



Conocimiento de contenido de profesores: el experimento pensado de caída libre de Galileo

Teachers' content knowledge: the Galileo Galilei freefall thought experiment

José Manuel Ruvalcaba Cervantes

Programa Transdisciplinario CINVESTAV / Escuela Normal Superior de Jalisco - México
jruvalcabac@cinvestav.mx

Ricardo Quintero Zazueta

Departamento de Matemática Educativa CINVESTAV - México
quintero@cinvestav.mx

Alma Adrianna Gómez Galindo

Unidad Monterrey CINVESTAV - México
agomez@cinvestav.mx

RESUMEN • Estudios sobre conocimiento profesional de docentes de ciencias sugieren poca integración entre las dimensiones cognitivas, didácticas y epistemológicas que constituyen el conocimiento de contenido. El propósito de este trabajo es indagar qué dimensiones se pueden estudiar de manera integrada, empleando un experimento pensado como instrumento metodológico. Mediante entrevista de *pensar en voz alta* se realizó una investigación cualitativa con tres profesores de Física del nivel secundario, utilizando el experimento de Galileo sobre la caída de cuerpos. Encontramos que es posible estudiar las dimensiones cognitiva y epistemológica. Señalamos algunas dificultades de los profesores con procesos para imaginar la situación y experimentar con el pensamiento. Concluimos que la falta de integración sugerida en otros estudios es de tipo metodológico y no ontológico.

PALABRAS CLAVE: Conocimiento de contenido; Experimentos pensados; Modelos mentales; Caída libre; Galileo Galilei.

ABSTRACT • Studies on science teachers' professional knowledge suggest little or no integration between the dimensions that constitute content knowledge (e.g., cognitive, didactic, and epistemological). In this paper, we investigate which integrated dimensions we can study through a thought experiment. We carried out qualitative research with three physics secondary teachers and conducted a think-aloud interview using Galileo Galilei's free-fall thought experiment as an instrument. We find that it is possible to study the cognitive and epistemological dimensions of content knowledge. We point out some difficulties of teachers with processes to imagine the situation and experiment in thought. We conclude that the suggested lack of integration of the content knowledge dimensions in other studies is methodological and not ontological.

KEYWORDS: Content knowledge; Thought experiments; Mental model; Free fall; Galileo Galilei.

Recepción: junio 2020 • Aceptación: enero 2021

Ruvalcaba Cervantes, J. M., Quintero Zazueta, R. y Gómez Galindo, A. A. (En prensa).
Conocimiento de contenido de profesores: el experimento pensado de caída libre de Galileo.
Enseñanza de las Ciencias, 1-20.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3357>

CONOCIMIENTOS DE CONTENIDO DOCENTE

Las investigaciones sobre conocimiento profesional del docente de ciencias suelen estudiar el conocimiento de contenido, conocimiento pedagógico o conocimiento pedagógico de contenido. En este trabajo nos centramos en el conocimiento de contenido, definido como la cantidad y organización de los conocimientos que el profesor posee de la disciplina científica que enseña (Shulman, 1986). Incluye el conocimiento de diversas formas de representar conceptos de la disciplina científica: emplear la representación adecuada en el contexto pertinente o establecer relaciones entre representaciones de misma y distinta naturaleza. Ello permite a los docentes establecer correspondencia entre conceptos y mundo físico, emitir explicaciones y predicciones y construir modelos mentales para representar fenómenos por naturaleza inobservables (McConnell et al., 2013).

Al estudiar el conocimiento de contenido de profesores de ciencias se sugiere una falta de integración entre las dimensiones que lo constituyen (Fischer et al., 2012). Se alude a dimensiones epistemológicas (operar conocimientos para explicar, predecir y representar fenómenos), cognitivas (organizar conocimientos en esquemas y estructuras), lógico-matemáticas (contenido proposicional de conocimientos y sus formas de representación matemática) y didácticas (formas de presentar el conocimiento a estudiantes).

No obstante, los instrumentos tradicionales para estudiar los conocimientos de los profesores de ciencias –por ejemplo, evaluaciones estandarizadas, entrevistas, observación de la práctica y revisión de planes de clase–, por sí solos, poco nos dicen sobre cómo se integran las dimensiones del conocimiento docente, y arrojan evidencia en una dimensión (Fischer et al., 2012; McConnell et al., 2013). Por lo regular, y de acuerdo con J. McConnell y colaboradores (2013), se estudia los conocimientos de los profesores desde un enfoque centrado en habilidades requeridas para aplicar grandes ideas de la física a temas específicos, no más allá de la manipulación superficial de conceptos.

Aquí proponemos los experimentos pensados¹ para estudiar conocimientos de contenido (CC) de profesores de Física en secundaria. Asumimos su potencial para dar cuenta de dos o más dimensiones integradas del CC. Nuestro propósito es describir las dimensiones integradas que se pueden estudiar a través de estos instrumentos.

No sostenemos la ineficacia de otros instrumentos para investigar el CC, al contrario, son adecuados para indagar en dimensiones concretas del conocimiento profesional docente. Por ejemplo, los *concept inventories* ayudan en el análisis de la dimensión cognitiva, son apropiados para explicitar conceptos que los docentes conocen y cómo los organizan en esquemas y estructuras. Al respecto, James T. Laverty y Marcos D. Caballero (2018) analizan los *concept inventories* más comunes en física y concluyen que ayudan a estudiar conceptos nucleares de la disciplina, mas no a obtener información sobre la puesta en uso del conocimiento.

Por su parte, McConnell et al. (2013) afrontan a maestros con *dilemas* (preguntas abiertas) del tipo por qué y cómo en los que manifiesten la amplitud y profundidad de su comprensión de ideas físicas. La propuesta es útil para investigar la dimensión cognitiva del CC en amplitud y comprensión esperadas, y alientan a los docentes a operar contenido específico indicando los conceptos mínimos que emplear. Por ejemplo, preguntan: «Usando las palabras energía térmica y radiación explica ¿por qué tenemos clima? (Piense en las estaciones, el ciclo del agua, masas de aire y predicción del clima)»

1. Si bien el término *experimento mental* tiene mayor tradición en la literatura en castellano, optamos por *experimento pensado*, traducción del alemán *gedankenexperiment*. El vocablo *gedanken* (*pensamiento*) se traduce como *verbo* y *sustantivo*, por lo que el acto experimental se caracteriza por ocurrir en el pensamiento y, a la vez, como acción, es método principal de experimentación. El experimento mental captura la idea de un experimento que ocurre en la mente, pero no cómo opera dicha tarea cognitiva. El experimento pensado alude tanto a la tarea cognitiva *pensar en, un, sobre el experimento* como al *espacio mental* donde ocurre.

(McConnell et al., 2013, p. 729). Las respuestas de los profesores las categorizan conforme los códigos: concepto no presente en la respuesta, concepto inexacto, concepto confuso o vago, concepto exacto pero incompleto, y concepto exacto y completo.

Nosotros buscamos discutir un instrumento para estudiar el conocimiento profesional de docentes de física que: (1) arroje información de dos o más dimensiones integradas; (2) evite inducir el uso de saberes concretos que guíen el pensamiento docente; y (3) no estandarizado para mitigar que los profesores se limiten a reconocer información científica.

Consideramos los experimentos pensados con el potencial requerido porque plantean escenarios imaginarios similares al origen de las ideas en física. Los conceptos y principios físicos no están predefinidos, y el experimentador pone en acción esquemas y estructuras de conocimientos para definir variables, construir y simular un modelo mental –al manipular las variables definidas– y generar explicaciones, predicciones o conjeturas sobre un fenómeno físico.

Pretendemos responder qué dimensiones del CC del docente de Física en secundaria podemos estudiar de manera integrada a través de experimentos pensados.

La pregunta implica, siguiendo a Vicente Talanquer (2015), pensar cómo los profesores de física usan sus conocimientos y pensamiento en la práctica, y no solo describir lo que conocen sobre un contenido particular. De acuerdo con Talanquer (2015), buscamos patrones de razonamiento y acción efectivos que puedan promoverse en la formación del docente de ciencias.

