

- Sobel, D., 1995, *Longitude: The True Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time*, Walker & Co., Nueva York.
- Sommerville, S., 1974, "The Pendulum Problem: Patterns of Performance Defining Development Stages", *British Journal of Educational Psychology*, vol. 44, pp. 266-281.
- Stinner, A. & Metz, D., 2003, "Pursuing the Ubiquitous Pendulum", *The Physics Teacher*, vol. 41, pp. 34-39.
- Suchting, W. A., 1995, "The Nature of Scientific Thought", *Science & Education*, vol. 4, no. 1, pp. 1-22.
- Tavel, M., 2002, *Contemporary Physics and the Limits of Knowledge*, Rutgers University Press, New Brunswick.
- Tristram, H. (ed.), 1952, *The Idea of a Liberal Education: A Selection from the Works of Newman*, Harrap, Londres.
- Westfall, R. S., 1990, "Making a World of Precision: Newton and the Construction of a Quantitative Physics", en F. Durham & R.D Purrington (eds.), *Some True Method. Reflections on the Heritage of Newton*, Columbia University Press, Nueva York, pp. 59-87.
- Wise, M. N. (ed.), 1995, *The Values of Precision*, Princeton University Press, Princeton.
- Yoder, J. G., 1988, *Unrrolling Time: Christian Huygens and the Mathematization of Nature*, Cambridge University Press, Cambridge.

Capítulo 2

Explorando péndulos en el salón de clases

Elizabeth Cavicchi

Edgerton Center, MIT

Introducción

Hay muchos ojos, manos y mentes en un salón de clases de ciencia. Todos esos ojos pueden observar lo que las manos han hecho o echado a andar. Todas esas mentes pueden ser activas, inquisitivas sobre lo que ven, respondiendo con pensamientos y acciones que tienen aun que ponerse a prueba. Imagina que emerjan en el salón de clases procesos como darse cuenta, realizar actividades, cuestionamientos, discusión y comprensión. En el contexto del salón de clases, las expresiones de los aprendices, que surgen a partir de la observación particular y personal, se convierten en algo compartido con otros e interesada en los fenómenos naturales. Al comprometerse con cosas, acciones y pensamientos en relación con otros, estos participantes disciernen como esas relaciones funcionan o fallan, se mantienen o cambian. Al observar e inferir esas relaciones físicas, ellos están en el *quid* de cómo se forma el entendimiento científico.

En un salón de clases donde los aprendices forjan su propia comprensión de la ciencia, el profesor y los alumnos se relacionan unos con otros y los materiales que se estudian de formas que difieren de la conducta donde los estudiantes son guiados o dirigidos para aceptar los hallazgos científicos de otros. El filósofo David Hawkins (2002/1969) describió ese contexto relacional como triangular y no jerárquico, sustentado por tres entidades representadas por los pronombres "yo", "tú" (*thou*) y "lo" (*it*). Los pronombres personales "yo" y "tú" designan al profesor y al aprendiz en cualquier orden, y el pronombre "lo" describe al sujeto de su estudio. El profesor, participante con su estudiante como Yo y Tú, procura involucrar al aprendiz en una relación completa con la materia como Yo y Lo. Cualquier fascinación que el aprendiz descubra en la materia, o las elecciones que el estudiante haga mientras *lo* explora se convierten en oportunidades para que el profesor estimule. El profesor puede alentar al estudiante para alcanzar algo más o proponer actividades desconcertantes que puedan afectar las conjeturas iniciales de los estudiantes y estimularlos a considerar otras opciones. En estos inicios inestables, el profesor está estimulando al estudiante para poner los ojos, las manos y la mente en la respuesta y para relacionarse con la materia en todos sus matices y propiedades. Describiendo la relación triangular en el contexto de un aprendiz niño, Hawkins escribió: "entonces el niño cobra vida para el maestro, así como el maestro para el niño. Ellos tienen un tema en común para discutir, ellos están involucrados juntos en el mundo" (2002/1969, p. 60). Donde los aprendices cobran vida y se involucran con otros y con las cosas, el potencial para su crecimiento se hace diverso, fértil y supera lo que el profesor pueda haber planeado anticipadamente.

Enseñar fomentando relaciones triangulares requiere de curiosidad y flexibilidad por parte del profesor. Un apoyo para los profesores al expresar estas cualidades radica en la investigación pedagógica de la exploración crítica. La exploración crítica en el salón de clases se desarrolló originalmente en la enseñanza de Eleanor Duckworth (2001, 2006c, 2006d, 2006e, 2009) en Harvard, y se practica actualmente por profesores y educadores de profesores en una amplia gama de escuelas y contextos de aprendizaje en todo el mundo, con el apoyo de un sitio *web* (Critical Explorers Inc. 2010). Duckworth encontró los elementos que definen la exploración crítica por medio de dos experiencias fundacionales de su propio entrenamiento en la investigación con Jean Piaget (1926/1960) y Bärbel Inhelder (1974) en Ginebra, y su colaboración con David Hawkins y otros en el desarrollo del *Elementary Science Study* (ESS 1970, por sus siglas en inglés), un proyecto de desarrollo curricular realizado en Boston en la década de 60. De la investigación en Ginebra, la exploración crítica adopta la contribución de que cada uno de nosotros construye por sí mismo la comprensión, donde cada nuevo elemento es

incorporado [asimilado] por los medios desarrollados en nuestra experiencia pasada; al compartir o hablar sobre esta comprensión emergente, al mismo tiempo la ampliamos. Las experiencias escolares del ESS demostraron la generación en los aprendices de pensamiento productivo e investigativo mientras manipulaban materiales científicos comunes en un ambiente abierto.

Actividades y experimentos para la solución de problemas originados en las entrevistas clínicas de Piaget y los *currícula* ESS están dentro de los ejemplos de puntos de partida para las exploraciones críticas. Estos ejemplos inician con introducciones multifacéticas a la materia de estudio, incluyendo intrigantes dilemas que no succumben a una resolución cerrada. Siempre aparece un nuevo giro en la perspectiva, invitando a los aprendices a explorar más y, muchas veces, sorprendiendo también al profesor.

Fuentes de exploraciones críticas con péndulos

El péndulo es un ejemplar de lo antes expuesto. Inhelder y Piaget (1955/1958) les presentaron a niños y adolescentes el reto de encontrar qué influye en el ritmo del péndulo. Un niño de seis años empujaba el péndulo despacio o rápido, sus propias manos hacían los cambios y no podía distinguir su empuja-jala del movimiento natural. Niños mayores hacían oscilar el péndulo modificando la longitud de la cuerda, la cantidad del peso y cómo lo empujaban o soltaban, modificando a menudo todos los factores al mismo tiempo. Mientras podrían comparar el ritmo del péndulo en un caso con el de otro y decir cual era mayor, carecían del razonamiento para dissociar entre los varios factores uno y otro. Los jóvenes adolescentes dis-ciernen el papel de la longitud de la cuerda intercalando la prueba de un factor con otro. Sin embargo no tuvieron acceso al análisis que les permitiría excluir los factores no operativos, tales como el peso. Inhelder y Piaget observaron que el factor operativo de la cuerda fue identificado junto con la exclusión de los otros sólo por adolescentes que mostraron lo que ellos denominaron razonamiento de "operaciones formales". Estos adolescentes dominaban la expresión de varios factores potenciales y evaluaban la secuencia de posibles combinaciones. Para que estos adolescentes se convenciesen ellos mismos de que habían encontrado la relación que comanda el movimiento del péndulo no fue suficiente encontrar que la longitud de la cuerda hizo la diferencia. Ellos tenían también que concebir otros posibles factores y combinaciones y probarlos suficientemente para excluir los que eran no operativos.

