

¿Por qué enseñar ciencia a través de la indagación? Un caso en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM)

Leandro Chernicoff y Elia Echeverría*

ABSTRACT (Why teach science through inquiry? A case at the Autonomous University of Mexico City (UACM))

In this article we make description of the difficulties encountered teaching Physics at the Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM, Autonomous University of Mexico City) and the way in which choosing guided inquiry as a didactic method has been a fundamental ingredient in solving them. By presenting the problem and our proposed solution within a clear and explicit framework a contribution is pretended in outlining some conditions in which inquiry (guided inquiry in particular) can be a relevant tool, supported by clear argumentation, for the teaching-learning process. The basic hypothesis behind Physics Education Research (PER), is that we can address the problem of teaching in a scientific way. In this article this hypothesis has been used so that, when such a problem is well defined within a particular context, choosing guided inquiry as a possible solution is not a whim or an arbitrary choice but rather the result of rationally evaluating the constrictions presented by the problem and finding a solution that addresses them consistently (though it may not be the only one). A conclusion is attained with a brief outline of some of the results obtained through implementing this didactic method, as well as that of our perspectives for further work in the field.

KEYWORDS: guided inquiry, physics education, operative or functional knowledge and critical thinking skills

Introducción

¿Por qué enseñar ciencia a través de indagación? Ésta es una pregunta que la comunidad de investigadores en enseñanza de la ciencia llevan haciéndose desde hace tiempo y que puede responderse de muchas maneras y desde diversos ámbitos como la teorías del aprendizaje o la investigación en enseñanza. Sin embargo, como profesores de Física, llegamos a una respuesta al intentar solucionar un problema específico de enseñanza de esta ciencia en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) frente al cual propusimos la *indagación guiada* como solución.

Entendemos que la argumentación sobre la importancia o viabilidad de la elección de la indagación como método didáctico puede darse desde un ámbito más general y teórico (propio de los pedagogos o epistemólogos), pero reiteramos que como profesores de Física nuestra aproximación para dar una respuesta a la pregunta planteada es más empírica, práctica e inductiva.

El artículo está estructurado en cuatro secciones. En la primera describimos el problema al que nos enfrentamos y

cómo lo planteamos. En la segunda presentamos la solución que propusimos, dos cursos llamados “Introducción a la Física” (IF1 e IF2), introduciendo un esquema de trabajo para aclarar los elementos que consideramos para diseñar e implementar dichos cursos, así como para justificar la elección pedagógica que hicimos (la *indagación guiada*). En la tercera mostramos algunos resultados que hemos obtenido al implementar los cursos y perspectivas de trabajo a futuro. En la última sección presentamos las conclusiones a las que llegamos en relación a la elección de la *indagación guiada* como solución al problema de enseñanza al que nos enfrentamos.

1. Descripción del problema

1.1 El contexto de la UACM y la problemática en torno a la enseñanza de la Física

La UACM es una universidad pública, fundada en abril de 2001 con la intención de proveer una oportunidad adicional de educación superior a los sectores más marginados de la Ciudad de México y, simultáneamente, contribuir a resolver algunos de los problemas específicos de la urbe. Buscando ser consistentes con estas dos premisas, el acceso a la universidad es irrestricto (con la salvedad de haber terminado el bachillerato y de las condiciones de cupo que se resuelven por sorteo) y las carreras que se ofrecen están relacionadas con las necesidades propias de la ciudad.

* Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Colegio de Ciencia y Tecnología, Academia de Física.

Correos electrónicos: leandro.chernicoff@uacm.edu.mx y elia.echeverria@uacm.edu.mx

Dadas las condiciones de ingreso de los estudiantes, la mayoría de ellos se incorpora al llamado "Programa de Integración" (PI) y después cursa un ciclo básico adecuado a su carrera. Uno de los propósitos principales del PI, que puede durar de uno a dos semestres, es el de subsanar las deficiencias que tengan los estudiantes tanto en aspectos generales y comunes a cualquier área de estudio (como podría ser la comprensión de textos) como en materias específicas correspondientes a la carrera en la que quieren entrar, en nuestro caso específico a las ingenierías.