EXPERIMENTOS PENSADOS

Los experimentos pensados (EP) en Física son modelos constituidos por elementos narrativos –representan una situación física, sistema o fenómeno– y conocimientos teóricos que condicionan la validez de la situación narrada. Este tipo de experimentación consiste en establecer y manipular variables: identificar variables en la situación física narrada; variar las circunstancias de la situación; establecer rangos de validez para las nuevas circunstancias; y emitir una conclusión o conjetura.

El experimentador emplea información proposicional e icónica (Nersessian, 2002, 2010). La primera está asociada a conocimiento de modelos teóricos, leyes, representaciones matemáticas y principios, y suele calificarse de verdadera o falsa, lo que restringe el escenario imaginario con el cual se experimenta. Las representaciones icónicas refieren información perceptual, sensorial, representada por lo general, aunque no exclusivamente, por imágenes mentales; suele calificarse de exacta o inexacta, dado que el modelo representa con mayor o menor exactitud el fenómeno físico objeto de experimentación.

METODOLOGÍA

Para responder la pregunta llevamos a cabo sesiones de trabajo individual con tres profesores de Física del nivel secundario² durante mayo de 2019. Se invitó a participar a docentes licenciados de una escuela normal, con antigüedad menor a diez años, con tal de que hayan ingresado al servicio docente por evaluación.

Las sesiones fueron guiadas por uno de los autores mediante entrevista *pensar en voz alta*, que consiste en solicitar al participante emitir pensamientos en voz alta conforme resuelve un problema o ejecuta una tarea. Jacqueline P. Leighton (2017) apunta que pensar en voz alta es una manera narra-

2. El reporte aquí presentado es parte de un proyecto mayor con más participantes y EP. Reportamos tres casos por la extensión que exigió el análisis dado que buscamos ahondar en la reflexión y no generalizar.

tiva de acercarse a inobservables actos intersubjetivos de procesos superiores de pensamiento, y a las maneras en las que los participantes articulan pensamientos al ejecutar tareas o solucionar problemas.

Propusimos a los docentes la siguiente adaptación del experimento pensado de Galileo:

El filósofo griego Aristóteles distinguió la existencia de cuerpos ligeros y pesados. De acuerdo con Aristóteles los cuerpos caen con una velocidad directamente proporcional a su peso.

Con base en lo pensado por Aristóteles podemos imaginar la siguiente situación. Imagine dos cuerpos, uno pesado y otro ligero, que se dejan caer desde la misma altura y al mismo tiempo. Para ambos cuerpos la resistencia del aire es constante e igual.

Posteriormente imagine que el cuerpo ligero es atado al cuerpo pesado. Este nuevo cuerpo, llamémosle compuesto, se deja caer desde la misma altura de la cual se dejaron caer los cuerpos por separado. La resistencia del aire sigue siendo constante e igual.

Describe la caída del cuerpo compuesto.

A cada profesor le exhortamos a emitir sus pensamientos en voz alta durante la actividad, si permanecía en silencio más de tres segundos se indicaba «Sigue hablando». Aunque esta indicación interrumpe el hilo de pensamientos, la entrevista da acceso a representaciones que permanecen activas durante la ejecución de tareas cognitivas incluso con intervenciones (Leighton, 2017).

La sesión fue de una hora para leer la situación narrada, operar y simular posibles escenarios imaginarios y emitir los pensamientos en voz alta; fue un audio grabado y se transcribió en totalidad lo dicho por cada docente. El análisis del reporte verbal se efectuó mediante la construcción de códigos y categorías que explicamos abajo.

El experimento pensado de Galileo

El conocimiento de contenido de los docentes de Física en secundaria se asemeja al origen histórico de las ideas en física (Deng, 2001), por ello decidimos trabajar con un EP clásico y estudiar el conocimiento profesional docente sobre caída libre. La situación pensada por Galileo plantea imaginar un cuerpo pesado y uno ligero cayendo simultáneamente desde distintas alturas para analizar causas potenciales de la rapidez de caída. El análisis de Galileo pone a prueba la veracidad y suficiencia de la teoría aristotélica (El Skaf, 2018), que explica la velocidad de caída de los cuerpos con relación al peso absoluto del móvil y la resistencia del medio.

El experimento de Galileo Galilei es una situación imaginaria y sintetiza la evolución del pensamiento galileano, y no un caso ideal que construye una teoría física. El EP de caída libre de los cuerpos de Galileo se rastrea desde el *De Motu* (1590) hasta sus *Diálogos* (1638) (El Skaf, 2018). Las restricciones que fijan las condiciones experimentales introducidas por Galileo a lo largo de este período le permiten obtener dos conclusiones: 1) en el vacío la velocidad de un cuerpo en caída libre es proporcional a su peso específico; y 2) en el vacío todos los cuerpos de cualquier material caen con la misma velocidad.

Galileo dividió la teoría aristotélica de la caída de cuerpos en dos principios: 1) la velocidad es proporcional al peso del cuerpo; y 2) la velocidad es inversamente proporcional a la resistencia del medio. Galileo analizó cada principio para estudiar las causas potenciales de la velocidad de caída; el análisis del principio 1 condujo a la conclusión 1, y el análisis del principio 2 llevó a la conclusión 2.

Galileo exploró las consecuencias de condicionar la situación a: cuerpos de diferente y mismo material; diferentes alturas; caída en el vacío y otros medios; fricción en cada medio; peso específico y absoluto de los cuerpos; y variación de tamaño y forma de los cuerpos.

El experimento pensado y las condiciones experimentales analizadas por Galileo constituyen un *modelo teórico ideal* (Giere, 1997; Nersessian, 2010), una idealización generalizada con valor episte-

mológico y heurístico, al construir otros modelos. Encapsula nociones de gravedad y caída libre, ideas clave para la enseñanza de la física. Se optó por aplicarse con profesores de Física de secundaria después de pruebas piloto en sesiones individuales con estudiantes de posgrado en Educación. Es común encontrar el EP en libros de texto de secundaria; su contenido es material de estudio en los temas «El trabajo de Galileo» y «Efectos de las fuerzas en la Tierra y en el Universo», del programa de Ciencias 2011 de la Secretaría de Educación Pública de México, plan vigente en Secundaria en el momento de recolectar los datos. El EP de Galileo es sugerencia didáctica en el libro para el maestro (SEP, 1994; 2011).

Análisis del reporte verbal

Para procesar el reporte verbal de cada docente procedimos en tres etapas. En la primera, la información contenida en los reportes verbales se organizó en categorías para presentar resultados en términos de 1) modelos mentales de caída libre y 2) acciones mentales efectuadas por los profesores al construir los modelos. En la segunda, discutimos e interpretamos la estructura y amplitud de ideas en los modelos para dar cuenta de las dimensiones del conocimiento sobre caída libre que pudimos estudiar con este EP. Y en la tercera etapa construimos y ponemos a discusión una conjetura de cómo se manifiestan integradas las diferentes dimensiones para este contenido y de EP en particular.

Las categorías empleadas en la primera etapa para reconstruir los modelos son:

- *Información proposicional*. Declaraciones con contenido científico o modelos teóricos ideales.
- *Información icónica*. Enunciados que remiten a entidades y objetos del sistema físico representado en la mente, no necesariamente visual.
- *Transformación de la información*. Expresiones cuyo fin es operar con información icónica y proposicional; son acciones cognitivas de los docentes.
- *Entidades teóricas*. Palabras o frases que indican propiedades teóricas de la información proposicional e icónica, variables o condiciones experimentales para operar el modelo.

En el segundo momento de la primera etapa, para describir las acciones mentales docentes elaboramos categorías desde los propios datos, siguiendo el enfoque de la teoría fundamentada (Corbin y Strauss, 2014). Los términos y frases de acciones cognitivas de los docentes las ordenamos conforme las propiedades y características inherentes. Expresiones del tipo «pienso que», «sonaría ilógico», «con las condiciones que tenemos», «me imaginé» o «se supone» las tomamos cual propiedades de estas categorías.