La observación de Piaget e Inhelder –que lidiar con múltiples combinaciones es esencial para que un aprendiz maduro desarrolle una comprensión persuasiva novedosa– surgió a partir de un episodio del trabajo temprano de Eleanor Duckworth en el programa ESS (1968/2006). Ella involucró a un profesor para comparar dos péndulos del mismo tamaño, pero con diferentes cuerpitos pesados. El profesor pronto descubrió que cuando las longitudes se equiparaban, los dos oscilaban de forma similar. Luego Duckworth reemplazó uno de los péndulos en forma de bola con un cilindro de un peso diferente, suponiendo que el profesor probaría el efecto de la forma. La respuesta inmediata del profesor al apareamiento del cilindro con la bola –“¿son del mismo peso?”– provocó que Duckworth dijera “¡Pero si justamente *acabas* de pesarlos!” (p. 61). Al reflexionar sobre qué sucedió, la investigadora y el sujeto reconocieron que la única instancia de comparación inicial, el peso, fue una base inadecuada para que el profesor lo considerara como un hallazgo. La reacción de Duckworth a esa inadecuación lo desahogó. Una respuesta más productiva en la enseñanza hubiera sido mantener la cuestión abierta y animar al aprendiz para probarlo bajo múltiples maneras y condiciones hasta que el aprendiz (y el profesor que observa pero no dirige) estuvieran satisfechos con que su inferencia se sostiene de forma general.

Esa cualidad de apertura –para tolerar que los aprendices exploren múltiples factores, combinaciones e intentos– también surgió en un salón de quinto año del ESS, el cual era observado por David Hawkins (1965/2002). Lo que comenzó como una única sesión sobre el péndulo dio lugar a exploración tan intensa por parte de los niños que el profesor tuvo que extenderla una y otra vez durante semanas (Figura 1, izquierda). En cambio, todas las preguntas que los adultos podrían haber introducido explícitamente (ver la *Guía del Profesor*, ESS, 1969) aparecieron sin instigarlos, por medio de la curiosidad de los niños. Hawkins nos invita a asomarnos en esta escena:

*Y tú ¿has intentado con el péndulo bajo el agua? Ellos lo hicieron. Más allá de nuestro disfrute espontáneo y manifiesto del fenómeno, se hacen muchos tipos de descubrimientos, pero los adultos los dejamos escapar sin mucha resonancia. Así que se hicieron descubrimientos, se observaron, se perdieron, se volvieron a hacer... todos nosotros debemos cruzar la línea entre la ignorancia y el *insight* para comprender verdaderamente (1965/2002, p.70).*

Esta clase de quinto año demuestra una gran enseñanza para los profesores: aquella sobre la confianza, confianza en el proceso de desarrollo que sigue cuando tantos ojos, manos y mentes exploran el objeto de estudio, en este

caso, el péndulo. El proceso es no lineal, multidireccional y no puede avanzar por medio de atajos o instrucciones impuestas desde fuera.



Figura 1. Izquierda: Niños en el *Elementary Science Program* en los años '60 exploran péndulos (ESS 1969); el mismo marco fue usado por Masa medio siglo después. Derecha: El artículo en el periódico local sobre mi proyecto del péndulo para la Feria Científica.

Péndulos en mi experiencia temprana y de enseñanza

Fuera de la escuela y animada sólo por mi padre (un ingeniero de la NASA), mi primer proyecto en ciencia física fue “Péndulos, péndulos, péndulos”, ganador del premio para el del noveno grado en la Feria de Ciencias en el área de Cleveland, Ohio, (Figura 1, derecha). Con un reloj analógico, le tomé el tiempo a muchos recorridos de un péndulo casero mientras variaba un rasgo a la vez, tal como la longitud de la cuerda, el arco y arreglos con múltiples cuerpitos pesados. Para trazar una gráfica había que computar el promedio del tiempo de oscilación. A diferencia de las exploraciones con péndulos descritos arriba, cuyo valor educacional pasaría inadvertido para la mayor parte de los jueces de una feria científica, mi proyecto reflejaba una instrucción convencional en ciencia. Por ejemplo, yo adopté la práctica de cambiar una variable a la vez, la asunción de que el promedio del tiempo de las oscilaciones representaría el tiempo real de las oscilaciones y usé datos para confirmar resultados que conocía ya con anticipación. Estas prácticas y suposicio-

nes definieron y limitaron el alcance con el cual podría haber innovado con mi proyecto.

Presentaciones de la teoría reemplazaron a la experiencia en mis estudios universitarios de física en el MIT. Sólo conocí el péndulo en el pizarrón y en conjuntos de problemas, pero no en el laboratorio. Se le estudiaba conforme a varias técnicas matemáticas: componentes tangenciales y radiales en el análisis de la fuerza newtoniana; la relación de trabajo y energía aplicada al punto medio y alto de su oscilación; un ejemplo de fuerza de restauración bajo la aproximación del ángulo reducido; y ecuaciones diferenciales de un oscilador armónico. Las matemáticas les decían a los estudiantes lo que estaba allí, omitiendo cualquier papel para la observación directa.

En contraste con la física, la observación y exploración eran parte integral de cómo trabajé en el estudio de arte, donde dediqué un número creciente de largas horas formando esculturas de barro cada vez más complejas, tratando de ir más allá de los límites propios del material utilizándolas para experimentar mezclando la observación con exploración, la ciencia con el arte, conectándolo con la historia y enseñanza de la ciencia por medio de mi participación como investigadora para la serie científica de televisión pública y el libro *The Ring of Truth* (Morrison 1987).¹ El juego y el cuestionamiento tercalados con nuestros ensayos preliminares con: un reloj de torre amplificado con lentes, una hoguera con donas rellenas de jalea, la observación de una noche estrellada. Con estas observaciones personales, la ciencia real se desenvolvía en los lugares cotidianos, no así, en los salones de física donde participaba.

Como profesora de física de la Universidad de Massachusetts, Lowell, impartí el currículum de ingeniería física basado en álgebra, alternando la cátedra con el laboratorio. El péndulo apareció en tres laboratorios: el péndulo de anillo [*Ring Pendulum*], el péndulo balístico [*Ballistic Pendulum*], y el péndulo simple (Pullen 198x). Sensores fotoeléctricos [*photogates*] puestos afuera del oscilador detectaron las oscilaciones de eventos cambiantes que la computadora *Apple IIe* adjunta convirtió en intervalos de tiempo con 1ms de precisión. Para cada grupo de datos, el *software* de la computadora producía una tabla con estadísticas y una gráfica. En el primer laboratorio se pidió a los estudiantes encontrar la ley de potencia que se ajustaba mejor [i.e., raíz cuadrada] al periodo del péndulo por oposición a su tamaño [el diámetro de una oscilación]. El último laboratorio proporcionó el modelo del ángulo reducido para el periodo del péndulo y orientó a los estudiantes para examinar la gran separación de amplitud de este modelo para un péndulo de longitud fija.

Enseñar este laboratorio repetidamente, mientras continuamente amplíaba mis explicaciones de esto, me hizo darme cuenta que esta instrucción no lograba producir comprensión. En los márgenes del manual de mi laboratorio escribí: "los estudiantes aun no entienden este laboratorio, incluso con el material extra y dedicando toda un periodo [clase] al tema, no comprenden cómo dibujar la línea recta... ellos no comprenden la ley de Newton [septiembre 1991]".

No sólo fue el laboratorio del péndulo. Llegué a dudar de que mis estudiantes estuvieran formando alguna comprensión física de cualquiera de los materiales del curso: el libro de texto cuidadosamente trabajado, sus ejercicios, los laboratorios, incluso los ejemplos de la vida cotidiana y de la historia que yo añadía. El siguiente semestre intenté algo distinto, creando un nuevo curso alrededor de actividades de laboratorio y proyectos,¹ mirando lo que hacen los espejos (2009), proyectando cuadros de arte por orificios y disparando corchos con refresco de soda rojo hizo surgir la sorpresa y el darse cuenta espontáneamente a aquellos profesores que eran mis estudiantes. Algo estaba sucediendo –con el aprendizaje – que yo no había visto en mis clases de física o en otras que había observado (Di Stefano 1996). Una larga búsqueda de formas para sostener y apoyar ese compromiso creativo eventualmente me condujo a la exploración crítica.

