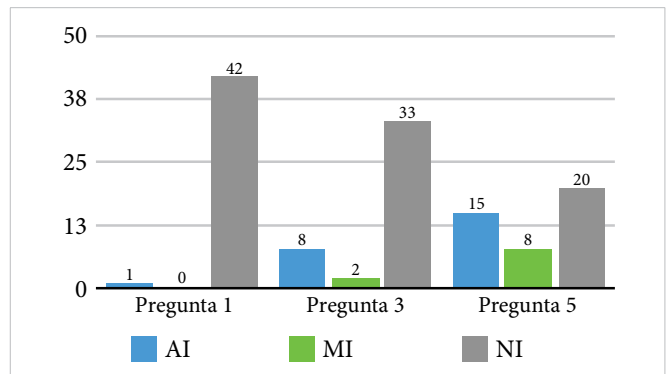


Figura 7. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre la segunda ley de Newton.

### ILD SOBRE COLISIONES

La ILD de colisiones fue diseñada para que el grupo hiciera predicciones acerca de lo que sucede luego de la colisión entre dos bolas con masas distintas. La actividad está basada en la simulación PhET Colisiones [53, p. 30].

Para este estudio se seleccionó las preguntas 1.4, la cual se trata de identificar la bola que tiene mayor momento en la simulación; 2.4, que consiste en predecir si dos bolas de la misma masa y rapidez que se mueven en direcciones opuestas tienen el mismo momento o no, y 3.1 y 4.1, orientadas a predecir el movimiento posterior a la colisión de dos bolas con masa y rapidez distintas y



masa y rapidez iguales, respectivamente. Se analizaron 40 hojas de predicciones de esta ILD.

En la pregunta 1.4 se obtuvo 14 AI (alto impacto), que fueron clasificadas de esta forma debido a que no se consideró la masa de la bola en la definición de su momento; 1 MI (mediano impacto), dado que fue una respuesta correcta pero no relacionada con la pregunta 1.4, y 25 NI (nulo impacto), pues en las respuestas se observó que se consideró la masa y la velocidad de la bola para definir su momento.

Los resultados de la pregunta 2.4 consistieron en 12 AI, 1 de MI y 27 de NI, es decir que 27 estudiantes respondieron que ambas bolas tienen el mismo momento lineal. Las respuestas AI fueron variadas: se respondió que las bolas se detienen o que salen disparadas hacia arriba o que una de las dos tiene mayor momento que la otra. La respuesta de MI se debe a que la respuesta es confusa en su redacción.

Los resultados de la pregunta 3.1 fueron 8 AI, 3 MI y 29 NI. Las respuestas AI fueron clasificadas de esta manera debido a que en la predicción una de las bolas o ambas se detienen. Las respuestas MI se debe a que se predijo una dirección incorrecta de la dirección de movimiento de la bola 2, siendo esta de mayor masa y rapidez antes de la colisión.

Los resultados de la pregunta 4.1 fueron 27 AI (similares a la predicción mostrada en la Figura 8), 1 clasificada como MI debido a su redacción confusa y 12 NI. Los resultados muestran que hubo dificultad en predecir el resultado de la colisión inelástica de dos bolas de la misma masa y rapidez que se mueven en direcciones opuestas para colisionar en una dimensión, siendo el resultado correcto que las bolas se detienen como resultado de su colisión. La Figura 9 resume los resultados de la actividad.

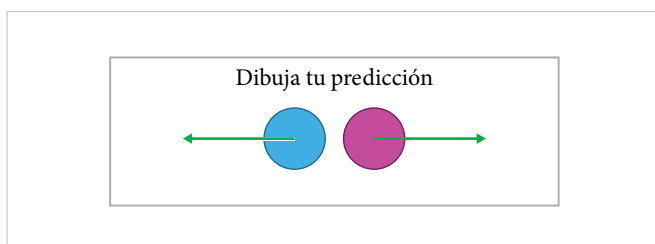


Figura 8. Ejemplo de predicciones de la pregunta 4.1, clasificadas como AI. En la pregunta se tiene la situación de la colisión inelástica de dos masas iguales que viajan en sentidos opuestos en una dimensión con la misma rapidez.

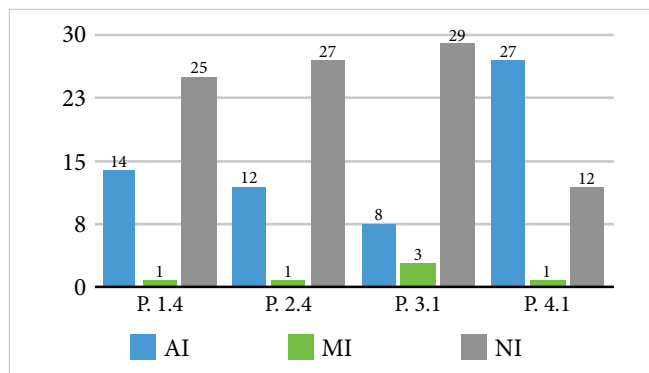


Figura 9. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre colisiones en una dimensión.

### ILD SOBRE FUERZA DE GRAVEDAD

Las demostraciones en la ILD de la fuerza de gravedad [53, p. 36] fueron diseñadas para que el grupo hiciera predicciones respecto a la magnitud de la fuerza de gravedad entre dos esferas con masas iguales o distintas, estando sus centros separados por una cierta distancia. Se les pidió también que hicieran predicciones acerca de la magnitud de la fuerza de gravedad entre las esferas si la distancia de separación aumenta.

En este trabajo se seleccionó para su análisis las respuestas a las preguntas 1.1, 1.2 y 2.1. La pregunta 1.1 está relacionada con la predicción de la magnitud de la fuerza gravitacional entre dos objetos de la misma masa y separados cierta distancia. La pregunta 1.2 consiste en predecir qué ocurre con las magnitudes de las fuerzas si una de las masas aumenta al doble. Finalmente, la pregunta 2.1 consiste en indagar lo que le ocurre a la magnitud de la fuerza gravitacional si la distancia de separación se duplica. Se presenta a continuación los resultados de esta investigación, que consta del análisis de 41 hojas de predicciones de la ILD de gravedad.

En relación con la pregunta 1.1 se obtuvo 2 AI (alto impacto), 2 MI (mediano impacto) y 37 NI (nulo impacto). Esto significa que la mayoría de los estudiantes predijo que la magnitud de las fuerzas de atracción entre las dos masas es igual. Las respuestas MI fueron clasificadas de esta forma debido a que no se incluyeron los diagramas solicitados en la hoja ILD.

Las respuestas a la pregunta 1.2 muestran que 27 estudiantes consideraron que las fuerzas de atracción entre dos objetos de diferente masa son distintas en magnitud (como se ejemplifica en la Figura 10) o no se consideró la masa en la definición de la fuerza gravitacional, por

lo que fueron clasificadas como AI. Se obtuvo también 1 respuesta MI, dada la redacción confusa, y 13 NI, en las que se predijo correctamente que la magnitud de la fuerza de atracción gravitacional es mayor que en la pregunta 1.1, pero que siguen siendo iguales entre los objetos de la situación de la pregunta 1.2.