Con base en evaluaciones diagnósticas, en el desempeño de los estudiantes en el PI y las materias de los primeros semestres y en reportes de los propios profesores, hemos observado que la mayoría de los estudiantes llegan a la UACM con dificultades tales como la falta de disciplina, organización y hábitos para el estudio, deficiencias en lectura, en expresión oral y escrita, incapacidad para formalizar simbólicamente, etc. En particular, notamos que tienen un vacío o confusión en conceptos básicos y en las herramientas metodológicas propias de las ciencias, al igual que otros estudiantes que ingresan a la universidad tanto en condiciones normales como de rezago en otras partes del mundo (McDermott, 1983). Lo anterior tiende a contribuir al fracaso de los estudiantes en el aprovechamiento de los cursos del ciclo básico (inclusive después de haber llevado el PI), lo cual se ve reflejado en el alto índice de abandono y en el bajo número de estudiantes que aprueban los cursos. A ello debemos agregar que los profesores, al tratar de sanear las carencias, terminan por no cubrir los programas correspondientes.

Específicamente, a finales del año 2003, dos años después de la fundación de la UACM, los resultados de los cursos básicos de Física (Mecánica I y II, Electricidad y Magnetismo, Termodinámica,) que se impartían después del PI para los estudiantes de Ingeniería eran alarmantes. La asistencia promedio en los cursos era del 30%, sólo 5% de los estudiantes que se inscribían a un curso lo aprobaban, y había un 75% de deserción. Los programas no se terminaban, la autoestima de los estudiantes estaba por los suelos y los profesores y las autoridades institucionales estaban muy preocupados.

1.2 Planteamiento del problema y objetivos

En un intento por resolver la problemática que acabamos de mencionar, algunos profesores de la UACM nos dimos a la tarea de desarrollar dos cursos que llamamos "Introducción a la Física" (IF). Estos cursos se incorporaron en el PI para las ingenierías y en el primer semestre de la carrera de Promoción de la Salud, buscando solventar deficiencias que observamos en nuestros estudiantes que impedían el ingreso al ciclo básico correspondiente (los primeros semestres de cada carrera) con posibilidades de éxito. Cabe señalar que, aunque ambos cursos llevan el mismo nombre, no son el mismo. Comparten la misma propuesta pedagógica y metodológica (a saber, la *indagación guiada*), pero difieren parcialmente en sus contenidos y propósitos específicos.

En esta sección planteamos y enmarcamos el problema

que tratamos de resolver. Para ello, presentamos primero lo que identificamos como *la situación en la que estábamos y el por qué* (el problema y sus causas), y luego lo que consideramos como *la situación a la que queríamos llegar* (los objetivos). De esta forma, una vez que las causas han sido discutidas, presentamos la dirección específica que tomamos (i.e., nuestra postura ante el problema) para luego vincularla con la meta (los objetivos).

1.2.1 El problema y las preguntas que nos hicimos para resolverlo

Para delimitar el problema empezamos por preguntarnos:

1. ¿A qué se debe el fracaso de nuestros estudiantes en los cursos de Física? ¿Será posible ayudarlos?

Considerando la posibilidad de dar un curso introductorio para intentar ayudarlos:

2. ¿Qué es lo que necesitan? ¿Cuáles consideramos que son los aspectos relevantes de la Física que queremos enseñar? ¿Por qué son relevantes para los estudiantes? ¿Qué esperamos que sepan y sean capaces de hacer nuestros estudiantes al terminar el curso?

Y por último,

3. ¿Cómo vamos a hacer esto?

Posiblemente las respuestas a estas preguntas son tantas como el número de personas que las quieran contestar y, de hecho, sabemos que son motivo de trabajo y debate en el campo de la enseñanza de la ciencia (Galagovsky, 2007).

1.2.2 Un esquema donde enmarcar el problema

Para enmarcar y aclarar el problema, adoptamos la formulación esquemática del problema de la enseñanza que sugiere Reif (1994). Esta formulación nos permitirá, por un lado, presentar el problema de forma simple y clara y, por el otro, expresar algunos aspectos importantes de nuestra postura ante la enseñanza en general y de la Física en particular. Además, nos dará la oportunidad de hacer una breve reflexión acerca de la noción de fracaso. Con esta formulación podremos incorporar la mayoría de los aspectos que nos parecieron relevantes para enfrentar el problema; sin embargo, hay un ingrediente fundamental del problema de la enseñanza que consideramos queda fuera de esta representación esquemática y que discutiremos más adelante.