Exploraciones críticas con péndulos

Con la exploración crítica el péndulo no se da en una sola lección. Abarca todos los múltiples comportamientos de fenómenos junto con las observaciones hechas por los aprendices y todo lo que ellos traen en esas experiencias. Los aprendices traen consigo una amalgama de impresiones provenientes de experiencias previas, que pertenecen tanto al contenido como al tratamiento de lo aprendido. Un reto para enseñar por medio de la exploración crítica radica en invitar a los aprendices a establecer nuevas relaciones con los materiales y el aprendizaje al poder arriesgarse y responder perspicaz y críticamente a esas suposiciones pasadas o a sus ideas en desarrollo. Mantener esta invitación abierta para los estudiantes requiere que el profesor continuamente imagine posibilidades para su exploración y responda provocando reflexión ante los supuestos sin cuestionar de los estudiantes que limiten artificialmente su trabajo.

¹ Desarrollé y enseñé el curso "Science From Our Lives" en los semestres de primavera y verano de 1992 en la Universidad de Massachusetts Lowell.

Que la actividad de oscilar pesos en una cuerda puede dar lugar a diferentes objetivos se ilustra con el taller para profesores que conduje junto con Fiona Hughes-McDonnell (2008). Este taller comenzó con la pregunta “¿qué notas?”. Eleanor Duckworth quien participaba en el taller estaba perpleja con la forma del *recorrido* del peso. Ella dijo que esto “deshizo mis suposiciones”. Si ella comenzaba con el peso oscilando en un círculo ¿alguna vez recorrería una línea recta? Otra profesora sostuvo el extremo superior de una cuerda y puso el peso a oscilar: “en mi mano, tengo el sentido táctil de la diferencia [el tirón de la cuerda sobre la mano]. Estoy desconcertado sobre si se siente de forma diferente [durante la oscilación]” (Figura 2).

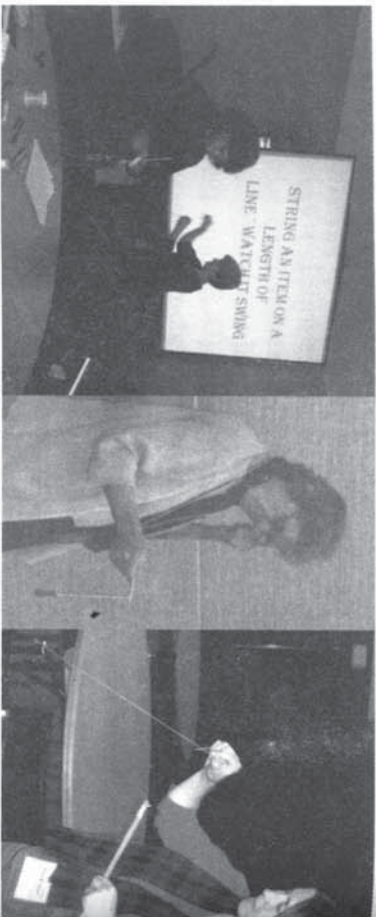


Figura 2. Izquierda: Profesores hacen péndulos con cuerdas y pesos en un taller. Centro: Eleanor Duckworth explora el camino de oscilación del peso. Derecha: Una profesora deja caer la cuerda y siente en su mano el peso.

Alguien más osciló un anzuelo pesado y lo observó, luego intentó con uno pequeño. Al darse cuenta que este oscilaba también, el profesor de ciencias reportó: “no tengo idea” [acerca de lo que está sucediendo]. Subsecuentemente, los profesores trabajando en parejas improvisaron con: la suspensión de las cuerdas; oscilando dos pesos desde el mismo apoyo; soltando el peso desde una vertical en diferentes ángulos; comparando la oscilación de un anzuelo con una rondana (Figura 3); y probando una suspensión en “V” con el peso colgando a la mitad entre los dos extremos de la cuerda.

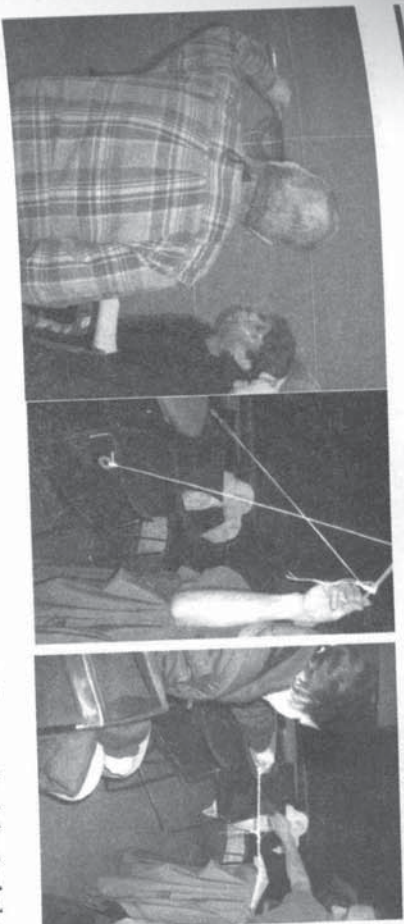


Figura 3. Izquierda: Profesores consideran variar el ángulo de la cuerda del péndulo. Centro: Un profesor compara la oscilación de un peso de pescar [peso superior] con una rondana. Derecha: Un profesor se prepara para soltar el peso (oculto en su puño) desde una cuerda suspendida en dos puntos como en V.

Nadie cuestionó el efecto de la longitud de la cuerda, que es la tarea usualmente asignada en los laboratorios escolares. Aunque estos profesores habían hecho las actividades con los péndulos antes –y algunos no lo habían hecho– estuvieron en la libertad de explorar algo diferente del factor convencional. Así lo hicieron sorprendiéndose con la profusión de investigaciones y genuinos desconciertos que surgen al usar materiales tan comunes como las cuerdas y los pesos. Aquellas investigaciones generadas personalmente nunca se detienen, como lo puso en evidencia la perplejidad de Duckworth, una pionera del péndulo de toda la vida. Un profundo componente al enseñar la exploración es que el profesor se esfuerza continuamente para estar abierto a otras exploraciones personales sobre el objeto de estudio, sin apoyar el conocimiento del profesor en una autoridad fija.

El peso, no la longitud “el tiempo hasta que el peso deja de oscilar”, no el periodo emergen como las propiedades de los péndulos que provocan la curiosidad entre los profesores de escuela primaria participantes en el curso de Fiona Hughes-McDonnell sobre el aprendizaje y la enseñanza de la ciencia por medio de exploraciones críticas (2009). En el curso de sus experimentos estos profesores continua y libremente revisaron los materiales en uso, los métodos para soltar (el péndulo), qué y cómo observaban, y las conjeturas subyacentes a sus ensayos observaban, y las conjeturas subyacentes a sus ensayos. Los profesores hicieron estas revisiones en respuesta

a lo que notaban y les asombraba; entonces, muchos cambios reflejaban lo que los profesores aprendían haciendo, mientras que otros cambios, pareciendo arbitrarios, podrían indicar aspectos que los profesores no habían tomado en cuenta. Su persistente estudio del peso migró del uso de pesos con forma extraña a usar rondanas que podrían aplastarse para incrementar el peso de la oscilación uno de cada vez. Por medio de este invento, los profesores llegaron a cuestionar tentativamente su supuesto base.