Desde la teoría fundamentada se lee el reporte verbal, preguntando y comparando constantemente para obtener categorías. Las preguntas esenciales para estimular el análisis de posibles significados de lo dicho por los participantes son: ¿qué se está diciendo o haciendo? y ¿por qué? Los posibles significados se comparan al contrastar acciones semejantes en un ir y venir entre datos y categorías.

Para la segunda etapa de análisis interpretamos los modelos y acciones. Cada reporte verbal se interpreta como instancia individual. Presentamos un sumario con nuestras reflexiones sobre los modelos y acciones de cada docente para dar cuenta de las dimensiones del conocimiento del contenido de caída libre manifestadas.

En la tercera etapa de análisis interpretamos familias de categorías con todos los reportes verbales. Por medio de un sumario describimos cómo se manifiestan integradas las dimensiones de conocimiento para este contenido y experimento pensado.

PRIMERA ETAPA. RESULTADOS

Presentamos por separado los modelos de cada docente; distinguimos a los participantes como Profesor A, B y C. Extraemos fragmentos del reporte verbal para mostrar parte de la narrativa de cada modelo de caída libre.

Profesor A

Las citas extraídas de los reportes verbales las etiquetamos y numeramos. Por ejemplo, DA1 refiere a la cita 1 del docente A. En la tabla 1 se leen citas extraídas del reporte de A.

Tabla 1.
Citas reporte verbal A

| <i>Etiqueta</i> | <i>Cita</i> |
|-----------------|--|
| DA1 | «primero me visualicé a Aristóteles allí disque dejándolos caer, pero recordé que era filósofo, entonces nada más observaba, entonces me imaginé los cuerpos nada más ya sea cayendo y luego anexándole el otro» |
| DA2 | «la velocidad sería distinta para el [cuerpo] compuesto, ya que al juntarse ambos cuerpos sumaron una masa mayor provocando una mayor velocidad en caída» |
| DA3 | «sin embargo y de acuerdo con la ley de gravedad, fuerza con la que los objetos son atraídos, es la misma no cambia ya que es una constante por lo que a la hora de la caída ambos caerán al mismo tiempo y con la misma velocidad» |
| DA4 | «ok Aristóteles dijo los cuerpos más pesados ¿no? y luego Galileo dijo ¡no! Caen al mismo tiempo. Entonces al momento de estar revisando así entrarías en un choque como ¡bajjo! ¿quién va a ganar? pues esa era la inquietud más que nada» |
| DA5 | «nos llevaría a comprobar las ideas de ambos, y a final de cuentas nos quedamos con la veracidad de Galileo, ¿sí? en cuanto a que todos los cuerpos caen al mismo tiempo a la Tierra, todo gracias a la gravedad» |
| DA6 | «yo pienso que si buscamos puedo llegar a encontrar otra solución. Fíjate que hablando de esto pues nos llevaría a comprobar las ideas de ambos [Aristóteles y Galileo] y al final nos llevaría a que todos los cuerpos caen al mismo tiempo a la Tierra, todo gracias a la ley de gravedad» |

Al reconstruir los modelos mentales de A empleando citas conforme las categorías descritas en el apartado Profesor B, tenemos:

1. Modelo aristotélico. La velocidad de caída libre de un cuerpo es directamente proporcional a su masa.
2. Modelo galileano. La velocidad y el tiempo de caída de los cuerpos son variables, dependiendo de la gravedad terrestre; la masa de los cuerpos es inoperante. Por lo tanto, velocidad y tiempo de caída son directamente proporcionales a la fuerza de gravedad.

El participante A, al contrastar los dos modelos para dictar «¿quién va ganar?», no prescribe criterios explícitos para fallar a favor del modelo galileano (ver DA6). Para comprender cómo determina que «todos los cuerpos caen al mismo tiempo», reconstruimos sus acciones mentales (figura 1).

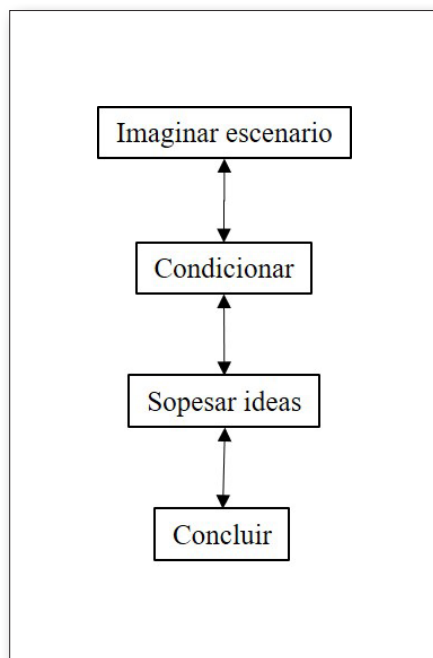


Fig. 1. Acciones mentales A.

Las flechas con doble punta representan las acciones mentales de A como un solo proceso que transcurre de una a otra acción mental al operar el experimento pensado; las acciones no son estructuradas u ordenadas: se imagina la situación y la determina por las condiciones que llevan a replantear lo imaginado (DA1-DA2); sopesa las ideas (DA2-DA3), con lo cual emite una conclusión, que a su vez remite a sopesar la posibilidad de otros escenarios imaginarios (DA5-DA6). Describimos el proceso en orden para facilitar la lectura.

Imaginar el escenario: describe el escenario donde ocurre la caída de cuerpos. El contenido icónico son tres cuerpos –pesado, ligero y compuesto– y la Tierra (ver DA1).

Condicionar: El profesor explicita propiedades físicas y teóricas de los cuerpos (velocidad, tiempo y caer). La Tierra implícitamente es concebida con atracción gravitatoria. Relacionar propiedades físicas y teóricas con la representación icónica le permite establecer, operar y explorar variables y condiciones de los modelos de manera dinámica.

Sopesar ideas: Las condiciones ayudan a sopesar ideas, es decir, reflexionar y describir la caída de los cuerpos empleando distintos tiempos verbales: caer, cayendo, caída, caen. En primera instancia, el cuerpo compuesto tiene mayor velocidad de caída por efecto de la masa (DA2) y contrapone la gravedad (DA3). Fija una variable independiente –gravedad– que determina la velocidad y el tiempo de caída, lo que a su vez conduce a la conclusión. Al sopesar su idea plantea otras posibilidades o escenarios – «encontrar otra solución» –, no detalladas o exploradas, pero vale para reafirmar la conclusión.

Concluir: El profesor hace de la fuerza de gravedad el agente principal y variable independiente que determina lo que puede ocurrir en cualquier escenario.

En consecuencia, A se inclina por el *modelo (2)*, que afirma que todos los cuerpos caen al mismo tiempo y velocidad, pues la fuerza de gravedad determina cualquier potencial escenario de caída libre.

Profesor B

En la tabla 2 presentamos citas extraídas de la entrevista de B.