En términos generales Reif describe la enseñanza como un problema que requiere la transformación de un sistema E (llamado el estudiante) de un estado inicial E_i a un estado final E_f en donde E puede hacer cosas que no podía hacer inicialmente. Este proceso se puede expresar esquemáticamente en la forma:

$$E_i \longrightarrow E_f$$

Aunque ésta puede parecer una forma fría de presentar el problema de la enseñanza, ciertamente no es deshumanizante.

Al contrario, en vez de tratar primariamente con los temas curriculares, centra la atención en el ser humano intentando lidiar con la Física. Esta formulación del problema de la enseñanza hace evidente que una aproximación sistemática al problema debe permitir la reflexión sobre los siguientes puntos (Reif, 1994):

1. **El estado final al que se desea llegar (E_f).** Se debe tener claridad sobre *qué es lo que el estudiante debe saber y ser capaz de hacer después de la intervención docente*; es decir, se deben especificar las habilidades y desempeño observables finales deseados para el estudiante, o dicho de otra manera, los propósitos de la intervención docente. Además, a un nivel más teórico, se deben entender los mecanismos cognitivos subyacentes (conocimientos y procesos de pensamiento) requeridos para lograr estas habilidades.
2. **El estado inicial del estudiante (E_i).** Previo a la instrucción, se debe poder identificar *qué saben y cómo piensan* los estudiantes.
3. **La intervención docente (el proceso de transformación \rightarrow).** Por un lado, este punto nos invita a repensar y evaluar los métodos de enseñanza imperantes; por ejemplo, preguntándonos si éstos permiten el desarrollo explícito de las habilidades de pensamiento¹ necesarias para la comprensión de un tema dado o no. Por otro, este punto marca que debe diseñarse un proceso de aprendizaje a través del cual el estudiante pueda desarrollar los conocimientos y habilidades de pensamiento requeridos para alcanzar el estado final deseado. Por último, se deben implementar y poner en práctica estos diseños.

Con base en lo anterior, la noción de “fracaso” no es autoevidente, sino que depende fuertemente de cuáles son los propósitos (E_f). La definición de estos propósitos permite evaluar el éxito de una intervención docente si ésta logra o no que los estudiantes alcancen el E_f planteado habiendo iniciado en E_i .

Notemos entonces que cuando nos preguntamos a qué se debe el fracaso de nuestros estudiantes en los cursos de Física, estamos haciendo en realidad una pregunta cargada. Por ejemplo, la noción de “fracaso” que utilizamos al inicio del artículo, cuando mencionamos que a finales del año 2003 los resultados de los primeros cursos de Física general que se impartían para los estudiantes de Ingeniería en la UACM eran alarmantes. Sin embargo, no se cuenta comúnmente con una estrategia de evaluación que realmente permita evaluar la comprensión real que tienen los estudiantes de los conceptos. En cambio, los profesores solemos enfocarnos en una operativización que permita alcanzar una calificación numérica, como propone McDermott en el siguiente extracto:

¹ Lo que entendemos por habilidades de pensamiento se explica más adelante.

En la instrucción de la Física introductoria, el criterio más común que se usa para evaluar el dominio del tema es el del desempeño presentado en la resolución de problemas cuantitativos estándar. Como se evidencia de las calificaciones finales [...] muchos de los estudiantes que logran completar el curso tienen la capacidad de resolver dichos problemas satisfactoriamente. Sin embargo, en general dependen de fórmulas memorizadas y no desarrollan un entendimiento funcional de la Física; es decir, no desarrollan la habilidad de razonamiento necesaria para aplicar los conceptos y principios físicos adecuados a situaciones nunca antes vistas. (McDermott, 1993)

Si tomamos por E_f que el estudiante pueda resolver problemas que antes no podía resolver, la noción de fracaso se reduce a lo anterior. Pero si ahora consideramos un nuevo E_f^N en donde el estudiante sea capaz de aplicar los conceptos y principios físicos adecuados a situaciones nunca antes vistas, entonces la noción de fracaso es muy distinta y también sus posibles causas.