Probablemente el peso no haga diferencia. Al recordar algo de la ciencia escolar sobre los objetos pesados y ligeros cayendo igual, los profesores cambiaron el salón por las escaleras. Uno soltó pares de bolas de diferente peso desde arriba mientras los otros escuchaban abajo, alertas e interesados en cualquier falta de coincidencia cuando las bolas tocaran el piso. No percibieron nada. Regresando al salón, tomaron las mismas bolas que cayeron igual y –oscilándolas como pesos de péndulo– empezaron a considerar el papel de la longitud en la cuerda. Su experiencia reflejada en el aprendizaje anterior, corrigió algunos asuntos y malentendidos, y llegó a una comprensión razonable y compartida sin ser guiados para hacerlo.

La jornada experimental compartida por los profesores cubrió mucho terreno antes de identificar esta cuestión, la cual en un laboratorio convencional hubiera dirigido a los estudiantes a poner a prueba sin haberles dado el espacio y el tiempo para trabajar sobre los factores que surgen como relevantes para ellos. Como su cada vez más sensible examen del peso no lograba satisfacer sus expectativas, los profesores reunieron el valor personal para cuestionar su línea de pensamiento original –y proponer una nueva. Como los adolescentes observados por Inhelder y Piaget (1955/1958) excluyeron el peso como un factor operativo, estos profesores discernieron algo más –algo común subyacente entre los aparentemente dispares movimientos de los péndulos y la caída libre. Hughes-McDonnell, su maestra en estas exploraciones, compartió con la clase el ejemplo de Galileo quien al interconectar las investigaciones sobre los movimientos de la caída libre, el plano inclinado y el péndulo, como ellos, había procurado escuchar los sonidos “cuando su ojo parecía inadecuado para la tarea” (Hughes-McDonnell 2009, p. 223).

Exploraciones críticas con péndulos e historia

¿Cómo fue para Galileo observar y buscar comprender movimientos? ¿Podrían los éxitos de Galileo resonar con los aprendices como los descritos arriba, quienes comienzan por sus propias observaciones y no por lo que

otro les ha dicho que deben ver y hacer? Evidencias de los estudios de Galileo sobre el movimiento rastreados por Stillman Drake (1978, 1990) me impresionaron por el potencial educativo de la conciencia creciente de Galileo sobre todo lo que él ignoraba, y su ingeniosa persistencia (1997). Un ensayo de Tom Settle (1996) me mostró vívidamente –y a los alumnos que lo leyeron– la naturaleza exploratoria del proceso de Galileo con todos sus callejones sin salida y búsquedas ramificadas, con penetrantes analogías y críticas sagaces. Encontré mayor apoyo para ampliar las actividades de clase con péndulos e historia a través de la ciencia, historia y materiales educativos reunidos por el *International Pendulum Project* (Matthews et al. 2005). Sucesivas experiencias en la enseñanza profundizaron mi propia sensibilidad sobre las formas de exploración de los aprendices –desde mis estudiantes hasta Galileo– con péndulos. Sin estar ya perpleja por lo que los estudiantes “no entienden” –y (más importante) al rehusar propositivamente siquiera a considerar qué “debería” suceder – me di cuenta continuamente de la curiosidad de los estudiantes con los péndulos y las incisivas observaciones a las que llegan.

Mi primera clase de exploración con estudiantes universitarios con péndulos² fue muy diferente de aquel laboratorio de física en el que arroje mero enseñé, donde cada péndulo se presenta igual y se espera que arroje resultados similares. Aquí, proporcioné materiales componentes (cuerda, cáñamo, sedal, pesos, rondanas, cinta adhesiva) sin instrucciones de armado, junto con la pregunta ¿“qué notas” sobre algo oscilando? Desde soportes de anillos del laboratorio ¡los pesos sencillos o dobles giraban! Los soportes se tambalearon. Los pesos golpearon sus soportes. Ningún movimiento de los pesos parecía firme. Nuevos arreglos surgieron. La barra de un percherero, o un enchufe eléctrico colgante, fijaban las cuerdas en la siguiente ronda de experimentos en los estudiantes. Ahora, para Anna era la oscilación misma la que atrapaba su atención, no importaba lo que hiciera para aumentar los pesos o cambiar su forma, en la oscilación “lado-a-lado” aun ocurría y cambiaba “una y otra vez” (Tsui 2005, Figura 4). Otros descubrieron que un peso eventualmente se separaba del movimiento lado-a-lado, para seguir un camino circular (Bramhill 2005, Crohan 2005).

² Los episodios descritos en esta sección están tomados del desarrollo de mi curso “Science Experimenting: Learning About Nature, History, and Ourselves”, en 2005, en la Universidad de Massachusetts Boston. Realicé este curso una vez más en 2007. Mis escritos incluyen otras narrativas provenientes de las experiencias en estos cursos (2007, 2009, 2011).

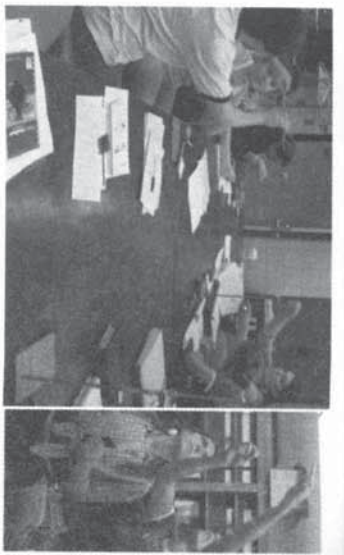
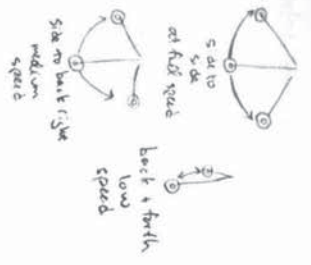


Figura 4. Izquierda: Estudiantes suspenden péndulos en soportes de anillos. Centro: Estudiantes intentan usar una montura en el techo para suspender la cuerda de su péndulo. Derecha: Los dibujos del movimiento del péndulo de Anna registran una disminución en la "velocidad" junto con el cambio de movimiento de "lado a lado" al movimiento "de ida y vuelta" (Tsuji, 2005).



ARC	TIME	ARC	TIME
1	1.77	9	1.63
2	1.75	7	1.69
3	1.74	5	1.69
4	1.74	3	1.60
5	1.72	1	1.70

Figura 5. Izquierda: El dibujo de Lucienne de sus péndulos con dos aretes, colgando desde una zapatera casera (Pierre, 2005). Derecha, arriba: Dibujos de Peter de la oscilación del péndulo a través de un arco reducido (Fig.1) y un arco grande (Fig.2) (Tsuji, 2005). Derecha, abajo: Cuadro de datos de Samantha, con los tiempos que registró para las oscilaciones sucesivas de un péndulo (Pitchel, 2005).

Algunos respondieron a la observación de Galileo (1638/1914, parr. 140, p. 97) que el péndulo completa cada una de sus muchas oscilaciones en el mismo lapso. Percibiendo este comportamiento como rítmico Peter (un músico) sincronizó la oscilación de dos péndulos de la misma longitud. Quedó fascinado por cómo los "dos [cuando] se dejan ir aun en diferentes arcos, permanecen constantes" (Tsuji 2005, Figura 5, centro). Samantha, estudiante de letras inglesas inventó una prueba experimental diferente aunque equivalente (Pitchel 2005). Tomando el tiempo del ir y venir en sucesivas excursiones de un péndulo (Figura 5, derecha), ella le reportó a la clase: "probé la teoría de Galileo acerca de que con el paso del tiempo, mientras el arco se vuelve más corto, le toma el mismo tiempo para un arco más corto que para uno mayor, y yo tomé el tiempo y fui yo quien lo pensó" (Cavichhi 2005).