Tabla 2.
Citas reporte verbal B.

| <i>Etiqueta</i> | <i>Cita</i> |
|-----------------|--|
| DB1 | «Pues la resistencia del aire cambiaría ¿no? Según eso porque sería compuesto y sería más ¿masa? Rompería más ¿qué? Más el aire. Esa sería mi imaginación. Y tendría mayor velocidad el compuesto que por separado [lee de nuevo en voz alta el EP]» |
| DB2 | «se supone que Aristóteles dijo que si son lanzados desde la misma altura un cuerpo ligero y un cuerpo pesado caerán al mismo tiempo. Pero al ser compuesto siento que viajaría a mayor velocidad porque tiene mayor masa y rompería más la resistencia del aire» |
| DB3 | «según Aristóteles ambos deben caer al mismo tiempo al ser lanzados desde la misma altura» |
| DB4 | «un cuerpo compuesto caerá más rápido al ser mayor su masa» |
| DB5 | «si yo lo estuviera haciendo, y que lo he hecho en clases, pero sólo con dos objetos, pero nunca he hecho un compuesto, pensaba en hacerlo. Si lo hiciera en este momento ¿qué pasaría? Si ¿sí van a caer al mismo tiempo?, o sea poner los tres, el compuesto, el ligero y el pesado al mismo tiempo y comprobar qué es lo que pasaría realmente» |
| DB6 | «suena ilógico con mi respuesta ahorita ya analizándolo de nuevo. Se supondría que si son lanzados desde la misma altura tendrían que volver a caer igual, aunque fuera compuesto o fuera el ligero y el pesado, porque ambos caerían al mismo tiempo y tendrían que [inaudible] más bien siento que sería la forma ¿no? en que los pondrían si formarían no sé, un círculo a tener una hoja extendida, sería diferente el cómo se va rompiendo el aire» |

B alude de manera explícita al modelo ideal de Galileo, erróneamente adjudicado a Aristóteles. Con la información emitida por B reconstruimos:

- (1a) Modelo aristotélico: la masa de un cuerpo en caída tiene una relación directamente proporcional con la fuerza para romper la resistencia del aire, de manera que la velocidad de caída es directamente proporcional a la masa e inversamente proporcional a la resistencia del aire.
- (2) Modelo galileano: cuerpos que caen simultáneamente desde la misma altura adquieren igual velocidad de caída independientemente de sus masas, y al suelo llegan al mismo tiempo.

B percibe contradicción entre ambos modelos; entonces introduce la variable *forma del cuerpo*. Reelabora el *modelo 1a*:

- (1b) Modelo aristotélico: la velocidad de caída de un cuerpo está determinada por su forma y en relación proporcional inversa con la resistencia del aire, tal que la forma contribuye en mayor o menor medida a romper la resistencia.

Las acciones mentales efectuadas por B para contrastar los *modelos 1a y 2* que llevan a *1b* se sintetizan en la figura 2:

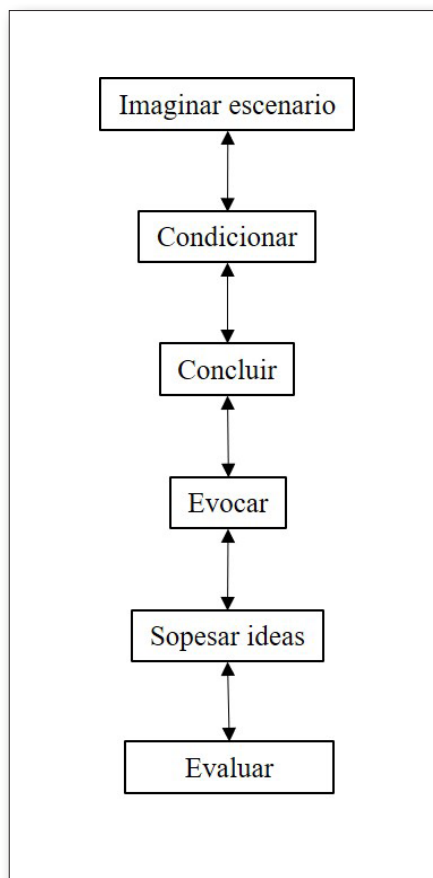


Fig. 2. Acciones mentales B.

Al igual que A, el proceso de acciones de B no es estructurado u ordenado, pasa de una acción a otra como parte del mismo proceso según indican las flechas con doble punta: al tiempo de describir la situación imaginada, emite una conclusión (DB1), evoca un modelo teórico ideal (DB2) que ayuda a sopesar las condiciones planteadas en contraposición con otro modelo teórico evocado (DB3) y con la experiencia docente (DB5), con lo cual evalúa sus pensamientos, replantea las condiciones y elementos imaginados (DB6). Los procesos los presentamos en este orden:

Imaginar escenario: Imagina la situación y a lo largo de su intervención se refiere a representaciones icónicas concretas, aire, cuerpo pesado, ligero y compuesto.

Condicionar: Condiciona el comportamiento del sistema con la resistencia del aire y masa de los cuerpos. Afirma que un cuerpo con mayor masa rompe el aire con más facilidad (DB2).

Concluir: Concluye parcialmente; el cuerpo compuesto tendría mayor velocidad de caída (DB4).

Evocar: Al decretar una conclusión parcial (*modelo 1a*), B lee una vez más el EP y evoca el modelo galileano (ver DB2- DB4).

Sopesar ideas: Al evocar la proposición en DB2 sopesa la conclusión parcial y la mantiene (DB4). Sopesa la posibilidad de experimentar físicamente la situación en el aula, ello conduce a ver contradicción entre los modelos iniciales (DB5-DB6).

Evalúa: Reflexiona su *modelo 1a* en contraste con el modelo galileano y concreta la segunda versión del *modelo 1a* y añade la forma como propiedad física de los cuerpos (DB6). Las consecuencias de introducir la *forma* en el modelo no se exploran.

Profesor C

La tabla 3 presenta citas del reporte de C.

Tabla 3.
Citas reporte verbal C

| <i>Etiqueta</i> | <i>Cita</i> |
|-----------------|--|
| DC1 | «Habla de dos cuerpos, entonces, uno muy pesado, uno ligero. Pues la idea que menciona Aristóteles, su teoría que el peso influía en la caída de los cuerpos. En ese caso el cuerpo compuesto obviamente caería más rápido. Pero habla de la resistencia del aire [relee el EP] La resistencia del aire sigue siendo constante» |
| DC2 | «Yo lo imaginé muy sencillo, muy simple, tal vez demasiado simple. Pues según lo que menciona allí Aristóteles que creía que los cuerpos de diferente peso caían a diferente velocidad, allí te menciona que hay un cuerpo más pesado que el otro y otro más ligero. Entonces, en esa lógica pues el cuerpo pesado caería más rápido y el ligero [inaudible] Con las condiciones que tenemos realmente la resistencia del aire, que es igual, no afectaría el resultado para mí, porque menciona que son lanzados a la misma altura, pero la resistencia del aire es igual, es constante. Por lo tanto, para mí no, de acuerdo con esa idea el cuerpo pesado caería más rápido de todos modos, porque no afectaría mucho la idea del aire» |
| DC3 | «Un cuerpo compuesto de acuerdo a las ideas de Aristóteles, que suponía que los cuerpos de objetos más pesados eran más rápidos que los de los ligeros, al juntarlos el peso aumentaría y su velocidad también» |
| DC4 | «la velocidad del cuerpo compuesto sería igual a la suma del cuerpo A que podría representar al más pesado y del cuerpo B que representa al más ligero. Por lo tanto, el resultado de la velocidad final es mayor ya que incrementaría el peso. Un cuerpo compuesto de acuerdo con las ideas de Aristóteles que suponía que los cuerpos de objetos más pesados eran más rápidos que los de los ligeros y al juntarlos el peso aumentaría y su velocidad también» |
| DC5 | «más o menos en ese tiempo yo creo que no pensaban en los papeles, ni en el aire, ni nada, bueno quiero suponer, y tampoco iban más allá como para pensar si había una constante de velocidad en general» |
| DC6 | «no sé qué ideas tenían anteriormente de la velocidad de caída de los cuerpos, no sé si la habían registrado o no y también recordar que en ese tiempo no había experimentos en el espacio, y ahora sí los hay, y recordar que sí hay variantes en el espacio cuando eliminas toda la resistencia hacia los objetos [...] el espacio está libre de eso [refiriéndose a la resistencia] de esas presiones que aquí sí tenemos» |
| DC7 | «ahorita está comprobado que sí, la resistencia se opone a la caída del cuerpo, además la forma que tiene ese objeto y cómo rompe el aire. Imagínate aventar una hoja de papel que implique haya más resistencia del aire, a pesar de que sea el mismo aire, pero como es un objeto más ligero, sí hay más oposición del aire hacia el objeto» |
| DC8 | «sí nos basáramos en la velocidad actual de la caída de los cuerpos [...] como ya ahorita sabemos que sí hay una constante y que nada más hay que diferenciar que varía de acuerdo con la resistencia que pone el aire sobre el objeto» |

El participante C alude explícitamente a:

- (1) Modelo aristotélico: la rapidez de caída de un cuerpo es directamente proporcional a su peso e inversamente proporcional a la resistencia del aire.
- (2) Modelo galileano: en ausencia de aire la velocidad de caída de un cuerpo está determinada por la fuerza de gravedad. En presencia de aire la velocidad de caída está en función de la forma del cuerpo y la gravitación, y es inversamente proporcional a la resistencia del aire.