En resumen, para identificar las causas del fracaso hay que definir fracaso, y para definir fracaso se tienen que establecer los propósitos contra los cuales contrastar para evaluar si hay éxito o fracaso.

1.2.3 El primer conjunto de preguntas: las causas

Después de la breve discusión que acabamos de hacer, podemos regresar a nuestro primer par de preguntas —“¿A qué se debe el fracaso de nuestros estudiantes en los cursos de Física?, ¿Será posible ayudarlos?”— para tratar de contestarlas.

Es claro ahora que la primera pregunta requiere pensar en los propósitos. Adelantándonos un poco, vale la pena mencionar aquí que uno de los propósitos centrales de nuestros cursos es *el desarrollo de habilidades de razonamiento y pensamiento científico*. Tener esto presente nos llevó a rastrear e indagar otras posibles causas del fracaso.

Para poder contestar la segunda pregunta, necesitamos identificar primero las causas y luego ver si éstas son “atacables”. Las posibles causas son muchas y muy variadas. Con base en la reflexión previa, nuestra elección fue rescatar, por un lado, las causas identificadas por los profesores de la universidad (que podían contribuir con los matices específicos de los estudiantes de la UACM y que tenían un sentido de fracaso más tradicional) y por el otro, las causas identificadas como resultado de las investigaciones en enseñanza de la Física y la didáctica de la ciencia en general. Identificamos entonces como las posibles causas del fracaso las siguientes:

1. **Falta de hábitos y disciplina de trabajo y estudio.** En general nuestros estudiantes provienen de entornos de alta marginación social y educativa, en donde estos hábitos no fueron fomentados ni en la escuela ni en la casa.
2. **Dificultades de lecto-escritura.** Los resultados obtenidos en las evaluaciones diagnósticas aplicadas a los cerca de 3000 estudiantes que ingresaron a la UACM el año pasado,

sugieren que más del 60% de ellos requieren cursar un taller para subsanar y desarrollar su comprensión de textos, su gramática y su redacción. Por otro lado, en distintos semestres hemos encontrado preguntando a estudiantes de los primeros cursos de Ingeniería y Promoción de Salud que cerca del 90% ha leído menos de cinco novelas a lo largo de su vida. Muchos profesores apoyan sus clases con lecturas (por ejemplo del libro de texto) suponiendo que los estudiantes entienden lo que leen, lo cual parece no ser necesariamente cierto.

3. **Falta de conocimientos previos.** Los estudiantes no cuentan con los conocimientos previos necesarios para afrontar los cursos. Por ejemplo, las unidades de medida de cantidades Físicas les son irrelevantes, no saben despejar, sumar vectores, graficar una función cuadrática, etc.
4. **El conocimiento que tienen es declarativo.** Aun los estudiantes que parecen tener algún conocimiento, que sacan buenas calificaciones y que son capaces de resolver los “problemas del final del capítulo”, muestran una confusión significativa en torno a conceptos básicos. En sus análisis siguen prevaleciendo nociones intuitivas, presentan habilidades pobres para resolver problemas (salvo los que han aprendido a mecanizar) y una gran incapacidad para aplicar “lo aprendido” en un contexto ligeramente diferente. Todos éstos son síntomas de que el conocimiento que han desarrollado es declarativo (o nominal o figurativo) y no operativo (o funcional o de procedimiento). Éste es uno de los ejes fundamentales de nuestro trabajo, así que consideramos que vale la pena definir claramente lo que entendemos por conocimiento declarativo y operativo. En este sentido asumimos la postura que propone Arnold Arons (1997):

El conocimiento declarativo consiste en conocer “hechos”; por ejemplo, que la luna brilla por reflejar la luz del Sol, que la Tierra y los planetas giran alrededor del sol, que la materia está compuesta por átomos y moléculas discretos, que los animales inhalan oxígeno y exhalan bióxido de carbono. Por otra parte, el conocimiento operativo implica comprender el origen de dicho conocimiento declarativo: ¿Cómo sabemos que la luna brilla por reflejar la luz del Sol? ¿Por qué creemos que la tierra y los planetas giran alrededor del Sol cuando las apariencias sugieren que todo gira alrededor de la Tierra? [...], así como la capacidad de usar, aplicar, transformar o reconocer la relevancia del conocimiento declarativo en situaciones nuevas o no conocidas.