Sin embargo, esta observación expresada por Samantha respaldando a Galileo, fue pasada por alto por los demás al discutir qué es lo que involucran las oscilaciones del péndulo. Los conceptos de longitud y peso se confundieron. Términos medio oídos por pasadas exposiciones a lo científico, tal como "gravidad" y "fricción" tuvieron el efecto de detener a los estudiantes y evitar que experimentaran con el aspecto de mayor interés: cuánto tarda en detenerse el péndulo. En cambio, la clase inició un proyecto para producir un péndulo que tarda un segundo desde que es liberado hasta su máxima posición fuera [*i.e.*, 1/2 período]. Con cada alargamiento sucesivo de su cuerda, Andrew jalaba hacia atrás el péndulo desde su soporte en el perchero (Figura 6, izquierda, centro). Samantha vocaba los puntos cercanos y lejanos a Devin, quien manejaba el cronómetro de un celular. Entre de bromas sobre que Galileo no tenía uno de éstos, sólo la primera media oscilación después de cada liberación fue cronometrada (Cavichhi, 2007). Después de varios intentos llegaron (casi) a su meta de un segundo [media oscilación] (Figura 6, derecha), les pregunté: "¿qué pasaría si en lugar de (cronometrar) la primera liberación de la oscilación, lo prepararan y lo hicieran en la 10ª. oscilación? ¿Sería lo mismo?". El razonamiento de Andrew "la velocidad decrecería, la distancia decrecería, y así [el tiempo de oscilación serial] lo mismo" animó a otros a reconsiderar su comprensión del argumento de Galileo dejada a un lado antes, la pregunta sobre "detener el tiempo" resurgió para Lucienne: "lo que pensé que Galileo quería decir [en el pasaje del arco grande-arco pequeño] es que le tomaría el mismo tiempo para detenerse". La pregunta sobre el peso resurgió también: algunos exclamaban que Galileo decía que sí importaba; otros exclamaban que no.

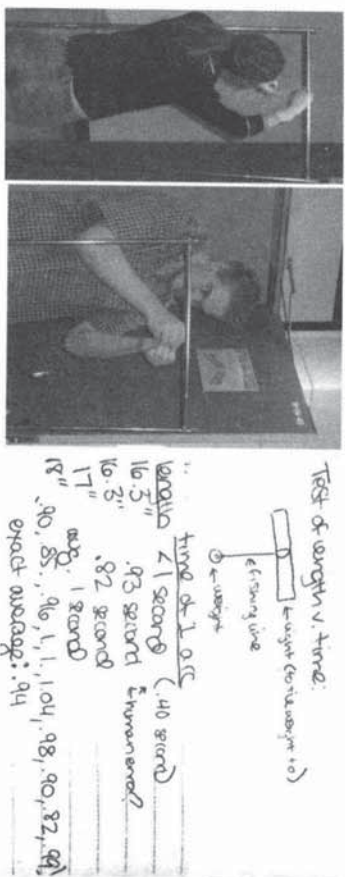


Figura 6. Izquierda y centro: Samantha y Andrew suspenden el péndulo desde un perchero en el salón de clases. Derecha: Tabla con datos de Samantha de tiempos de oscilación resultante cuando ellos aumentaban sucesivamente la longitud de la cuerda en su búsqueda por un péndulo con un tiempo de un segundo ($1/2$ ciclo).

En medio de esta disputa, Devin leyó el texto de Galileo en voz alta. Bajo este estudio detallado, los estudiantes revisaron las sutilezas para distinguir entre “tiempo en el que se detiene” y la expresión de Galileo “tiempo al pasar por” un arco pequeño o grande (1638/1914, p. 97). Devin gestuló con sus manos para mostrar los arcos pequeños y grandes. Lucienne se dedicó a seguir el tiempo de detenerse, simultáneamente cuestionó y entendió la interpretación divergente de Devin. Devin reluyó el pasaje de Galileo en voz alta; otro estudiante lo reiteró en sus propias palabras. Lucienne, Devin y los otros ahora expresaron un asentimiento común. Al asimilar el significado de lo que habían llegado a entender junto con Galileo, Devin se commovió con su franqueza al admitir que este resultado parece difícil de creerse: “Galileo hizo este descubrimiento y luego dijo: ‘sin duda esto me parece un tanto improbable’... ¡él es un sujeto modesto!” (Cavicchi 2005).

En respuesta a los experimentos autoiniciados junto con las observaciones de Galileo, estos estudiantes: improvisaron péndulos con materiales que encontraron; observaron la sincronía con sus propios ojos y tomaron el tiempo de las oscilaciones con cronómetros; discutieron, cuestionaron y repensaron su comprensión del movimiento y su descripción histórica. Aunque los péndulos rítmicos de Peter y el estudio del tiempo de oscilación de Samantha, hechos en casa, repitieron los hallazgos de Galileo sobre oscilaciones de arcos grandes y pequeños, ni su texto ni sus confirmaciones llegaron a las mentes de los otros. Una disonancia subyacente, como la de Lucienne sobre detener el tiempo, llegó a una nueva resolución únicamente por medio de la participación directa de la estudiante en discusiones y ensayos. En su proceso de construcción de comprensiones sobre fenómenos, ellos también se es-

taban convirtiendo a sí mismos en exploradores, como Lucienne reflexionó: “Galileo, un científico mundialmente famoso, intentó entender el mismo asunto que nosotros, universitarios de los primeros semestres –me sentí como si estuviéramos logrando las habilidades para ser grandes innovadores e investigadores sobre el mundo que nos rodea” (Pierre 2005). La entrada del diario de Lucienne indica el crecimiento por el que pasan los aprendices al tener oportunidades para la reflexión personal, así como por medio de las actividades grupales y el trabajo con materiales.

Estos estudiantes universitarios eran principiantes en cuanto a la exploración en el salón de clases, mientras yo estaba buscando maneras de presentar péndulos, otros fenómenos científicos y la historia de la forma más incitante, siempre estimulando el darse cuenta. Mi aprecio por el proceso exploratorio creció compartido por los aprendices y por las figuras históricas donde, como Hawkins subrayó, los “descubrimientos” se hacen no una vez, sino a través de muchas iteraciones que abarcan observaciones espontáneas e inesperadas así como prácticas sistemáticas. Las exploraciones de los estudiantes me hicieron consciente de cuánto estaba en juego para ellos para desarrollar comprensiones personales y observacionales de los comportamientos del péndulo. A partir de ello me di cuenta de la inadecuación educativa del currículum de física que proporciona variables, resultados y explicaciones sin cualquier aportación del estudiante.

El mismo tiempo de oscilación

Animar a mis estudiantes para develar los caminos del péndulo –por medio de exploraciones autodirigidas– para mí y para ellos, ofrece una involucreción educativa más profunda, que la práctica estándar de adelantar las explicaciones que se espera que los estudiantes acepten sin observación ni examen. Mi enseñanza subsecuente por medio de exploraciones críticas ha mostrado que el entrenamiento científico previo típicamente impide la apertura de los estudiantes para observar y explorar los comportamientos de oscilaciones. Las respuestas parece que estuvieran ya allí.

Las respuestas y suposiciones desaniman la exploración y limitan las posibilidades educativas. Mientras que el profesor de primaria que trabajó con Eleanor Duckworth no se convenció con unos cuantos intentos de que el peso no importa, los universitarios tienden a asumir que ya tienen una respuesta desde el marco de la física newtoniana que vieron en clase y no le ven sentido a buscar más allá. A menudo la respuesta que tienen amerita un reexamen, tal como la afirmación de que un cuerpo más pesado oscila más rápido que uno ligero o que el tiempo de oscilación se escala linealmente –o no

lo hace— conforme a la longitud de la cuerda. Mientras las pruebas experimentales pueden exponer el comportamiento real, la exploración crítica implica investigar más allá de los límites de un resultado discreto. Tal investigación abarca observar dentro y fuera del salón de clases, escuchar las ideas que surgen confusamente en la discusión con cada uno, extendiendo la curiosidad en contextos dispares cuyas interrelaciones sólo se perciben por medio de muchas experiencias críticas y comparativas. Así lo fue para Galileo también.