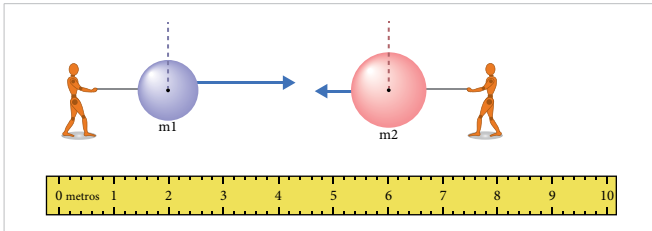


Figura 10. Ejemplo de predicciones de la pregunta 1.2 clasificadas como de alto impacto.

De los resultados de la pregunta 2.1 se encontró 11 AI, 1 MI y 29 NI. Se observa aquí que la mayoría de los estudiantes predijo correctamente que la fuerza de atracción gravitacional disminuye. Sin embargo, las 11 respuestas AI predijeron un factor incorrecto por el cual la magnitud de la fuerza debe disminuir si se duplica la distancia. Nótese que en la hojas ILD de gravedad del compendio no se hace mención explícita a la expresión matemática de la ley de gravitación de Newton, por lo que no se espera en la predicción que se mencione un factor en específico. No se determinó en este estudio el porqué se predijeron factores incorrectos. La Figura 11 muestra un resumen del análisis de las respuestas a la ILD de gravedad.

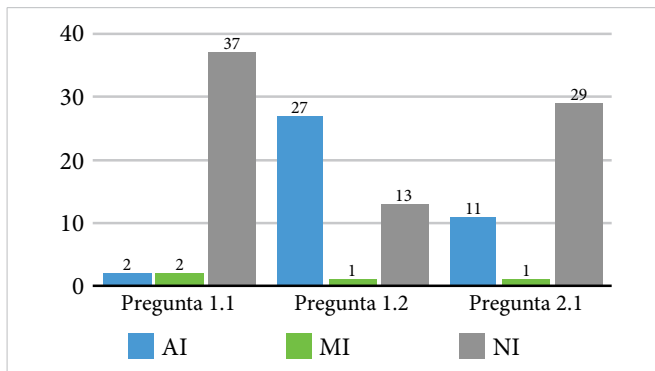


Figura 11. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre gravedad.

### ILD SOBRE PROYECTILES

La ILD sobre movimiento de proyectiles [53, p. 40] se basó en que se hicieran predicciones acerca de la trayectoria de un proyectil disparado con un cañón en el cual se cambia el ángulo con respecto de la horizontal.

Para el análisis se seleccionó la pregunta 1, que consistió en que se hicieran predicciones de la trayectoria de un proyectil lanzado a diferentes ángulos con respecto a la horizontal y a partir de un ejemplo mostrado en las hojas de la ILD. También se seleccionó la pregunta 3, en la que había que dibujar los vectores de velocidad y aceleración de un proyectil en varios puntos de la trayectoria resultante luego de ser lanzado por un cañón en la simulación. Se analizaron 36 hojas de predicciones sobre el movimiento de proyectiles.

Los resultados de la pregunta 1 sobre las predicciones de trayectorias fueron clasificados como 0 AI (alto impacto), 2 MI (mediano impacto) y 34 NI (nulo impacto). Esto significa que la gran mayoría de las predicciones concuerda con las trayectorias descritas por el proyectil en diversas circunstancias.

Los resultados de la pregunta 3, sobre el dibujo de los vectores de velocidad y aceleración en tres puntos de la trayectoria parabólica, fueron clasificados como 21 AI, 7 MI y 8 NI, en las cuales los vectores de velocidad son razonablemente tangentes a la trayectoria y en donde la aceleración apunta siempre hacia abajo. Las respuestas AI fueron clasificadas de esa manera en los casos donde no se dibujaron los vectores o en donde los vectores velocidad y aceleración no representó la situación física del proyectil. Algunas de estas respuestas consistieron en dibujos de vectores velocidad siempre horizontales o aceleración en direcciones opuestas en dos puntos de la trayectoria. En uno de los casos se predijo que la aceleración “siempre es contraria al movimiento del proyectil”. Los resultados de esta ILD se muestran en la Figura 12. La sección de conclusiones menciona algunos comentarios respecto a los resultados de esta subsección.

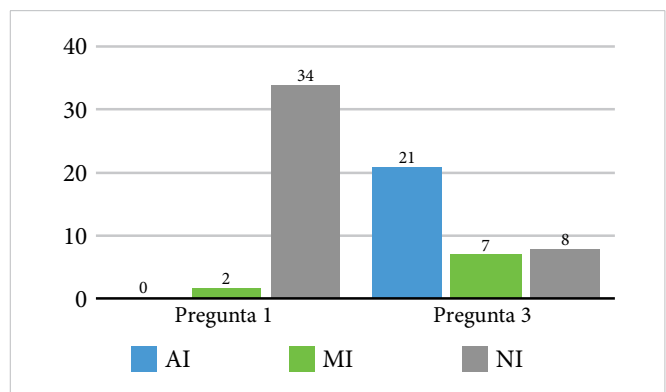


Figura 12. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre el movimiento de proyectiles.

### ILD SOBRE NATURALEZA ATÓMICA DE LA MATERIA

La simulación PhET llamada Construyendo un Átomo aborda la naturaleza atómica de la materia y permite construir un átomo al agregar protones y neutrones al núcleo y electrones a su alrededor. En la ILD se pidió que hicieran predicciones de la carga neta y número de masa de un átomo en diversas situaciones. También se exploró el concepto de estabilidad nuclear.

En este trabajo se eligió la pregunta 1.1 de la demostración 1 de la hoja ILD de Naturaleza Atómica de la Materia [53, p. 56], que consiste en predecir los cambios en la carga neta y número de masa de un átomo, empezando desde cero, si se agrega primero un protón, luego un neutrón y finalmente un electrón. La demostración 1 de la ILD define el número de masa como la cantidad de protones y neutrones que contiene el átomo. Esta pregunta se eligió para análisis porque resume a nivel fundamental la definición de carga neta y masa atómica de un átomo. Se analizaron 34 hojas de respuestas a la ILD sobre la naturaleza atómica.

En la pregunta 1.1, al agregar un protón se obtuvo 3 AI (alto impacto, como el ejemplo de la Figura 13), 0 MI (mediano impacto) y 31 NI (nulo impacto). Esto muestra que la mayoría de las respuestas predijeron correctamente que al agregar un protón se incrementa la carga en 1 y la masa en 1. Y al añadir el neutrón en la simulación se obtuvo 5 AI, 0 MI y 29 NI, lo que indicó que 5 predicciones no consideraron la aportación a la masa atómica del neutrón.