A fin de desarrollar una comprensión auténtica de los conceptos y teorías que subyacen al conocimiento operativo, el estudiante universitario [...] debe llevar a cabo una actividad mental deductiva e inductiva junto con la interpretación de la observación y experiencia personales. Desafortunadamente, en muy pocas ocasiones se induce esta

actividad en los estudiantes pasivos, pero puede alimentarse, cultivarse y profundizarse en la mayoría de los estudiantes, siempre y cuando se arraigue en la experiencia y no se desarrolle en forma demasiado rápida, y siempre y cuando la mente del que aprende participe activamente”. (Arons, 1997).

5. **Limitaciones en el desarrollo cognitivo.** Los cursos de Física que se imparten a nivel medio superior y superior requieren de manera implícita las capacidades o pautas de razonamiento lógico abstracto, características del período formal (en términos piagetianos (Delval, 1983)). Sin embargo, al menos en Estados Unidos, sólo un tercio de los estudiantes en un curso promedio cuentan con estas habilidades de pensamiento, los dos tercios restantes se encuentran en el período concreto o haciendo la transición (Arons, 1997). Estas habilidades de pensamiento, aunque indispensables, no se desarrollan de forma explícita en los cursos universitarios, de manera que si el estudiante no llega a la universidad con ellas no encontrará un espacio en dónde cultivarlas.²
6. **No se han desarrollado las habilidades de pensamiento crítico necesarias.** El análisis y la investigación, así como el quehacer científico en general, requieren de un conjunto de procesos de pensamiento y razonamiento que los subyacen. Si éstos no están presentes (o no se han desarrollado) el estudiante no contará con las habilidades de pensamiento necesarias para poder entender un contenido dado. ¿Cuáles son estas habilidades de pensamiento? La siguiente lista (tomada de Arons, 1997) intenta ser ilustrativa y no exhaustiva ni prescriptiva. Estas habilidades que se presentan no son exclusivas de la Física, o para el caso de las ciencias exactas; sin embargo, sí son indispensables para el quehacer científico serio. Es probable que se considere necesario agregar algunas otras o profundizar en algunas de ellas dependiendo de la cada disciplina.
 - a. Hacerse conscientemente las preguntas: “¿Qué sabemos...? ¿Cómo sabemos que...? ¿Por qué aceptamos o creemos...? ¿Cuál es la evidencia de...?” cuando estudiamos un material o nos enfocamos en un problema.
 - b. Estar consciente, clara y explícitamente, de las lagunas en la información existente. Reconocer cuando se ha llegado a una conclusión o se ha tomado una decisión a falta de información completa y ser capaz de tolerar la ambigüedad e incertidumbre temporales. Reconocer cuándo es que uno toma algo por fe y sin haber examinado las preguntas “¿Cómo sabemos que...? y ¿Por qué creemos en...?”

² Ésta es una observación pertinente al currículo de los cursos tradicionales, donde sólo se habla de contenidos. Como se verá más adelante, parte de nuestra propuesta apunta a cambiar esta situación.

- c. Discriminar entre observación e inferencia, entre el hecho establecido y la conjetura posterior.
- d. Reconocer que las palabras son símbolos para las ideas y no las ideas mismas. Reconocer la necesidad de emplear sólo palabras que se han definido anteriormente, enraizadas en la experiencia compartida, al formar una nueva definición y evitar ser engañado por la jerga técnica.
- e. Examinar las suposiciones (en especial las suposiciones implícitas y no expresadas) detrás de una línea de razonamiento.
- f. Realizar inferencias a partir de los datos, observaciones u otra evidencia y reconocer los casos en los que no es posible efectuar inferencias firmes. Esto implica una serie de procesos, como el razonamiento silogístico elemental (p.ej. manejar declaraciones propositivas básicas del tipo “si...entonces...”), el razonamiento relacional, reconocer cuando las variables relevantes se han controlado o no.
- g. Llevar a cabo un razonamiento hipotético-deductivo, es decir, dada una cierta situación, aplicar el conocimiento relevante de los principios y limitaciones y visualizar, en forma abstracta, los posibles resultados que podrían presentarse como consecuencia de diferentes cambios que uno puede imaginar se aplicarán al sistema.
- h. Discriminar entre el razonamiento inductivo y el deductivo, es decir, estar consciente del momento en que se plantea un argumento de lo particular a lo general o de lo general a lo particular.
- i. Verificar la consistencia interna de las líneas de razonamiento y las conclusiones a las que se han llegado y desarrollar así una confianza en las capacidades intelectuales propias.
- j. Desarrollar autoconciencia respecto a los procesos de razonamiento y pensamiento propios.