Para Galileo el péndulo fue una búsqueda de toda la vida. Él continuó desconcertándose con sus movimientos, perturbaciones y juegos una y otra vez, y lo analizó con otros movimientos, incluyendo la caída libre, el plano inclinado y su atrevida y peligrosa visión de que la Tierra se mueve (Drake, 1978, 1990; Settle 1996; Cavicchi 1997). Como Devin percibió, el péndulo siempre le pareció “impresionante” a Galileo. En el corazón de esa maravilla latían sus oscilaciones hacia atrás y hacia adelante, [casi] constantes en el tiempo, sin importar desde cuando comenzó. Antes que Galileo, nadie había comprendido esa constancia. Con todo, se espera que los estudiantes de ciencia acepten el período del péndulo como un hecho para ser medido y resuelto por medio con medios preestablecidos. Para los profesores de física la periodicidad del péndulo está tan arraigada que no podemos tener la experiencia del péndulo sin imponer la periodicidad en sus oscilaciones. Carecemos del asombro de Galileo.

El asombro se convirtió en una realidad extraordinaria para una estudiante ante de mi seminario-laboratorio reciente al encontrarse con el trabajo de Galileo por medio de la exploración crítica.³ Una profesora de arte de preparatoria, Masa, había tomado el curso de exploración crítica en el salón de clase con Eleanor Duckworth⁴ durante el semestre anterior. Ella vio mi seminario como una oportunidad para experimentar esta pedagogía como un aprendizaje en ciencia física, la cual no había estudiado antes.

Una ambigüedad surgió en mi clase al discutir los movimientos acelerados del Diálogo de Galileo. ¿Qué quiso decir Galileo con “peso en una cuer-

³ Imparto el seminario “Recreate Historical Experiments: Inform the Future with the Past” en el Edgerton Center, MIT. Narrativas extraídas de seminarios previos se documentan en mis escritos (2008a, 2008b, 2010). El sitio *Open CourseWare* del MIT proporciona todos los materiales del curso, lecturas, tareas, trabajo de los estudiantes y fotografías de este seminario de Programas Especiales; para el desarrollo del curso de enero de 2010, ver: <http://ocw.mit.edu/courses/special-programs/sp-713-recreate-experiments-from-history-inform-the-future-from-the-past-galileo-january-iap-2010/>

⁴ El curso T440 de Eleanor Duckworth, “Teaching and Learning”, se documenta en sus escritos y se describe en el sitio web *Critical Explorers* (2010). Ella lo imparte en Harvard Graduate School of Education.

da”? Para Masa, significaba un peso colgante sin movimiento. Amarrando un peso para pescar en una cuerda, ella lo hizo colgar de su mano. Zengxu, su compañero de clase lo codeó a un lado. Siendo un ingeniero, él lo vio como un péndulo y lo describió: “cuando lo empujas, se va más allá [vertical], luego regresa y se va” (Cavicchi 2011). Observando, Masa supuso que disminuiría su velocidad. Zengxu objetó. Ella ponderó: “¿por qué continua moviéndose? Me pregunto si podríamos medir...”

Colocaron el peso suspendido en un soporte de madera sobre la mesa. Masa cubrió la mesa con papel blanco y marcó inmediatamente abajo del peso colgante. Ella también marcó abajo del peso cuando estaba en la posición desde la cual se le soltaría para que comenzara a oscilar. Abriendo un compás para que abarcara el doble de la distancia entre la marca al soltar y la marca al colgar, ella lo usó para marcar la distancia equivalente en el otro lado, desde donde no se soltó (Figura 7, izquierda). Esta tercera marca ayudaría a calcular si el peso oscilaba hacia afuera de la misma forma de cada lado a partir de la marca de la posición colgante: “soltamos [el peso] en esta [marca] y vemos si llega a la otra. Cuando estaba a punto de soltar el peso por primera vez, casi como una ocurrencia tardía Masa añadió, “¿deberíamos tomar el tiempo para cuando esto suceda?”



Figura 7. Izquierda: Masa abre el compás sobre el papel blanco bajo el péndulo en reposo para marcar los dos puntos desde donde será soltado; en un lado y a la distancia equivalente del otro lado. Derecha: Zengxu y Masa toman el tiempo de oscilación de su péndulo usando el reloj y el celular.

Rápidamente, cada uno improvisó un cronómetro; Masa lo hizo usando su celular, Zengxu usó su reloj. Soltaron el peso desde la posición marcada por Masa y pusieron sus cronómetros (Figura 7, derecha). Zengxu cronometró 20 oscilaciones; Masa no obtuvo lectura. Ella propuso volver a crono-

trarlo. Dejando que el peso continuara oscilando, cronometrarón otras 20 oscilaciones. El resultado de Zengxu fue el mismo que el anterior; el suyo, menor. Ella dijo "creo que va más lento". En un tercer cronometraje de la continua oscilación del peso, ambos relojes mostraron tiempos idénticos entre sí con la primera medición de Zengxu. ¿Cómo pudo suceder esto? Se preguntaba Masa: "De todos modos, creo que va más lento!"... ¡Podría ver esto durante horas! Mientras continuaban observando y hablando, el peso oscilaba bien dentro de las marcas de lápiz que Masa hizo en el punto en que fue soltado. Cuando Zengxu afirmó "no va más lento", Masa añadió "yo creo que se está poniendo más lento". Al cronometrar otras 20 oscilaciones el resultado de Zengxu no había cambiado, mientras Masa determinó que ella había empezado a contar en un punto diferente que él. Con esa consistencia mejorada en su método, ambos cronómetros arrojaron el mismo valor en otro intento. Masa estaba perpleja y dijo: "Así que es lo mismo, a pesar de todo. ¡Aunque la distancia que está recorriendo, es más corta! Hmnm. ¡Esto es interesante! ¡¡¡Estoy tan confusa por esto!!!".

Ella decidió cronometrar una sola oscilación. Cronometró la siguiente oscilación del peso y luego quiso intentar una oscilación amplia. Sin un momento de pausa, ella jaló el peso hacia el lado de su marca original para soltarlo por segunda vez en ese día. Zengxu estaba aún tratando de poner su reloj cuando Masa gritó y se rió (Figura 8, izquierda). Nadie más supo que provocó eso en Masa. Finalmente ella expresó lo que la asombraba: "¡¡¡Es lo mismo!!!".

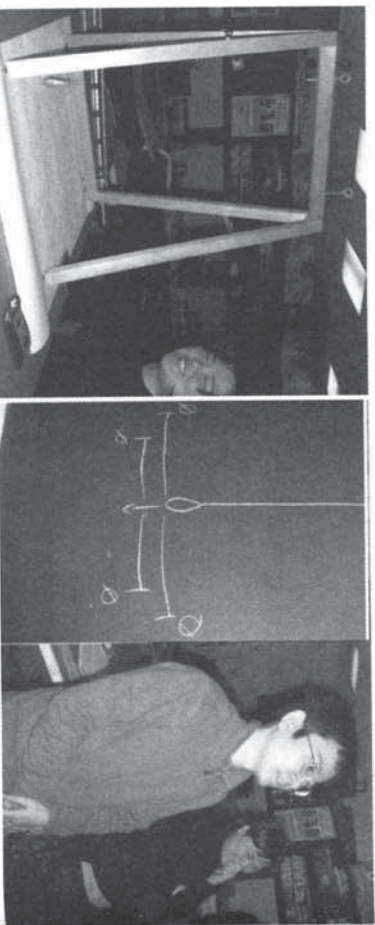


Figura 8. Izquierda: La sorpresa de Masa al descubrir que su péndulo tardó lo mismo en las oscilaciones amplias que en las cortas. Centro: Dibujo en el pizarrón de Masa que representa la oscilación amplia (par superior de líneas) y la corta (par inferior). Derecha: Al ver los dibujos de Masa (centro) Zengxu expresa asombro acerca de lo constante que es el tiempo de oscilación.