1.1 Si se agrega cada una de las siguientes partículas, en el orden que se indica, ¿cómo cambiarán la carga neta y el número de masa? Escribe tus predicciones en la siguiente tabla:

| Se agrega: | Carga neta | Número de masa |
|------------|------------|----------------|
| protón     | positiva   | 1              |
| neutrón    | neutra     | 2              |
| electrón   | neutra     | 3              |

Figura 13. Ejemplo de predicciones de la pregunta 1.1 clasificadas como alto impacto.

Respecto a la pregunta 1.1, al agregar el electrón se obtuvo 8 AI, 0 MI y 26 NI. Esto significa que 8 estudiantes tuvieron dificultad con la definición de carga neta y masa atómica desde el inicio de la ILD. Las dificultades están principalmente centradas en que consideraron que el electrón aporta masa al átomo, lo cual no está en la definición dada en la ILD. La justificación está relacionada con que la masa atómica “es la suma de partícu-

las” en el átomo, por lo que erróneamente se predijo que al agregar el electrón, la masa sube a 3. Los resultados de este análisis se resumen en la Figura 14.

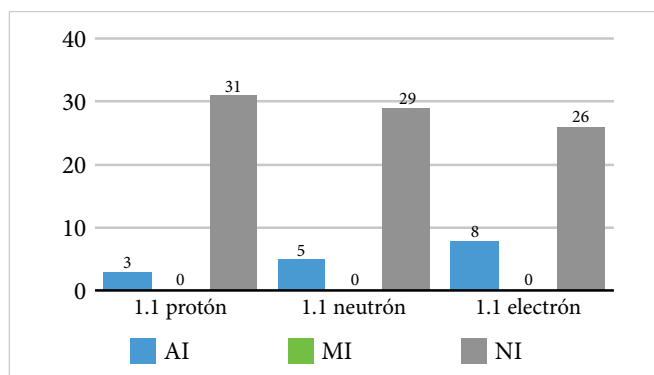


Figura 14. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre naturaleza atómica de la materia.

### ILD SOBRE LÍQUIDOS

En las demostraciones de la ILD sobre líquidos [53, p. 62] se exploran los conceptos de la presión de fluidos en el fondo de un tanque que los contiene o en la superficie. Se le pidió al grupo que hiciera predicciones respecto a mediciones de presión en diversas situaciones, considerando o no la presión atmosférica o llenando el tanque con líquidos de distintas densidades.

Para el análisis de resultados mostrado en este trabajo se seleccionó las preguntas 1.3, que está relacionada con la identificación de presión atmosférica y la ejercida por un líquido; 1.4, que consiste en que se identifiquen las variables físicas que determinan la medida de presión en el manómetro mostrado en la simulación; 1.5, que consiste en predecir qué es lo que pasa en la medida de la presión si se desprecia la presión atmosférica en la simulación, y 2.1, que consiste en cambiar la situación de la simulación a un líquido de mayor densidad que el agua (se cambió el líquido a miel). Se analizaron las respuestas y predicciones de 30 hojas de la ILD de líquidos.

Las predicciones de la pregunta 1.3 fueron clasificadas como 10 AI (alto impacto), principalmente porque las predicciones rondan alrededor de que en el fondo del recipiente la presión sería 0; 1 MI (mediano impacto), dado que la explicación es confusa, y 19 NI (nulo impacto). Como puede verse, la tercera parte de las predicciones manifestaron incorrectamente que la lectura en el fondo del tanque es nula, lo cual se discutirá un poco más en la sección de conclusiones.

Con respecto a la pregunta 1.4 sobre la identificación de variables, se encontró que las predicciones fueron 6 AI, dado que no están relacionadas con los conceptos de profundidad, densidad y/o gravedad; 9 MI, porque omiten alguna de estas cantidades en su descripción o mencionan otra que está relacionada como el volumen o el área, y 15 NI. Los resultados muestran que en la mitad de las predicciones a esta pregunta no se identificaron correcta y completamente las variables relevantes en el problema.

Los resultados de la pregunta 1.5 se clasificaron en 10 AI, principalmente porque estas respuestas predicen que la presión en el fondo del tanque será 0 al apagar la presión atmosférica en la simulación; 0 MI y 20 NI, dado que concuerda que al apagar la presión atmosférica en la simulación, la lectura del manómetro marcará la presión del líquido en el tanque.

Cuando se cambió de agua a miel en la simulación en la pregunta 2.1, los resultados se clasificaron en 4 AI y 3 MI, por no reconocer o reconocer parcialmente que la profundidad en el tanque con miel tendrá efectos sobre la medida de la presión, y 23 NI, por lo que se muestra que la mayoría de las predicciones concuerda con el aumento de presión cuanto más profunda es la medición en el tanque que contiene miel. Un resultado interesante es que solo 3 de las respuestas no identificaron las variables físicas relevantes en la medición de la presión pero predijeron el aumento de presión con la profundidad en el tanque. Se identificó también una posible causa de confusión en la operación de la simulación PhET Bajo Presión, en la que se basa la ILD propuesta en el compendio. Los detalles se discuten en la sección de conclusiones.

La Figura 15 resume los resultados del análisis de las predicciones sobre la ILD de líquidos.

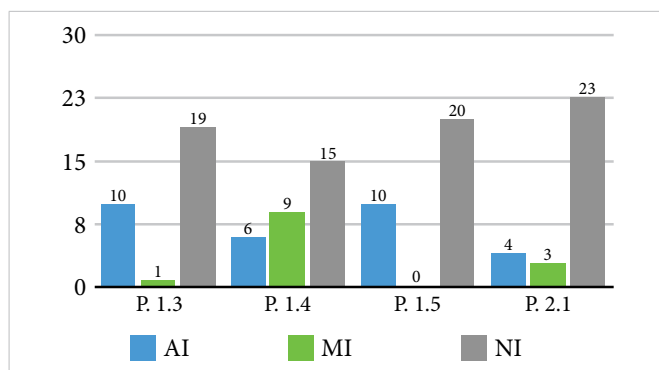


Figura 15. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre líquidos.

### GRADO DE ACEPTACIÓN Y PORCENTAJE DE APROVECHAMIENTO

Durante el desarrollo del semestre agosto-diciembre de 2021 se observó que los estudiantes no tuvieron problemas para trabajar en las actividades basadas en simulaciones en PhET y estas fueron entregadas generalmente a tiempo, aunque no completamente por la totalidad del estudiantado, por lo que se corroboró la factibilidad del uso del compendio. Por otro lado, se observó que en el desarrollo de las clases, las ILD funcionaron como se esperaba: lo estudiantes hicieron preguntas relacionadas con la variación de los diversos parámetros en las simulaciones para explorar sus efectos. Sin embargo, el tiempo de las clases no siempre resultó suficiente para responder a todos estos cuestionamientos frente a grupo.