Vale la pena notar que aunque estas habilidades suponen el desarrollo del pensamiento formal, el período formal no implica necesariamente el desarrollo completo de estas habilidades. Por ejemplo, un estudiante que se encuentra en el período formal no necesariamente tiene autoconciencia respecto a los procesos de razonamiento y pensamiento propios, aunque tenerla es una pauta de que se encuentra en el período formal.

En la lista de causas que acabamos de revisar, los primeros tres puntos fueron aportados por los profesores de la UACM y son más descriptivos del contexto específico; los tres restantes emanan de la Investigación en la Enseñanza de la Física (PER) y son más generales.³ Quisiéramos recalcar que si no hubiera-

³ Una de las hipótesis de trabajo que nos parece más importante detrás de la PER (Physics Education Research) es que hay algunas dificul-

mos explicitado los propósitos de carácter cognitivo, no hubiéramos indagado en causas cognitivas. Lo anterior ejemplifica cómo lo que se busca (y evalúa) está fuertemente condicionado por el marco conceptual desde donde se es buscado.

Éstos son los elementos principales que consideramos como causas del fracaso de los estudiantes (no pensamos que sean las únicas, pero es sobre la base de éstas que abordamos el problema). Sin embargo, aquí aparece un punto delicado: en la lista anterior no se presentan causas en sí mismas, sino más bien se hace una descripción de hechos. Que un estudiante presente dificultades en la lecto-escritura no es una causa de fracaso en sí, es sólo una causa de fracaso en el contexto de los objetivos de un curso dado. Siendo más precisos, lo que estamos diciendo es que la causa principal del fracaso de los estudiantes es la falta de correspondencia, la brecha, entre los cursos a los que se les somete (con sus objetivos) y la realidad de los mismos (los estudiantes).

Resumiendo, en términos del esquema $E_i \rightarrow E_f$, nuestra hipótesis de trabajo es que el fracaso de los estudiantes se debe a que el diseño curricular universitario supone a un estudiante en un estado inicial E_i y, sin embargo, la mayoría de los estudiantes se encuentra en realidad en un estado inicial E_i^R muy distinto a E_i . Esto genera una falta de correspondencia (o desajuste) entre lo que queremos enseñar (\rightarrow), y la situación inicial de los estudiantes a los que se los queremos enseñar (E_i^R), de manera que el objetivo (E_f) no se logra. Esta falta de correspondencia tiene implicaciones muy serias entre las que destaca el no tener la oportunidad de desarrollar los hábitos de pensamiento crítico y por tanto fomentar en los estudiantes la conclusión errónea de que el conocimiento consiste en afirmaciones memorizadas, terminología técnica esotérica y la regurgitación de los “hechos” que se recibieron (Arons, 1997).

1.2.4 Nuestra postura específica ante el problema y sus causas

Para nuestro trabajo, los aspectos más relevantes de la falta de correspondencia son: a) la brecha entre las habilidades intelectuales necesarias para afrontar los cursos de Física introductoria a nivel licenciatura y las habilidades intelectuales con las que cuentan los estudiantes que entran a estos cursos (por lo menos en la UACM), y b) el tipo de conocimientos de Física que tienen los estudiantes al entrar a los cursos; a saber, declarativo. Esto es, preponderamos jerárquicamente los últimos tres puntos de la lista de causas.