Después de otro intento, Masa se acercó al pizarrón. Trazando (Figura 8, centro), llevó sus pensamientos al centro de lo que explotó en su confusión y asombro: "¿?¡¡Aun para las dos distancias [de oscilación] que son diferentes, algo tiene que ser lo mismo. De otra forma, pues cómo diablos es que [las oscilaciones] resultan simultáneas eh!!? Eh". Con su propia improvisación con la cuerda, el peso y el cronómetro en respuesta para cada uno de los hallazgos siguientes, Masa había llegado a darse cuenta del movimiento periódico y pudo discernir el enigma. Para Zengxu cuyo entrenamiento en ingeniería proporcionaba la respuesta que modela el movimiento pendular, la investigación original de Masa lo libró de estar sujeto a esa respuesta. Con Masa comenzó a ver el fenómeno con el asombro inherente de mantener el ritmo periódico a través de recorridos que disminuyen, al grado de decir (Figura 8, derecha): "Esta es la parte más sorprendente".

La experiencia de exploración, observación y comprensión de Masa fue extraordinaria y similar a la de Galileo. Por la voz de Sagredo, el personaje con la amplia curiosidad en sus diálogos, Galileo expresó el inesperado asombro de encontrar que la oscilación de un peso llevaba "el mismo tiempo en pasar" tanto si los arcos eran amplios como reducidos (Galileo, 1938/1914, parr. 140 - 141). Justamente como algo sucedía de la misma forma para las oscilaciones de arcos reducidos y amplios, así había algo similar entre Galileo/Sagredo y Masa en la observación exploratoria por medio de la cual llegaron a la comprensión de la sorprendente regularidad de un comportamiento cotidiano.

Como la profesora que acompañó la exploración de Masa, mi relación con los estudiantes y la materia de estudio fue diferente de cuando conducía a los estudiantes de ingeniería en laboratorios sobre péndulos donde la constancia del tiempo de oscilación es una base asumida para probar los efectos de variaciones en la longitud de la cuerda, el peso y la amplitud de la oscilación. El péndulo es complejo; estas características pueden no parecer distintas ni la repetición temporal puede resultar obvia para los estudiantes. En lugar de remover preventivamente tal complejidad, la retuve para permitir su exploración. Intrínsecas al descubrimiento de Masa, fueron sus innovaciones en cuanto a cómo ella observó y de qué se dio cuenta mientras el péndulo oscilaba de un lado a otro. Innovar de estas formas es profundizar en el trabajo de científicos históricos como Galileo, y también es como el aprendiz le enseña al profesor lo que destaca, lo curioso y lo evocativo en la materia de estudio que los une. La enseñanza y el aprendizaje de Masa se animó al estar yo abierta para lo que sucediera durante su exploración, sin importar cuán novedoso o confuso pudiera parecerme.

Conclusión

El movimiento pendular es complejo, exhibe siempre más para observar, asombrarnos, medir, predecir, modelar y llevar adelante. Esta complejidad de los fenómenos está entrelazada con las respuestas investigativas de los aprendices que permiten apoyar sus esfuerzos exploratorios. Galileo y mis estudiantes formaron una profunda conciencia de las relaciones entre el tiempo y el movimiento por medio de su relación con el péndulo, sin conocer de antemano sus leyes. Al hacerlo, tienen mucho que enseñar a los profesores. Su historia mejora lo que se supone que la enseñanza es, justo como el comportamiento del péndulo altera lo que estos aprendices suponían saber acerca de sus movimientos. Despertando la curiosidad, el pensamiento crítico y la habilidad para cuestionar supuestos previos lleva tiempo y espacio emocional que no están presentes en la instrucción tradicional en el laboratorio.

Estos ejemplos de enseñanza con péndulos demuestran el resultado eventual de exploraciones y de procesos exploratorios. El resultado es un estudiante que puede expresar y evaluar ideas científicas sin depender ni de experiencias ni de materiales estructurados para afirmar esas ideas. El proceso para lograr esto tiene varios atributos, incluyendo seguridad de expresión, el profesor que abre puertas en lugar de cerrarlas, y un conocimiento general de –y atención a– exactamente a cuales puertas las interacciones abren o cierran.

Muchas interacciones tradicionales y preestablecidas en el laboratorio cierran las puertas, mientras que a veces una interacción directa e inmediata pueda abrir una puerta –tal como la curiosidad del profesor y el apoyo ante la confusión del aprendiz. Abrir puertas requiere de dos ingredientes: el tiempo para explorar tras la puerta y el espacio intelectual para formar la comprensión propia en lugar de aceptar la de otro. Ambas requieren de un profesor entrenado para explorar como un proceso y de enseñanza y aprendizaje. Las exploraciones críticas definen el conocimiento y las habilidades técnicas requeridas de esta clase diferente de profesor.

Agradecimientos

Tengo el gusto de agradecer a los estudiantes y profesores que participaron en laboratorios y actividades a lo largo del desarrollo de mis esfuerzos con el péndulo. Los participantes fueron estudiantes en ingeniería física; participantes en talleres para profesores; estudiantes en ciencia exploratoria incluyendo a Devin Bramhill, Jennimae Cronan, Annamarie Fallon, Andrew Lix, Lucienne Pierre, Samantha Pitchel, Aaron Shaw, Anna Tsui, Peter Tusi, Adwoa Boakye, Rika Hirata, Yan Yang, Zengxu Yang. Agradezco el apoyo de programas científicos donde he enseñado, incluyendo el Departamento de Física de la Universidad de Massachusetts, Lowell, el *Honors Program* en la Universidad de Massachusetts, Boston, y del Edgerton Center en el MIT. Por la oportunidad para enseñar con exploración, le agradezco a James Bales y el personal del Edgerton Center, MIT. Fiona Hughes–McDonnell renovó mi interés en enseñar con el péndulo y colaboró en la creación de las actividades de nuestro taller. Reconozco el estímulo para involucrar la historia de la ciencia en la enseñanza de: Peter Heering, Elahab Kheirandish, Ben Marsden, Zuraya Monroy–Nasr, Alythea McKinney, David Pantalony, Thomas Settle y Ryan Tweney. Discutí sobre enseñanza con James Bales, Fiona McDonnell, Lisa Schneider y Bonnie Tai. Agradezco a Zuraya Monroy–Nasr por animarme a preparar este ensayo. Alva Couch mantiene mi espíritu. Mi enseñanza exploratoria se inspira en Eleanor Duckworth y en la memoria de Philip Morrison. Dedicó este ensayo a mi padre, quien me inició en la observación de los péndulos.

Traducción: Zuraya Monroy Nasr

Referencias

- Bramhill, D., 2005, *Assignments and notebook for Honors 290F*, University of Massachusetts, Boston.
- Cavicchi, E., 1980, *Arethusa: A Fountain through Sculpture*, S. M. Vis. S. Tesis, Massachusetts Institute of Technology.
- , 1991, *Handwritten notes and lectures for Physics II*, University of Massachusetts, Lowell.
- , 1992, *Science from our Lives. Exercises and readings*, University of Lowell, Lowell.
- , 1997, "Watching Galileo's Learning", en *Explorations in College Algebra*, Linda Kime and Judy Clark, John Wiley, Nueva York.
- , 2005, *Transcripts, assignments and notes for Honors 290F*, University of Massachusetts, Boston.
- , 2007, *Mirrors, swinging weights, lightbulbs...: Simple experiments and history help a class become a community*, en P. Heering y D. Osewold (eds.), *Constructing Scientific Understanding through Contextual Teaching*, Frank & Timme, Berlin.
- , 2008, "Historical Experiments in Students' Hands: Unfragmenting Science through Action and History", *Science and Education*, 17(7), pp. 717-749.
- , 2008, "Opening Possibilities in Experimental Science and its History: Critical Explorations with Pendulums and Singing Tubes", *Interchange*, 39, pp. 415-442.
- , 2009, "Exploring Mirrors, Recreating Science and History, Becoming a Class Community", *New Educator* 5(3), pp. 249-2273. http://www1.cuny.cuny.edu/prospective/education/theneweducator/volume5_3.cfm
- , 2011, *Transcripts, assignments and notes for SP.713*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- , Chiu, S.-M., McDonnell, F., 2009, "Introductory Paper on Critical Explorations in Teaching Art, Science and Teacher Education" *New Educator* 5(3), pp. 189-204. http://www1.cuny.cuny.edu/prospective/education/theneweducator/volume5_3.cfm
- , 2010, "Activity inspired by Medieval Observers with Tubes", en C. Sigismondi (ed.), *Orbe Novus*, Universitalia, Rome, pp. 22-39. http://irsol.ch/costantino_sigismondi/OrbeNovus_volume2010.pdf
- , 2011, "Classroom Explorations: Pendulums, Mirrors and Galileo's Drama", *Interchange*, Vol. 42(1), pp. 21-50.
- , y Hughes-McDonnell, F., 2008, "Inkings of Science Arise in Watching Pendulums", National Science Teacher's Association Convention, Boston.