Otro de los resultados obtenidos de la implementación piloto de las Hojas de Actividades e ILD fue que en algunas ocasiones el grupo cuestionó el funcionamiento de alguna simulación dado que lo mostrado en la misma contradecía sus expectativas. Los resultados presentados de la ILD en las subsecciones anteriores muestran las predicciones de mayor impacto.

La Figura 16 expone el nivel de aceptación de estudiantes de las Hojas de Actividades e ILD basadas en simulaciones PhET. Específicamente, se muestra el resultado al cuestionamiento de si consideran que las Hojas de Actividades e ILD “Me ayudan a entender mejor”. Puede verse que la mayoría respondió estar “de acuerdo” o “completamente de acuerdo”. Se identificó solo un caso en donde el uso de las simulaciones, aunado a la modalidad a distancia mediante el uso de la plataforma Microsoft Teams, trajo problemas adicionales al uso en sí de los simuladores.

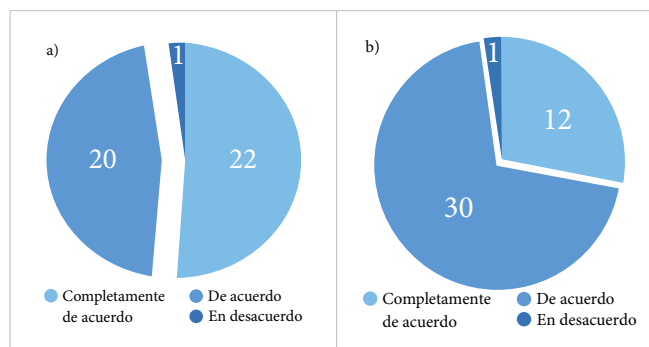


Figura 16. a) Nivel de aceptación de las ILD y b) aceptación de actividades. Se muestran las respuestas del grupo a si consideran que las Hojas de Actividades e ILD basadas en PhET “Me ayudan a entender mejor”.

Los resultados de satisfacción de usuarios son análogos a los reportados en [54], en donde se manifiesta la aceptación de estudiantes de nivel licenciatura de las secuencias didácticas diseñadas para el uso de simuladores PhET.

Una de las mediciones preliminares en este trabajo consistió en tratar de identificar alguna diferencia entre los promedios de calificación final, tomando como referencia los grupos del semestre agosto-diciembre de 2020, los cuales se desarrollaron sin el uso de las simulaciones pero en modalidad a distancia, también a través de la plataforma Microsoft Teams. El número de estudiantes inscritos en 2020 fueron 25 en el grupo A, 31 en el B, 28 en el C y 27 en el D.

La Figura 17 muestra los promedios de la asignatura para los dos grupos piloto del semestre agosto-diciembre 2021 (17 alumnos inscritos en el grupo A y 36 en el D) y para 4 grupos en 2020 en modalidad a distancia pero sin el uso de las Hojas de Actividades e ILD basadas en las simulaciones PhET. Una limitación de esta comparación es que aunque los grupos de 2020 se basaron en la misma carta descriptiva, cada docente cubrió el material de acuerdo con su propia metodología didáctica, todas sin el uso de PhET.

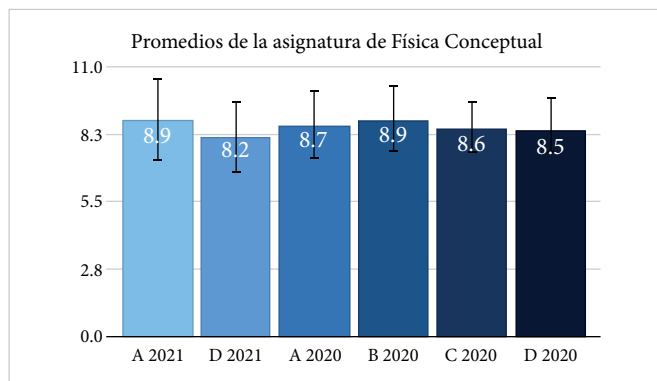


Figura 17. Comparación del promedio final de la asignatura. Se muestra el promedio de 4 grupos en modalidad a distancia sin el uso de PhET para el semestre 2020-II y 2 grupos piloto del periodo 2021-II en modalidad a distancia con Hojas de Actividades e ILD basadas en simulaciones PhET.

La Figura 17 no muestra para 2021 el grupo B (17 alumnos inscritos), dado que no participó en el grupo piloto, ni el grupo C (4 alumnos inscritos), debido a que este se llevó completamente en modalidad en línea sin el uso de las simulaciones.

Nótese que las mediciones mostradas en la Figura 17 parecen determinar que en la modalidad a distancia de

los semestre agosto-diciembre de 2020 y 2021, siendo en este último donde se aplicaron las Hojas de Actividades e ILD, el aprovechamiento fue el mismo, aunque el papel de los estudiantes cambió de ser mayormente pasivo a mayormente activo. Esto no debe ser sorprendente, se ha reportado en [55] que el uso de simulaciones PhET en actividades previas a los temas de alguna asignatura no produce un efecto directo en el aprendizaje de los temas.

En este aspecto, este trabajo concuerda con los resultados presentados en [55] respecto a que no se observa evidencia de un incremento en el porcentaje de aprovechamiento y a que las actividades con simulaciones PhET son bien aceptadas por los grupos de estudiantes. Se espera tener mediciones adicionales ya en modalidad presencial a partir de 2023.

#### RESULTADOS DEL ESTUDIO DE SEGUIMIENTO DE ESTUDIANTES

A continuación, se presentan los resultados del seguimiento a lo largo del semestre, para una muestra de 17 estudiantes que cumplieron con la entrega de todas las Hojas de Actividades y predicciones en las ILD.

En cuanto a las Hojas de Actividades, se tiene que solo 4 de los 17 estudiantes mostraron una tendencia a la alta, con base en el índice promedio (entre 0 y 1) asignado de acuerdo con sus respuestas a lo largo el semestre. De los 17 estudiantes, 8 tuvieron un índice aproximadamente estable (4 estudiantes con índice 1 y 5 estudiantes con índice promedio de 0.92) y 5 estudiantes tuvieron índice con comportamiento a la baja. La Figura 18 muestra tres casos como ejemplo del índice de seguimiento de las hojas de actividades.

Por otro lado, los resultados de seguimiento sugieren que hubo una mejoría progresiva en las predicciones de las ILD. El índice de seguimiento presentó una tendencia creciente en 10 de los 17 estudiantes de la muestra y 5 de los 17 estudiantes tuvieron un índice con comportamiento estático mientras que los restantes 2 mostraron una tendencia a la baja. La Figura 19 muestra tres casos como ejemplo del índice de seguimiento de las ILD.

#### IV. CONCLUSIONES

La utilidad del estudio presentado en este trabajo respecto a la implementación piloto del compendio de Hojas de Actividades e ILD queda manifiesta en los his-



togramas presentados en la sección de resultados y discusión. El histograma de resultados de la actividad de la primera ley de Newton (Figura 1) muestra que el uso de la simulación condujo a los estudiantes a respuestas mayormente satisfactorias, lo mismo que la actividad de energía.