La figura 3 muestra las acciones de C al explicar y distinguir entre dos modelos para la caída libre. Al igual que los casos anteriores, las flechas con doble punta representan un mismo proceso de pensamiento, que va de una acción a otra sin implicar operaciones sistemáticas.

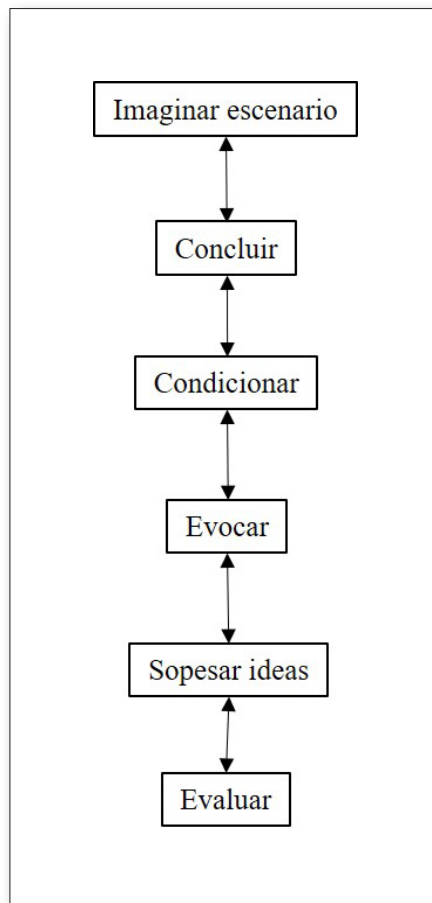


Fig. 3. Acciones mentales C.

- Imaginar escenario: Describe la situación a partir de la información icónica del EP (DC1-DC2).
- Concluir: Concluye asumiendo el modelo aristotélico conforme el contexto de las condiciones que identifica (ver DC2), por el peso de los cuerpos y la resistencia del aire.
- Condicionar: Al concluir relaciona la velocidad de caída con la resistencia del aire y peso de los móviles (DC2). Y afirma que «con las condiciones que tenemos» la conclusión aristotélica se mantiene (DC2).
- Evocar: Evoca el modelo galileano al que alude como «ahora» y «ahorita». Invita a recordar que la caída libre en el espacio y la Tierra se manifiesta de manera distinta (DC6-DC8).
- Sopesar ideas: Sopesa la *resistencia del aire* (DC1, DC2, DC6-DC8). Invita a imaginar «aventar una hoja de papel» (DC7) y distingue entre experimentos de caída libre en el espacio (DC6) y en presencia de aire, para sopesar la oposición del aire hacia objetos en caída (DC7-DC8).
- Evaluar: La conclusión aristotélica inferida la evalúa desde el marco de pensamiento galileano; explica la caída libre con uno y otro modelo para resaltar que se obtendrían conclusiones distintas con diferentes marcos teóricos.

SEGUNDA ETAPA. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cada dominio general del conocimiento profesional docente identificado por Shulman (1986) –conocimiento de contenido, conocimiento pedagógico de contenido y conocimiento curricular– está integrado por subdominios: conocimiento proposicional, casos de conocimiento y estrategias de conocimiento.

El conocimiento proposicional y los casos de conocimiento poseen estructuras lógicas y psicológicas: son las dimensiones cognitivas, lógico-matemáticas y didácticas del conocimiento de contenido. La dimensión cognitiva es la manera de organizar y almacenar conocimientos en esquemas y estructuras que representan conceptos y principios físicos. La dimensión lógica corresponde a relaciones sintácticas y semánticas entre principios y conceptos para emitir juicios de verdad y establecer la validez o invalidez de las relaciones (Shulman, 1986). La dimensión matemática es la representación matemática del orden y relación dada a conceptos y principios. La dimensión didáctica, ligada también al conocimiento pedagógico de contenido, es una estructura de conocimiento que permite enseñar el contenido de la dimensión cognitiva.

Las estrategias de conocimiento del conocimiento de contenido son acciones que emergen al afrontar problemas que exigen elaborar explicaciones, modelos y predicciones poco simples o incompatibles con los conocimientos previos. Esto es la dimensión epistemológica.

Nuestra intención es responder qué dimensiones integradas del CC del docente de Física en Secundaria podemos conocer a través de experimentos pensados. Los resultados descritos en el apartado anterior, en términos de modelos y acciones mentales, nos permiten estudiar de manera integrada las dimensiones cognitiva y epistemológica del conocimiento de contenido de caída libre con el experimento pensado de Galileo. Presentamos por separado la expresión individual de cada dimensión; en el próximo apartado exponemos nuestra conjetura de cómo se integran.

Dimensión cognitiva

Los modelos representan conocimientos de contenido de los docentes. Los conceptos exteriorizados en los modelos nos permiten estudiar la dimensión cognitiva en amplitud y organización.

Los dos principios aristotélicos que analizó Galileo, las condiciones experimentales en su análisis y las conclusiones, descritas en el apartado 3.1, son referencia para apreciar la amplitud del conocimiento de contenido de caída libre (tabla 4).

Tabla 4.
Amplitud CC dimensión cognitiva

| Docente | Conclusión <i>galileana</i> | | Principio intuitivo/ <i>aristotélico</i> | | Condicionantes | | | | | |
|---------|-----------------------------|---|--|---|----------------|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | a | b | c | d | e | f |
| A | | x | x | | x | | | | | |
| B | | x | x | x | x | x | | x | | x |
| C | | x | x | x | x | | x | x | | x |

Condicionantes: *a*) cuerpos de diferente y mismo material; *b*) cambios de altura; *c*) caída en el vacío y otros medios; *d*) la fricción en cada medio; *e*) peso específico y absoluto de los cuerpos; *f*) variar tamaño y forma de los cuerpos.

Del modelo galileano los docentes prueban conocer la conclusión 2: en el vacío todos los cuerpos de cualquier material caen con la misma velocidad. Los profesores distinguen el principio aristotélico «la velocidad es proporcional al peso de los cuerpos», mientras que B y C indican que la velocidad de caída es inversamente proporcional a la resistencia del medio (se refieren solo al aire).

En el proceso de construcción del modelo los docentes manifiestan ideas incompletas sobre las condiciones pensadas por Galileo. Por ejemplo, aunque reconocen que todos los cuerpos caen con la misma velocidad, ninguno explora la caída de cuerpos de diferente y mismo material, limitándose a generalizar la conclusión para todos los cuerpos o ejemplificar con una hoja de papel (casos B y C).

B y C sopesan la resistencia del aire para analizar la fricción en el medio de caída, aunque no exploraran otros medios. B y C señalan la forma de los cuerpos como propiedad física que contribuye a restar la resistencia del aire durante la caída. Solo C alude explícitamente a la caída en ausencia de aire. B y C exteriorizan *misma altura* como condición para emitir la conclusión.

Para apreciar la organización de ideas expresadas e identificar los conceptos centrales empleados por los participantes, representamos con un esquema los modelos mentales. Describimos a modo de ejemplo el caso C.