- Critical Explorers Inc., 2010, <http://www.criticalexplorers.org/>
- Cronan, J., 2005, *Assignments and notebook for Honors 290F*, University of Massachusetts, Boston.
- Di Stefano, R., 1996. The IUPP evaluation: What we were trying to learn and how we were trying to learn it. *American Journal of Physics*, 64, 49-57.
- Drake, S., 1978, *Galileo at work: his scientific biography*, University of Chicago Press, Chicago.
- , 1990. *Galileo, Pioneer Scientist*. Toronto: University of Toronto Press.
- , Duckworth, E., 2001, "Teaching/learning research", en E. Duckworth (ed.), "Tell me more": *Listening to learners explain*, Teacher's College Press, Nueva York.
- , 2006, "A Child's-Eye View of Knowing", en E. Duckworth (3a. ed.), "The having of wonderful ideas" and other essays on teaching and learning, Teacher's College Press, Nueva York. (Ensayo original publicado en 1968).
- , 2006a, "The having of wonderful ideas", en E. Duckworth (3a. ed.), "The having of wonderful ideas" and other essays on teaching and learning, Teacher's College Press, Nueva York. (Ensayo original publicado en 1973); 1988, "Como tener ideas maravillosas", *Cuando Surgen Ideas Maravillosas y Otros Ensayos Sobre la Enseñanza Aprendizaje*, Visor Distribuciones, Barcelona.
- , 2006b, "Learning with breadth and depth", en E. Duckworth (3a. ed.), "The having of wonderful ideas" and other essays on teaching and learning, Teacher's College Press, Nueva York. (Ensayo original publicado en 1979).
- , 2006c, "Teaching as research", en E. Duckworth (3a. ed.), "The having of wonderful ideas" and other essays on teaching and learning, Teacher's College Press, Nueva York. (Ensayo original publicado en 1987).
- , 2006d, "Twenty-four, forty-two and I love you: Keeping it complex", en E. Duckworth (3a. ed.), "The having of wonderful ideas" and other essays on teaching and learning, Teacher's College Press, Nueva York. (Ensayo original publicado en 1991).
- , 2005/2006e, "Critical exploration in the classroom", en E. Duckworth (3a. ed.), "The having of wonderful ideas" and other essays on teaching and learning, Teacher's College Press, Nueva York. (Ensayo original publicado en 2005, *New Educator*, 1(4), pp. 257-272).
- , 2009, "Helping Students Get to Where Ideas Can Find Them", *New Educator*, 5(3), pp. 185-188. http://www1.cuny.cuny.edu/prospective/education/theneweducator/volume5_3.cfm
- ESS (Elementary Science Study), 1970, *The ESS Reader*, Educational Development Center, Newton, MA.

- ESS 1969, "Teacher's guide for Pendulums: [a study unit]", Webster Division, McGraw-Hill, St. Louis.
- Galilei, G., 1632/1967, *Dialogue Concerning the Two World Systems*, S. Drake, trad., University of California Press, Berkeley.
- Galilei, G., 1638/1914, *Two New Sciences*, H. Crew, trad., Dover, Nueva York.
- Hawkins, D., 2002a, "Missing About in Science", en D. Hawkins (2d ed.), *The informed vision: Essays on learning and human nature*, Algora, Nueva York. (Ensayo original publicado en 1965).
- Hawkins, D., 2002, "I, Thou and It", en D. Hawkins (2d ed.), *The informed vision: Essays on learning and human nature*, Algora, New York. (Ensayo original publicado en 1969).
- Inhelder, B., Sinclair, H., y Bovet, M., 1974, *Learning and the development of cognition*, S. Wedgwood, trad., Harvard University Press, Cambridge.
- Inhelder, B. y Piaget, J., 1958, *The growth of logical thinking: From childhood to adolescence*, A. Parsons y S. Milgram, trads., Basic Books, New York. (Trabajo original publicado en 1955) <http://www.archive.org/details/growthoflogical007957mbp>
- Leonardo, 1974, en Bedini, S. y Reti L., "Horology", L. Reti, (ed.), *The Unknown Leonardo*, McGraw-Hill, Nueva York.
- Mathews, M. R., Gauld, C. F, y Stinner, A., 2005, *The Pendulum: Scientific, Historical, Philosophical & Educational Perspectives*, Springer, Dordrecht.
- McDonnell, F., 2009, "I wonder how this little seed can have so much potential": Critical exploration supports pre-service teachers' development as science researchers and teachers", *New Educator*, 5(3), pp. 205-228.
- Morrison, Philip y Phyllis, 1987, *The Ring of Truth*. Videos: Public Broadcasting Associates, Cambridge. Libro: Random House, Nueva York.
- Piaget, J., 1960, *The child's conception of the world*, J. y A. Tomlinson, trads., Littlefield, Adams, Totowa, Nueva Jersey. (Trabajo original publicado en 1926).
- Pierre, L., 2005, *Assignments and notebook for Honors 290F*, University of Massachusetts, Boston.
- Pitchel, S., 2005, *Assignments and notebook for Honors 290F*, University of Massachusetts, Boston.
- Pullen, D., 198x, *Physics Laboratory Experiments I and II*, University of Lowell, Lowell.
- Oresme, N., 1968, *Le livre du ciel et du monde*, A. Menut y A. Demyon (eds.), A. Menut, trad.. University of Wisconsin Pr., Madison.
- Settle, T., 1996, *Galileo's Experimental Research*, Max Planck Institute for History of Science, Berlin.
- Tsui, A., 2005, *Assignments and notebook for Honors 290F*, University of Massachusetts Boston.
- Tusi, P., 2005, *Assignments and notebook for Honors 290F*, University of Massachusetts Boston.

Capítulo 3

Helmholtz y sus resonadores: ¿un "péndulo" histórico para la enseñanza de la psicología científica?

Zuraya Monroy Nasr

Facultad de Psicología, UNAM

La propuesta paradigmática de un instrumento científico como el péndulo, que se ha desarrollado en el *International Pendulum Project*, ha mostrado cómo un tema o un caso en la historia de una disciplina, permite innovar en su enseñanza. Cuando conocí esta propuesta, me interesé por buscar un caso o instrumento en psicología para construir una forma diferente (y con mayor efectividad) de enseñar historia y filosofía de la psicología científica. Cabe señalar, además, que una de mis preocupaciones centrales ha sido, también, la de eludir aproximaciones acumulativistas y mostrar la discontinuidad en la historia de nuestra disciplina.

Con el propósito de ampliar la comprensión histórica y filosófica de la psicología, para contribuir a su enseñanza como ciencia, en este trabajo tomo como caso paradigmático una parte de la investigación de Helmholtz sobre el sonido. Los instrumentos científicos históricos que fueron fundamentales para este desarrollo son los resonadores. En el desarrollo de su