La actividad de la tercera ley de Newton derivó en un histograma de resultados mayormente satisfactorio en la pregunta 1.6, pero en la pregunta 1.5 se identificó un componente importante de respuestas clasificadas como parcialmente satisfactorias. Los histogramas de las Figuras 1, 3 y 4 sugieren que las actividades correspondientes fueron útiles al momento de responder las preguntas, dado que los grupos piloto pudieron formular sus respuestas de forma satisfactoria en la mayoría de los casos. Además, el análisis de estos histogramas permite identificar problemáticas ya sea en el diseño de las Hojas

de Actividades o en la manipulación e interpretación de los resultados de las simulaciones.

En lo que respecta a la interpretación de los resultados del análisis de las ILD, los histogramas también son bastante elocuentes. Obsérvese que en la Figura 5 de los resultados del análisis de la ILD sobre movimiento en una dimensión se muestra claramente que existió una dificultad para que los estudiantes hicieran predicciones sobre las gráficas de posición, velocidad y aceleración. Aunque esto no es en sí un hallazgo novedoso, muestra claramente que es un problema para resolver en la asignatura de Física Conceptual.

Los histogramas de las Figuras 7, 11, 12 y 14 indican la problemática identificada en la implementación de las ILD, respectivamente, de la segunda ley de Newton, gravedad, movimiento de proyectiles y modelo atómico.

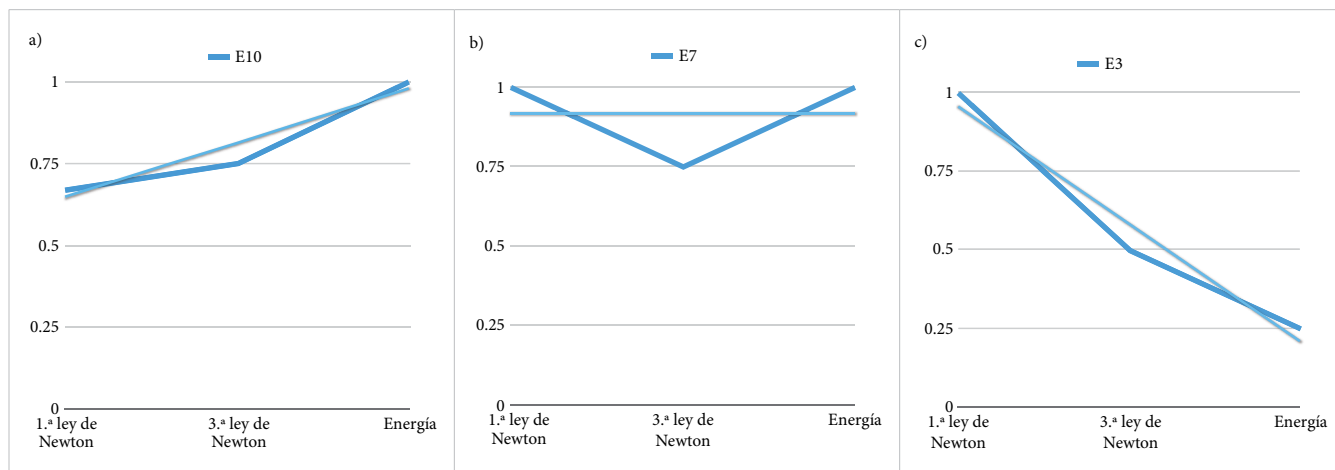


Figura 18. Ejemplos de índices promedio de estudiantes (E10, E7, E3) con tendencia a crecer (a), tendencia constante (b) y tendencia a la baja (c) en la clasificación de respuestas a las hojas de actividades.

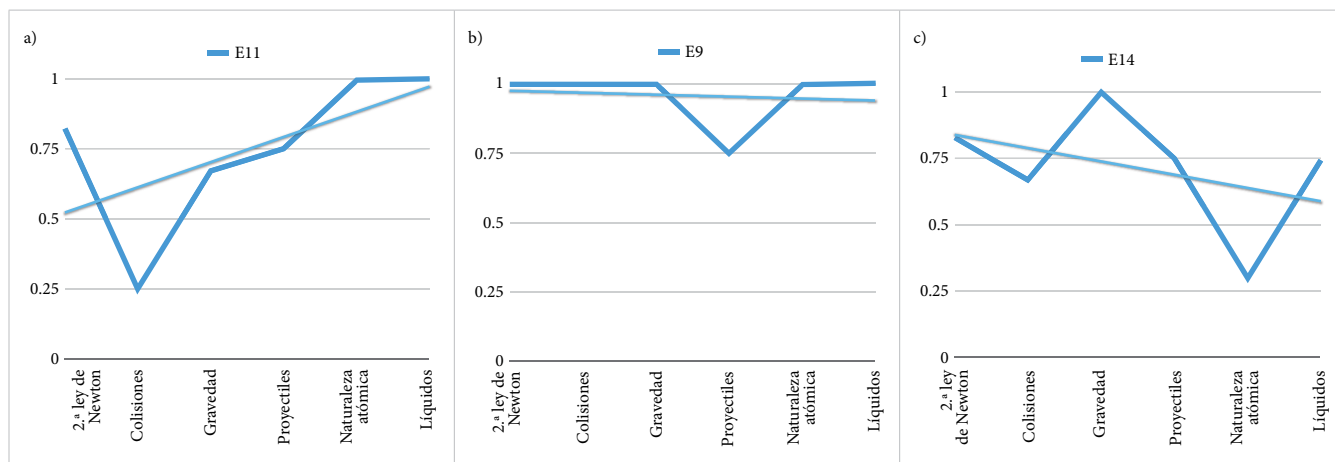


Figura 19. Ejemplos de índices promedio de estudiantes (E11, E9, E14) con tendencia a crecer (a), tendencia constante (b) y tendencia a la baja (c) en la clasificación de predicciones en las ILD.

La interpretación directa de los histogramas de las ILD sobre colisiones y líquidos, en las Figuras 9 y 15, quizá sea más complicada, dado que los histogramas muestran una clasificación variada de respuestas de alto, medio y nulo impacto. Sin embargo, aun en estos casos es posible identificar oportunidades de mejora en las hojas de las ILD. Se discuten los detalles particulares de cada actividad e ILD a continuación.

En lo que respecta a la actividad sobre la tercera ley de Newton, a partir de los resultados se deduce que la pregunta 1.5 debe ser modificada para indicar explícitamente que se debe incluir el diagrama de fuerzas. Por otro lado, se concluye también que debe agregarse una pregunta a la actividad para que se comparen las respuestas a las preguntas 1.5 y 1.6 que son en algunos casos incongruentes y parece haber indicios de que las magnitudes de los vectores mostrados en la simulación conducen a respuestas contradictorias.