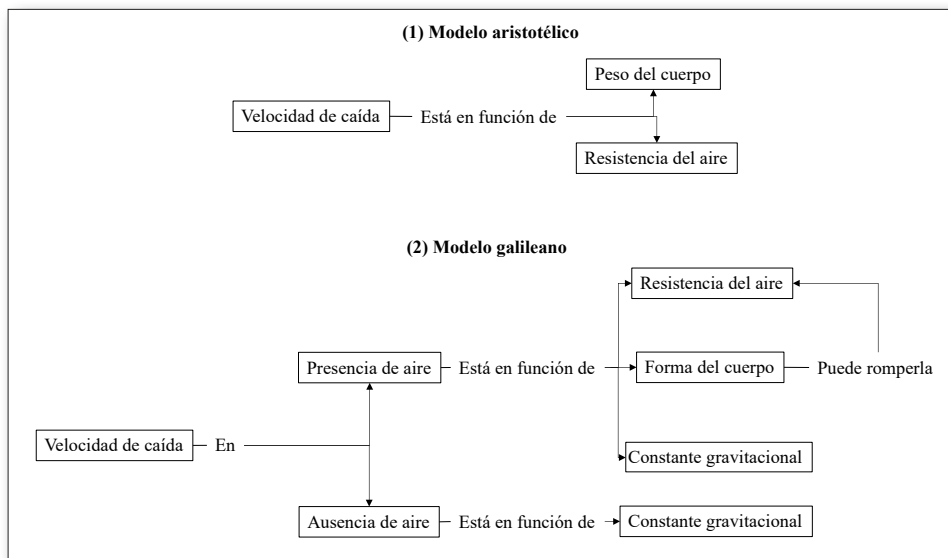


Fig. 4. Organización CC dimensión cognitiva docente C.

Para el modelo aristotélico, C afirma que la velocidad de caída de los cuerpos es consecuencia de la interacción entre peso del cuerpo y resistencia del aire. Para el modelo galileano distingue dos posibilidades: en ausencia de aire la gravitación determina la velocidad de caída; en presencia de aire la velocidad de caída se explica por la interacción entre gravitación, la resistencia del aire y la forma del cuerpo (que contrarresta la resistencia del medio).

C expresó modelos con pocos conceptos y limitados enlaces. Cada esquema se aprecia con jerarquías conceptuales simples. Sin embargo, la simplicidad no implica poca efectividad para explicar las causas potenciales de la velocidad de caída; por el contrario, son ideas útiles y prácticas para exponer la velocidad de caída en ausencia y presencia de aire.

En síntesis, la sencillez conceptual de los modelos mentales de C no implica una comprensión superflua sobre caída libre. Los modelos poseen variables independientes (gravedad, forma y peso del cuerpo) y dependientes (resistencia del aire, que puede oponer menor fuerza al móvil, por el peso o forma de este último) que determinan la velocidad de caída.

Dimensión epistemológica

Las acciones de mayor complejidad que emitir principios teóricos y prácticos son las estrategias de conocimiento de contenido (Shulman, 1986). Tales acciones, y la finalidad de estas, las presentamos como dimensión epistemológica.

Las acciones realizadas por los profesores –al construir un modelo mental para explicar causas potenciales de velocidad de cuerpos en caída– distan de ser simples y compatibles con la experiencia cotidiana. La caída libre conlleva nociones sobre la forma y rotación de la Tierra, atracción de cuerpos al centro de la Tierra, peso de los cuerpos y fuerza de gravedad (Blown y Bryce, 2013). Alrededor de estas nociones existen concepciones cualitativas erróneas entre estudiantes y profesores (Kavanagh y Sneider, 2006a, 2006b).

Antes reconstruimos por separado las acciones mentales de los participantes para representar el proceso de modelización. Los esquemas nos permiten ver la simultaneidad entre identificar conceptos, modificar la situación imaginada y reconstruir ideas de caída libre con la información evocada.

Las acciones mentales de los tres participantes comparten características, por lo que las asociamos en familias (ver figura 5), sin implicar un proceso sistemático y sí simultáneo.

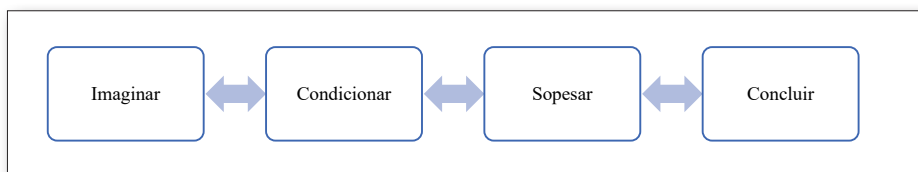


Fig. 5. Acciones mentales dimensión epistemológica del CC.

Imaginar: El proceso de construcción de los modelos se acompaña del acto de imaginar un escenario para el fenómeno de la caída. A, por ejemplo, descarta la relevancia de imaginar a Aristóteles.

Condicionar: Los docentes exponen condiciones con información proposicional e icónica conforme construyen e imaginan el modelo. Según las condiciones se da la conclusión emitida. Identificamos que condicionan la situación con base en una entidad teórica o física. A emplea la gravitación como concepto nuclear. B condiciona la caída de cuerpos con la altura de caída y forma de los cuerpos. C lo hace al diferenciar escenarios con presencia o ausencia de aire.

Sopesar: Simultáneo sopesan las consecuencias de las condiciones pensadas. Sopesar ayuda a dilucidar el mejor modelo explicativo del fenómeno en cuestión. Tanto A como B sopesan los modelos galileano y aristotélico mediante contraste. A pregunta «¿quién va a ganar?»; B exterioriza preguntas que conducen a rescatar información de la memoria (ver DB5) y percibir la contradicción entre modelos. B no expresa criterios para sopesar ambos modelos y responder sus preguntas. Sin embargo, al trasladar sus pensamientos a un escenario físico (DB5), evalúa internamente su modelo aristotélico inicial y añade la forma como condición (DB6).

Por su parte, C sopesa la situación con una estrategia distinta al imaginar dos escenarios: en el espacio (con ausencia de aire) y con hojas de papel (en presencia de aire). Los escenarios ofrecen a C la oportunidad de explorar la agencia de la resistencia del medio, forma de los cuerpos y la fuerza de gravedad.

Concluir: La agencia de distintos elementos icónicos (forma del cuerpo, según B) o proposicionales (gravedad, según A) establece condiciones y relaciones causales de la situación imaginaria, ayuda a sopesar el modelo y determina la conclusión. Para A, la fuerza de gravedad determina la caída de los cuerpos sin importar los escenarios pensados (DA6). B, basándose en la altura y forma de

los cuerpos, sopesa la influencia del peso de los cuerpos y la fuerza de resistencia del medio, y concluye con la reelaboración del modelo aristotélico *1a* en *1b*. La conclusión de C emerge de las condiciones ausencia y presencia de aire; sopesa las consecuencias de ambos casos y hace una inferencia desde el modelo aristotélico (DC4).

Las acciones de cada profesor son distintas porque persiguen una finalidad también diferente. Las acciones de A son, sin comprometerse en una reflexión crítica de los modelos, enunciar y asumir la veracidad del modelo galileano: la fuerza de gravedad determina cualquier condición imaginable de caída libre. El participante B busca la mejor explicación sobre causas potenciales de caída libre al percatarse de la contradicción entre sus modelos. C pretende identificar la mejor conclusión de acuerdo con, según mencionó, las condiciones narradas. Para ello, contextualiza históricamente los modelos y explora las condiciones de validez.

La finalidad de A es exponer la gravedad como causa única para explicar la velocidad de caída de los cuerpos. B problematiza la situación con el fin de encontrar una explicación convincente para las causas potenciales de velocidad de los cuerpos en caída. C explora condiciones de validez para dos modelos que explican el mismo fenómeno físico, con el propósito de adoptar el mejor según las condiciones narradas.

Dimensión didáctica

La dimensión didáctica del conocimiento de contenido está ligada al conocimiento pedagógico de contenido. La relación entre lo que se conoce y lo que se enseña es de naturaleza pedagógica. Así, conjeturamos la posibilidad de estudiar la dimensión didáctica del conocimiento de contenido de caída libre empleando el EP de Galileo.

Aventuramos la conjetura dado que B y C remiten al ejemplo didáctico de las hojas de papel que caen, una extendida y otra comprimida, para reflexionar sobre la forma de los cuerpos y la resistencia del aire como causas potenciales de velocidad de caída.