Con base a los resultados del análisis de la pregunta 1.2 de la actividad de energía, se concluye que la pregunta debe modificarse para hacer notoria la medición de la rapidez de la persona en la patineta, ya que las respuestas NS se basan en afirmar que la persona está en reposo, lo cual es contradictorio con la rapidez que muestra la simulación.

El análisis de las predicciones sobre las gráficas de posición, velocidad y aceleración de un objeto, en la ILD sobre movimiento en una dimensión, muestra la utilidad de las simulaciones PhET como herramienta didáctica. Si, por un lado, las predicciones pueden diferir del comportamiento real del objeto bajo ciertas condiciones, los estudiantes pueden comprobar sus respuestas al presenciar la simulación de la situación física, ya que muestra las gráficas de posición, velocidad y aceleración en tiempo real, según las condiciones del montaje inicial del problema.

Se considera que el hecho de que un porcentaje alto de las predicciones no concuerda con los resultados reales abre una ventana de oportunidad para explorar los tópicos de la asignatura con el diseño de secuencias didácticas, como las sugeridas en este trabajo. Como se muestra en los resultados, en la ILD sobre movimiento en una dimensión las predicciones contrastaron más con respecto a los comportamientos reales de las diversas situaciones físicas exploradas.

De los resultados de la ILD de la segunda ley de Newton se concluye que los estudiantes requieren más ayuda en cuanto a la representación de un diagrama de fuerzas, como en el caso de la fuerza aplicada sobre un objeto y la fuerza de fricción entre este y el piso. Lo anterior se debe a que los resultados del análisis indican que casi la cuarta parte de las respuestas no incluyeron un diagrama de fuerzas.

Otra conclusión es que en las Hojas de Actividades e ILD propuestas en este trabajo no debe suponerse que los estudiantes identifican de manera inmediata las cantidades físicas relevantes en la definición de algún concepto de la física, aun cuando las Hojas de Actividades o de predicciones se basen en las relaciones entre estas cantidades. En los resultados se identificó que más de la mitad de las predicciones no identificaron a la masa y a la fuerza neta como necesarias para conocer la aceleración de un objeto en la simulación sobre la segunda ley de Newton. Se propone modificar la pregunta 5 de la ILD sobre esta simulación para que se exponga una justificación de la predicción con base en las respuestas anteriores.

Respecto a la ILD de colisiones, se concluye que el grupo tuvo mayor dificultad para predecir el resultado de la colisión inelástica en una dimensión de dos bolas de la misma masa y rapidez. Los resultados muestran mayor contraste entre las predicciones y sus respuestas correctas. Se especula que las figuras ilustrativas de los ejercicios mostrados en la hoja de ILD de colisiones quizá estén actuando como distractores, ya que las ilustraciones no representan lo que las preguntas intentan indagar. Se propone poner a prueba el impacto de las respuestas obtenidas por parte del grupo al modificar las imágenes para que representen exactamente lo que la pregunta cuestiona, para investigar si las ilustraciones guiarán a los estudiantes a la respuesta correcta.

Nótese en los resultados de la ILD de gravedad que la cantidad de estudiantes que predicen que en un sistema de dos objetos de masas distintas, las fuerzas de atracción gravitacional son distintas. Por citar algunos casos, se afirmó que “el objeto de mayor masa jala más fuertemente” o, similarmente, “que el objeto de menor masa es jalado más fuertemente”. Se concluye, a partir de estos resultados, que hubo poca retención respecto a la actividad de la tercera ley de Newton, que fue la primera trabajada en el semestre, hasta llegar a la ILD sobre gravedad. Es vital reforzar los esfuerzos dedicados a mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje. Una de las

ideas deducidas de este estudio está relacionada con la predicción sobre lo que le ocurre a la fuerza de atracción gravitacional entre dos objetos si la distancia entre ellos se duplica. Se identificó, con base en las predicciones, que es necesario solicitar en la hoja de ILD de gravedad una explicación del porqué se hizo la predicción.

Los resultados de la ILD sobre movimiento de proyectiles muestran que, por un lado, las predicciones de la trayectoria que describe un proyectil, en diversas situaciones de ángulo de lanzamiento, concuerda con el comportamiento mostrado en la simulación PhET. Por otro lado, la intuición sobre la descripción de la trayectoria parece no estar directamente relacionada con las predicciones de las direcciones de velocidad y aceleración del objeto en varios puntos de la trayectoria. Una de las ventajas del uso de las simulaciones PhET es que permiten verificar el comportamiento real y compararlo con las predicciones.

En este trabajo también se enfatiza la importancia de desarrollar secuencias didácticas que permitan evaluar el aprendizaje desde el nivel fundamental al comienzo de la actividad, y no necesariamente hasta el final de la secuencia. Del análisis de los resultados de la ILD sobre la naturaleza atómica de la materia se tiene que casi una cuarta parte de las predicciones al comienzo de la actividad no son consistentes con las definiciones presentadas en la ILD sobre la carga neta y masa atómica de un átomo. Una conclusión importante de este estudio es que se debe incorporar a la ILD algún reactivo que ayude al estudiante a verificar su respuesta antes de continuar con el resto de los ejercicios basados en la simulación, especialmente cuando estos están diseñados en secuencia lineal.

Otro hallazgo está relacionado con la interpretación que algunos estudiantes hicieron de la lectura de presión usando el manómetro en la ILD de líquidos. La simulación PhET Bajo Presión muestra la lectura de la presión en el aire y dentro de los líquidos, pero no muestra lectura alguna justo en el fondo del tanque que está bajo tierra. La lectura alrededor de la interfaz tanque-tierra desapareció, por lo que causó algo de confusión al momento de hacer la demostración. La conclusión emanada de este análisis es que debe incluirse un comentario adicional sobre la operación de la simulación y comunicarlo oralmente durante la toma de datos de las predicciones por parte de estudiantes.

De acuerdo con el testimonio de las docentes de la asignatura de Física Conceptual, se observaron en los gru-

pos piloto mayor interacción y participación en discusiones de indagación grupal, así como un considerable intercambio de ideas y opiniones, todo esto con respecto a la asignatura en modalidad convencional del semestre agosto-diciembre de 2020.

Con respecto a la recolección de datos para la investigación educativa, se encontró en este trabajo que la revisión por parte de los docentes debe mejorarse para ser más eficiente, aunque es capaz de ofrecer perspectivas sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje basado en las simulaciones PhET, como se muestra aquí y en la sección de resultados.

Un hallazgo relevante del presente estudio es que en el grupo de seguimiento se encontró una tendencia a la alta en cuanto a las respuestas de las ILD seleccionadas mientras que se no se observó lo mismo en las respuestas de las Hojas de Actividades. De la misma forma, los resultados muestran que la implementación del compendio es factible. El análisis de la implementación de las Hojas de Actividades e ILD nuevas y mejoradas habrá de guiar el rediseño de la planeación didáctica de la asignatura de Física Conceptual en los semestres subsecuentes, en búsqueda de la mejora continua del proceso de enseñanza-aprendizaje.