Para corroborar la conjetura hace falta comparar los reportes verbales docentes al experimentar en el pensamiento con el discurso en el aula. Sin embargo, caracterizar la dimensión didáctica del conocimiento de contenido para la caída libre requiere un trabajo detallado porque es difícil saber dónde termina esta dimensión y dónde comienza el dominio conocimiento pedagógico, a su vez, término polisémico y definido con poca precisión (Neumann et al., 2019; Talanquer, 2015). En consecuencia, sería pertinente estudiar la dimensión didáctica del conocimiento de contenido de caída libre a la par que se estudia el dominio general conocimiento pedagógico a través de los instrumentos desarrollados para ello.

TERCERA ETAPA. DIMENSIONES INTEGRADAS

Si bien no podemos afirmar con certeza que la dimensión didáctica se pueda estudiar integrada con otras dimensiones en el contexto de la experimentación pensada para el contenido revisado, en nuestros resultados las dimensiones cognitiva y epistemológica aparecen integradas. Los participantes no enuncian primero información proposicional y luego operan con ella, al contrario, son acciones simultáneas.

La figura 6 muestra la integración de los modelos con las familias de categorías de acciones mentales de los tres participantes. Desde el comienzo los profesores imaginan la situación, expresan condiciones de validez y las sopesan conforme los modelos teóricos de Aristóteles (1.º modelo mental) y Galileo (2.º modelo mental).

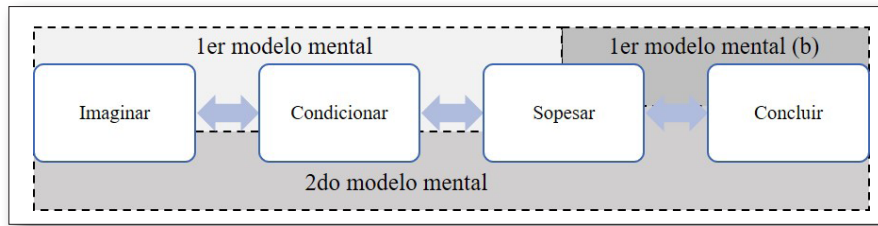


Fig. 6. Dimensiones cognitiva y epistemológica integradas.

A partir de la narración del EP los participantes imaginan el escenario. El primer modelo de los docentes emerge desde el momento en que el escenario es condicionado, explícita o implícitamente, con información proposicional, cuyo referente es el modelo aristotélico.

Al mismo tiempo evocan el modelo galileano para fijar otras condiciones teóricas y físicas. Hasta aquí tienen las bases del primer y segundo modelo mental (aristotélico y galileano). Según proceden, revisan ambos modelos y sopesan las consecuencias de condicionar la caída libre a una u otras variables. Luego concluyen conforme lo imaginado les permite prever.

La integración cognitiva y epistemológica se manifiesta cuando el contenido se pone en acción para elaborar explicaciones de caída libre, es decir, efectuar *actos mentales* (imaginar, evocar, condicionar, sopesar, evaluar) para revisar y valorar elementos de contenido que en la situación experimental contribuyen a explicar un fenómeno físico. Los modelos de caída libre no son enunciados tal y como se incorporaron en los esquemas mentales, se recrean, se sopesan, se revisan a la luz de la situación. Al final, la conclusión es una transformación en acción del modelo teórico ideal internalizado.

Las dimensiones cognitiva y epistemológica del conocimiento de contenido (CC) de caída libre se manifiestan integradas, porque los contenidos de conocimiento se vuelven en sí mismos actos de pensamiento: los profesores condicionan la situación y operan con información que consideran relevante o logran evocar dada la narración del EP. En contraste, los instrumentos diseñados para operar con variables preestablecidas estudian una sola dimensión del CC, al focalizar la atención en algunos elementos teóricos y proposicionales, por ejemplo, los *concept inventories* o grandes dilemas.

Trabajos efectuados con instrumentos diseñados para estudiar una dimensión del CC sostienen la poca integración entre dos o más dimensiones. Con base en lo aquí presentado defendemos que la poca integración observada entre las dimensiones del CC es metodológica y no ontológica.

CONCLUSIONES

Nuestro propósito era describir las dimensiones del conocimiento de contenido que de manera integrada se pueden estudiar con experimentos pensados a través de un contenido y experimento particular, sin inducir el uso de saberes concretos que guíen el pensamiento docente y evadir el reconocimiento de información científica.

Destacamos haber logrado estudiar al menos dos dimensiones integradas del CC sin inducir el empleo de variables y no reduciendo la tarea a reconocimiento de información científica. Fueron los docentes quienes determinaron las entidades teóricas y principios con los que representar, operar y explicar el fenómeno de caída libre; sin guía asentada por el entrevistador elaboraron modelos propios.

Los modelos mentales de los docentes, como el de C, se mostraron simples y poco extensos, pero prácticos dada la situación narrada. Explicitaron modelos, imaginaron y condicionaron la situación, evocaron elementos de modelos teóricos y los revisaron y sopesaron para concluir con un modelo de caída libre puesto en acción y no reproducido, como se integró en esquemas de conocimiento. Con

base en esto, consideramos que la supuesta falta de integración entre las dimensiones del CC es metodológica y no ontológica.

Con nuestro trabajo pretendemos contribuir a los estudios sobre procesos de razonamiento y acciones mentales efectivas de los docentes que se puedan promover en su formación, sin embargo, para lograrlo debemos ahondar en la discusión y mejorarla, por lo que señalamos dificultades epistemológicas y metodológicas que limitan los alcances de nuestras reflexiones, comenzando por reconocer la imposibilidad de generalizar, ya que analizamos tres casos, problema que habrá que atender después de resolver dificultades apremiantes. Estas dificultades, a su vez, son nuevas interrogantes con potencial para enriquecer la discusión.

Las representaciones lógico-matemáticas que los docentes podrían o no saber no se manifestaron. Lo atribuimos a nuestro propósito de evitar inducir el empleo de variables predeterminadas, trabajar un EP semejante al origen histórico de la situación pensada por Galileo de manera cualitativa y propiciar la libre expresión de las ideas y pensamientos docentes. No aseveramos la imposibilidad de estudiar esta dimensión con un EP dada la tradición matemática en experimentación pensada. La dificultad es inherente al propio proceso de estudiar el conocimiento de contenido docente a través de experimentos pensados, que deberá resolverse conforme se comprenda mejor el uso de la experimentación pensada en este tipo de investigaciones.

Otras dificultades son el acto de imaginar el fenómeno de caída libre, la agencia al experimentar en el pensamiento con dicha representación imaginada y la duda sobre la amplitud de información que de la situación experimental poseen los profesores.

Con dificultad para imaginar el fenómeno de caída libre nos referimos a la construcción activa de dicha representación imaginaria y la riqueza de memorias activadas producto del estímulo narrativo. La construcción para representar en la mente el fenómeno físico se lleva a cabo a partir del momento en que el experimentador –docente– recupera de la memoria representaciones, visuales y no visuales, en cuya base hay percepciones cuasi sensoriales (Clement, 2003; Gendler, 2010; Miščević, 1992; Nersessian, 1988, 2002). El proceso mental para recuperar las representaciones es automático, dado el estímulo narrativo, y es una construcción activa del experimentador por el esfuerzo explícito que hace por recordar y pensar.

La reducida recuperación de elementos para representar la caída de graves, interpretamos, es producto de la narración de EP, que no suscita recobrar diversos elementos y limita la imaginación activa docente. Por decir, la narración del EP plantea imaginar un cuerpo pesado, uno ligero y uno compuesto; los docentes operan con cuerpos abstractos, incógnitos, carentes de elementos narrativos que invitaran al análisis con cuerpos de diferente material. La falta de riqueza de estímulos también se refleja en pocas expresiones docentes comprometidas con construir escenarios diferentes; solo C visualiza la caída en dos escenarios.

En cuanto a la agencia al experimentar en el pensamiento, nos referimos a enunciados cuyo fin es analizar lo que en primera instancia viene al pensamiento. Los reportes verbales de A, B y C no son exhaustivos en este sentido. Por ejemplo, A no estudia otras posibilidades que expliquen las causas de velocidad de caída de los cuerpos además de la gravitación; plantea la posibilidad de encontrar «otras soluciones» sin comprometerse a explorarlas. B finaliza diciendo «más bien siento que sería la forma ¿no?», pero tampoco indaga más.