## REFERENCIAS

- [1] “Interactive Simulations of Sciences and Math”. Phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu> (accedido: mar. 25, 2022).
- [2] “Estrategias de Implementación para la Clase Entera”. Phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu/es/teaching-resources/virtual-workshop/whole-class-strategies> (accedido: oct. 31, 2022).
- [3] “Diseño de Actividades para Ciencias”. Phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu/es/teaching-resources/virtual-workshop/science-activity-design> (accedido: oct. 31, 2022).
- [4] K. Perkins *et al.*, “PhET: Interactive Simulations for Teaching and Learning Physics”, *Phys. Teach.*, vol. 44, pp. 18-23, en., 2006, doi: 10.1119/1.2150754.
- [5] K. Ndiokubwayo, J. Uwamahoro y I. Ndayambaje, “Effectiveness of PhET Simulations and YouTube Videos to Improve the Learning of Optics in Rwandan

- Secondary Schools”, *Afr. J. of Res. in Math., Sci. and Technol. Educ.*, vol. 24, no. 2, pp. 253-265, oct., 2020, doi: [10.1080/18117295.2020.1818042](https://doi.org/10.1080/18117295.2020.1818042).
- [6] M. Eng y K. H. Chua, “The effect of using PhET in Changing Malaysian Students’ Attitude to learning physics in a full virtual environment”, *Peranika J. Soc. Sci. & Hum.*, vol. 31, no. 2, pp. 545-560, 2023.
- [7] D. D. Utami, A. Halim, Y. Yusrizal, E. Elisa y F. Herliana, “The impact Edmodo assisted by the Virtual Laboratory on Students’ Learning Motivation and Independence”, *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, vol 8, no. 6, 2022, doi: [10.29303/jppipa.v8i6.2207](https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i6.2207).
- [8] A. K. Haquiqui, R. F. Rahmawati, Z. Asizati, U. N. L. Sulistyani, W. F. Albar, “Virtual Laboratory-based learning media training form MGMP IPA Teachers at Madrasah Tsanawiyah in Kudus Regency”, presentado en *The 4th Int. Conf. on University-Community Engagement*, IAIN Syekh Nurjati, Cirebon, Indonesia, oct. 24-26, 2022.
- [9] J. Lutz, K. Sylvester, K. Oliver y D. Herrington, “3, 2, 1... Discovering Newton’s Laws”, *Phys. Teach.*, vol. 55, pp. 149-151, mar. 2017, doi: [10.1119/1.4976656](https://doi.org/10.1119/1.4976656).
- [10] F. E. Imbert, “Efecto de las simulaciones de fuerza y movimiento en el aprendizaje de la Física Básica”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 16, no. 1, mar., 2022.
- [11] S. Tejada-Torres y Á. Domínguez, “Dificultades conceptuales en la relación de gráficas de cinemática: Estudio de casos”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 9, no. 1, jul., 2015.
- [12] Y. Cortez, S. C. Zúñiga y C. del P. Suárez, “Enseñanza del concepto de movimiento a velocidad constante y su representación gráfica mediante el uso de clases interactivas demostrativas con un video experimento”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 11, no. 2, jun., 2017.
- [13] E. Berryhill, D. Herrington y K. Oliver, “Kinematics Card Sort Activity: Insight into Student’s Thinking”, *Phys. Teach.*, vol 54, pp. 541-544, dic., 2015, doi: [10.1119/1.4967894](https://doi.org/10.1119/1.4967894).
- [14] A. Malik, Y. Dirgantara y S. M. Karmini, “The application of higher order thinking laboratory (HOT Lab) in momentum concept using PhET simulation”, *AIP Conf. Proc.*, vol. 2572, no. 1, mar., 2023, doi: [10.1063/5.0118433](https://doi.org/10.1063/5.0118433).
- [15] Z. A. Ghiffary, “Implementing STAD cooperative learning model integrated interactive PhET simulation to enhance high school students’ learning outcomes: a case of momentum-impulse concepts”, *Res. Phys. Educ.*, vol. 1, no. 1, 2022.
- [16] K. Koenig, A. Maries, R. B. Teese y M. Chabot, “Promoting Problem Solving Through Interactive Video-Enhanced Tutorials”, *Phys. Teach.*, vol. 60, no. 5, pp. 331-334, may., 2022, doi: [10.1119/5.0050673](https://doi.org/10.1119/5.0050673).
- [17] J. Sztrajman y A. Sztrajman, “An Easy Way to One-Dimensional Elastic Collisions”, *Phys. Teach.*, vol. 55, no. 3, pp. 164-165, mar., 2017, doi: [10.1119/1.4976660](https://doi.org/10.1119/1.4976660).
- [18] A. González, “¿Cómo definir la energía en los cursos básicos?”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 2, no. 3, sept., 2018.
- [19] A. González, “Use and misuse of the concept energy”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 6, supl. 1, ag., 2012.
- [20] P. E. Niyanti, F. P. Setyaningrum, G. W. Rachman y F. Wandita, “Implementasi Pembelajaran Fisika Topik Usaha dan Energi Berdasarkan Publikasi Ilmiah”, *Mitra Pilar*, vol 1., no. 2, dic. 2022, doi: [10.58797/pilar.0102.05](https://doi.org/10.58797/pilar.0102.05).
- [21] C. E. Wieman, W. K. Adams, P. Loeblein y K. K. Perkins, “Teaching Physics Using PhET Simulations”, *Phys. Teach.*, vol. 48, no. 4, pp. 225-227, abr., 2010, doi: [10.1119/1.3361987](https://doi.org/10.1119/1.3361987).
- [22] C. Escudero, M. A. Moreira y M. C. Caballero, “A research on undergraduate student’s conceptualizations of physics notions related to non-sliding rotational motion”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 3, no. 1, en., 2009.
- [23] E. J. Sojourner, A. J. Burgasser y E. D. Weise, “Let’s Get Physical: Teaching Physics Through Gymnastics”, *Phys. Teach.*, vol. 56, no. 1, pp. 43-46, en., 2018, doi: [10.1119/1.5018692](https://doi.org/10.1119/1.5018692).
- [24] P. Schwartz, “Focusing on Concepts by Covering Them Simultaneously”, *Phys. Teach.*, vol. 55, no. 5, pp. 280-284, may., 2017, doi: [10.1119/1.4981034](https://doi.org/10.1119/1.4981034).
- [25] M. Suárez, S. Pandiella y J. Benegas, “Tutorials + PhET: a simple and efficient active -learning approach for the teaching of kinematics of circular motion in a techni-

- cally-oriented high school”, *Phys. Educ.*, vol, 58, no. 3, 2023, doi: 10.1088/1361-6552/acb8f8.
- [26] F. Sugianto, “Validity of Newton’s Law of Gravitation Student Worksheet Integrated of PhET Simulation Software”, *TGO J. of Educ. Sci. and Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 122-129, jul. 2023, doi: 10.56070/tgojest.v1i2.22.
- [27] J. Balukovic, J. Slisko y A. Corona, “A demonstration of ‘weightlessness’ with 1-kg mass and balloon”, *Phys. Teach.*, vol. 53, no. 7, pp. 440, 441, oct., 2015, doi: 10.1119/1.4931016.
- [28] K. Clay, “The Pendulum, Gravity, and that Number 9.8”, *Phys. Teach.*, vol. 42, no. 1, pp. 14-15, en., 2004, doi: 10.1119/1.1639961.
- [29] O. D. Pranata, “Enhancing Conceptual Understanding and Concept Acquisition of Gravitational Force through Guided Inquiry Utilizing PhET Simulation”, *Sainstek: Jurnal Sain Dan Teknologi*, vol. 5, no. 1, pp. 44-52, jun. 2023, doi: 10.31958/js.v15i1.9191.
- [30] K. E. Williamson, S. Willoughby y E. E. Prather, “Development of the Newtonian Gravity Concept Inventory”, *Astron. Educ. Rev.*, vol. 12, no. 1, pp.1 -20, dic., 2013, doi: 10.3847/AER2012045.
- [31] J. C. Uwayezu y L. L. Yadav, “Effect of computer-simulated teaching tools on Rwandan senior four students’ understanding of graphs of projectile motion”, *J. Math. Sci. Teach.*, vol. 3, no. 2, 2023, doi: 10.29333/mathsciteacher/13593.
- [32] R. Sánchez, “Propuesta didáctica de aprendizaje del movimiento de un proyectil con simulación PhET y Aprendizaje Activo para estudiantes de Nivel Medio Superior”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 11, no. 2, jun., 2017.
- [33] C. A. de Sousa, “Another look at the projectile motion”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 6, no. 1, mar., 2012.
- [34] E. Azhikannickal, “Sports, Smartphones, and Simulation as an Engaging Method to Teach Projectile Motion Incorporating Air Resistance”, *Phys. Teach.*, vol. 57, no. 5, pp. 308-311, may., 2019, doi: 10.1119/1.5098919.
- [35] P. Martín-Ramos, M. Ramos-Silva y P. S. Pereira da Silva, “El teléfono inteligente en la enseñanza de las Leyes de la Física: movimiento de proyectiles”, *RIED*, vol. 20, no. 2, pp. 213-231, 2017, doi: 10.5944/ried.20.2.17663.
- [36] R. D. Agustina, W. Setya, A. Malik, R. P. Putra, S. Andhika, A. N. Fitriani y Y. Cesariyanti, “Graphical analyzer for misconception of angle 45 as optimal angle of projectile motion”, *AIP Conf. Proc.*, vol. 2468, no. 1, 2022, doi: 10.1063/5.0102851.
- [37] A. Sadiyah y A. Lufti, “Atomic Structure Teaching Module with PhET Simulation to Increase Student Motivation and Learning Outcomes”, *Hydrogen*, vol. 11, no. 4, pp. 459-468, 2023.
- [38] Masfaratna y A. Rosadi, “PhET Simulation Media Part Time Using a Problem Based Learning Model Improves Student Learning Outcomes”, *JPPG*, vol 1, no. 1, 2023.
- [39] S. B. McKagan, K. K. Perkins y C. E. Wieman, “Why we should teach the Bohr model and how to teach it effectively”, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, vol. 4, no. 010103, mar., 2008, doi: 10.1103/PhysRevSTPER.4.010103.
- [40] N. Erceg, I. Aviani, V. Mešić, M. Glunčić y G. Žauhar, “Development of the kinetic molecular theory of gases concept inventory: Preliminary results on university students’ misconceptions”, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, vol. 12, no. 020139, nov., 2016, doi: 10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.020139.
- [41] M. A. Ridho y A. S. D. Sari, “Validity of PhET Simulation Assisted Poe2we Learning Model on Ideal Gas Materials”, *SAGA: Journal of Technology and Information Systems*, vol. 1, no. 1, feb. 2023, doi: 10.58905/saga.v1i1.14.
- [42] N. Novita, I. T. Aulia S y N. Fatmi, “Pengaruh Model Pembelajaran PBL dengan Media PhET Terhadap Hasil Belajar Kognitif Siswa”, *JoE*, vol. 5, no. 3, pp. 6092-6100, feb., 2023, doi: 10.31004/joe.v5i3.1375.
- [43] P. Anjani, C. E. Rustana y L. A. Snajaya, “The Effect of Using PhET in Thermodynamic Process Material About Critical Thinking Skills Senior High School Student”, *Prosiding SNF*, vol. 11, no. 1, pp. PF-239, en., 2023, doi: 10.21009/03.1102.PF33.
- [44] C. Xie, “Interactive Heat Transfer Simulations for Everyone”, *Phys. Teach.*, vol. 50, no. 4, pp. 237-240, abr., 2012, doi: 10.1119/1.3694080.



- [45] H. J. Díaz, M. A. Martínez y A. López, “El uso del aprendizaje cooperativo para la enseñanza de los conceptos de calor y temperatura a nivel medio superior”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 10, no. 2, jun., 2016.
- [46] M. de la C. Medina, “Transmisión de calor: Una alternativa de enseñanza y aprendizaje basada en la investigación dirigida”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 4, supl. 1, nov., 2010.
- [47] P. G. Hewitt, *Física Conceptual*, 12.<sup>a</sup> ed. Ciudad de México: Pearson Educación, 2016.
- [48] C. Lidnstrøm, “The Pedagogical Power of Wonder Questions”, *Phys. Teach.*, vol. 59, no. 4, pp. 275-277, abr., 2021, doi: 10.1119/10.0004156.
- [49] D. B. López y J. Orozco, “Clases interactivas Demostrativas con el uso de simulaciones PhET para Mecánica en Preparatoria”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 11, no. 2, jun., 2017.
- [50] D. B. López, “Implementación de una Estrategia Activa Complementada con TIC para la Enseñanza de Circuitos Eléctricos en Nivel Bachillerato”, tesis de maestría, CICATA-Legaria, IPN, Ciudad de México, 2015.
- [51] D. B. López, “Learning analytics dashboard for interactive educational simulations”, tesis de doctorado, CICATA-Legaria, IPN, Ciudad de México, 2019.
- [52] “Virtual Workshop Math”. Phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu/en/teaching-resources/virtual-workshop/math> (accedido: mar. 25, 2022).
- [53] “Compendio de Actividades e ILDs basadas en simulaciones PhET”. Phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu/en/contributions/view/6873> (accedido: jun. 11, 2022).
- [54] M. Sandoval, J. Moreno y C. Mora, “Uso de simuladores PhET para la enseñanza del comportamiento de gases ideales”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 15, no. 1, 2021.
- [55] J. B. Strang, M. Barker, S. Perez, J. Ives e I. Roll, “Active learning in pre-class assignments: Exploring the use of interactive simulations to enhance reading assignments”. arXiv.org. doi: 10.48550/arXiv.1607.04588 (accedido: jun. 11, 2022).