La reducida recuperación de elementos para imaginar el fenómeno de la caída libre y la poca agencia de los docentes para experimentar, explorar en el pensamiento nos llevan a preguntarnos qué más saben los docentes sobre caída libre que no expusieron. La posibilidad de CC más amplio abre la puerta para continuar la investigación y enriquecer nuestros hallazgos con base en ajustes metodológicos: enriquecer la narrativa del EP e implementar preguntas retrospectivas (con base en adaptar, por ejemplo, la técnica *teach-back*). Con mejoras metodológicas podríamos obtener evidencia para saber si

los profesores construyen un modelo mental de caída libre o un modelo mental de un modelo teórico de caída libre.

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesores participantes en el proyecto, a CONACYT por la beca 369430, a los evaluadores y al editor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blown, E. J. y Bryce, T. G. K. (2013). Thought-Experiments About Gravity in the History of Science and in Research into Children's Thinking. *Science & Education*, 22(3), 419-481.
<https://doi.org/10.1007/s11191-012-9548-3>
- Clement, J. J. (2003). Imagistic Simulation in Scientific Model Construction. *Proceedings of the Twenty-Fifth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 6. http://works.bepress.com/john_clement/10/
- Corbin, J. y Strauss, A. (2014). *Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*. SAGE Publications.
- Deng, Z. (2001). The distinction between key ideas in teaching school physics and key ideas in the discipline of physics. *Science Education*, 85(3), 263-278.
<https://doi.org/10.1002/sc.1009>
- El Skaf, R. (2018). *The Function and Limit of Galileo's Falling Bodies Thought Experiment: Absolute Weight, Specific Weight and the Medium's Resistance*. https://www.pdcnet.org/pdc/bvdb.nsf/purchase?openform&fp=croatjphil&cid=croatjphil_2018_0018_0001_0037_0058
- Fischer, H. E., Borowski, A. y Tepner, O. (2012). Professional Knowledge of Science Teachers. En B. J. Fraser, K. Tobin y C. J. McRobbie (Eds.), *Second International Handbook of Science Education* (pp. 435-448). Países Bajos: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9041-7_30
- Gendler, T. (2010). *Intuition, Imagination, and Philosophical Methodology*. Oxford University Press.
- Giere, R. N. (1997). *Cognitive Models of Science*. MIT Press.
- Kavanagh, C. y Sneider, C. (2006a). Learning about Gravity I. Free Fall: A Guide for Teachers and Curriculum Developers. *Astronomy Education Review*, 5(2), 21-52.
<https://doi.org/10.3847/AER2006018>
- Kavanagh, C. y Sneider, C. (2006b). Learning about Gravity II. Trajectories and Orbits: A Guide for Teachers and Curriculum Developers. *Astronomy Education Review*, 5(2), 53-102.
<https://doi.org/10.3847/AER2006019>
- Laverty, J. T. y Caballero, M. D. (2018). Analysis of the most common concept inventories in physics: What are we assessing. *Physical Review Physics Education Research*, 14(1), 0101231-01012310.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010123>
- Leighton, J. P. (2017). *Using Think-Aloud Interviews and Cognitive Labs in Educational Research*. Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199372904.001.0001>
- McConnell, T. J., Parker, J. M. y Eberhardt, J. (2013). Assessing Teachers' Science Content Knowledge: A Strategy for Assessing Depth of Understanding. *Journal of Science Teacher Education*, 24(4), 717-743.
<https://doi.org/10.1007/s10972-013-9342-3>

- Miščević, N. (1992). Mental models and thought experiments. *International Studies in the Philosophy of Science*, 6(3), 215-226.
<https://doi.org/10.1080/02698599208573432>
- Nersessian, N. J. (1988). Reasoning from Imagery and Analogy in Scientific Concept Formation. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1988, 41-47.
- Nersessian, N. J. (2002). The cognitive basis of model-based reasoning in science. En P. Carruthers, S. Stich y M. Siegal (Eds.), *The Cognitive Basis of Science* (pp. 133-153). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511613517.008>
- Nersessian, N. J. (2010). *Creating Scientific Concepts*. MIT Press.
- Neumann, K., Kind, V. y Harms, U. (2019). Probing the amalgam: The relationship between science teachers' content, pedagogical and pedagogical content knowledge. *International Journal of Science Education*, 41(7), 964-978.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1497217>
- Shulman, L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4-14.
<https://doi.org/10.3102/0013189X015002004>
- Talanquer, V. (2015). Razonamiento Pedagógico Específico sobre el Contenido. *Educación Química*, 25(3), 391-397. [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X\(14\)70554-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X(14)70554-3)

Teachers' content knowledge: the Galileo Galilei freefall thought experiment

José Manuel Ruvalcaba Cervantes

Programa Transdisciplinario CINVESTAV / Escuela Normal Superior de Jalisco - México

jrualcabac@cinvestav.mx

Ricardo Quintero Zazueta

Departamento de Matemática Educativa CINVESTAV - México

quintero@cinvestav.mx

Alma Adrianna Gómez Galindo

Unidad Monterrey CINVESTAV – México

agomez@cinvestav.mx

Studies on science teacher's professional knowledge have been typically used as standardized instruments (e. g., concept inventories) or class plans and observations. These works suggest little or no integration between the dimensions that constitute content knowledge (e. g., cognitive, didactic, and epistemological). However, these instruments have methodological scopes, which allow to study only one dimension of content knowledge. We propose an instrument that (1) yields information of two or more integrated dimensions; (2) avoids inducing the use of content knowledge that guides teacher thinking, and (3) is not a standardized instrument to avoid teachers only recognizing scientific information.

In this work, we consider that thought experiments have the above characteristics, so our question is: which content knowledge dimensions of physics secondary teachers can we study in an integrated way through thought experiments?

The aim is to study which dimensions can be examined in an integrated way using the Galileo Galilei thought experiment on free fall as a methodological instrument. The scenario visualized by Galileo consists in a heavy and a light body falling simultaneously from different heights to analyze potential causes of falling speed. With this experiment, Galileo tests the sufficiency and truthfulness of the Aristotelian theory of fallen bodies. We assume that Galileo's experiment is an ideal theoretical model with methodological and heuristic functions since the ideas for physics teaching are usually like the original scientific ideas.

We conducted qualitative research on a think-aloud interview with three high school physics teachers. The interviews were recorded to generate verbal reports, which were analyzed in three stages: 1) presentation of results in terms of *a*) free fall mental models, *b*) teachers' mental actions when modeling. 2) Each verbal report is interpreted as an individual instance; we present a summary with our reflections on teachers' models and actions to account for the dimensions of knowledge of the free fall content manifested. 3) We interpret categories with all verbal reports and present a summary of our explanation on how knowledge dimensions are integrated into the context of this content and thought experiment.

We find that teachers constructing free fall mental models show incomplete ideas about the conditions analyzed by Galileo when he tested Aristotelian principles. Teachers models are simple and with low conceptual hierarchies. Nevertheless, models are effective in explaining free fall by relating independent and dependent variables (gravity, shape and body weight, air resistance, etc.) that determine the fall speed.

Teachers determined the theoretical entities and principles to represent, operate and explain free fall in the modeling process. They developed their own models without guidance from the interviewer. The teachers explained reference theoretical models, reviewed them and analyzed them, and imagined the situation to conclude with free fall models that put knowledge into action and do not mechanically reproduce scientific information.

Free fall models represent the scope and organization of teachers' content knowledge. And the modeling process consisted of more than issuing theoretical and practical principles. Our findings suggest the possibility of studying the cognitive and epistemological dimensions in an integrated way without inducing the use of variables and avoiding the task of recognizing scientific information. We conclude that the suggested lack of integration of the content knowledge dimensions in other studies is methodological and not ontological.

With our work, we intend to contribute to the studies on teachers' reasoning processes and effective mental actions to promote professional development. However, we recognize the limited scope of our conclusions, so we invite to further discuss and overcome some epistemological and methodological difficulties that limit our reflections.