Hasta ahora, y un poco a propósito, hemos omitido un elemento causal muy relevante: el rol del profesor como una de

tades para el aprendizaje que se repiten o que muestran cierta regularidad. Lo anterior permite diseñar estrategias de aprendizaje que busquen resolverlas. Las dificultades que se presentan en este contexto y que son sujetas a investigación son cognitivas y en general se presentan de dos formas: 1) como preconcepciones y 2) como carencias en habilidades de pensamiento. Coincidimos en que buena parte del quehacer en este campo está relacionado con investigar las dificultades de los estudiantes (McDermott, 1999).

las causas importantes a tomar en cuenta para entender el fracaso de los estudiantes (curiosamente, a muchos profesores no les es tan difícil compartir el crédito por el éxito de los estudiantes). Debemos señalar que en nuestra experiencia de trabajo, este elemento fue algo que nos tomó bastante tiempo identificar y que requirió del señalamiento puntual por parte de una mirada externa, pues tiende a ser un “punto ciego” del quehacer docente, una de esas suposiciones tácitas que hasta que no se explicitan son una fuente de dificultad recurrente. La siguiente reflexión de McDermott (1993) acerca de cómo enseñamos nos permite hacer énfasis en el punto:

La instrucción de la Física introductoria se ha basado tradicionalmente en el punto de vista del instructor acerca del tema y en la percepción que el instructor tiene del estudiante. La mayor parte de los maestros de Física ávidamente desean transmitir a sus estudiantes tanto su conocimiento como su entusiasmo. Desean que sus estudiantes adquieran no sólo información específica y habilidades, sino que también logren apreciar la belleza y el poder que los físicos encuentran en la Física. Habiendo obtenido entendimientos profundos particulares después [...] de] años de esfuerzo intelectual, quieren compartir su conocimiento. Para evitarle a los estudiantes [...] esta lucha, los instructores comúnmente enseñan [...] de lo general a lo particular. Las generalizaciones suelen plantearse plenamente desde el comienzo cuando se presentan. Los estudiantes, por lo tanto, no se involucran activamente en el proceso de abstracción y generalización. Se emplea muy poco pensamiento inductivo; el razonamiento es casi todo deductivo. Los instructores desean que, presentando principios generales y enseñando cómo aplicarlos a ejemplos específicos, los estudiantes sean capaces de hacer lo mismo en situaciones novedosas.

Al hacer un recuento de la inspiración que les brindó su propia experiencia en Física introductoria, muchos instructores tienden a pensar en sus estudiantes como si fuesen versiones más jóvenes de sí mismos. [...] tal descripción sólo es acorde con una reducida minoría. Típicamente, en Estados Unidos, sólo uno de cada 30 estudiantes que cursan Física introductoria obtienen un grado en el área. El problema con la aproximación tradicional es que ignora la posibilidad de que la percepción que tienen los estudiantes difiera mucho de la que tiene el instructor. Quizá la mayoría de los estudiantes no están preparados para poder aprender Física de la manera en que comúnmente se enseña (McDermott, 1993).

De esta forma, si queremos ayudar a nuestros estudiantes, también tenemos que considerar la formación docente como parte del problema.

Incorporando *el factor profesor*, podemos concluir identificando tres **causas centrales** de nuestro problema: la falta de correspondencia entre: 1) **las capacidades cognitivas de los estudiantes** (habilidades de pensamiento y razonamiento y el

tipo de conocimientos que tienen, a saber, declarativo), 2) **los hábitos** (de trabajo, estudio y lecto-escritura), y **los cursos a los que se los somete**, y 3) **las dificultades de la intervención docente**.

Una vez que hemos identificado las causas, la respuesta a la pregunta “¿será posible ayudarlos?”, parece ser afirmativa: diseñar cursos que se correspondan con la realidad de los estudiantes, de manera que, poco a poco, se acorte la brecha entre E_i^R y E_i . En estos cursos procurar que los estudiantes desarrollen hábitos de trabajo y que practiquen la lectura y expresión escrita. Por último, no olvidar que el profesor es un ingrediente importante del curso, por lo que se debe ofrecer un espacio para el trabajo y la reflexión docente. Ésta es la motivación detrás de los cursos de IF. Es claro que un conjunto de cursos aislados no resuelven, por sí solos, la brecha que hemos mencionado. Pero, por lo pronto, este trabajo ha contribuido a cuestionar las preconcepciones que teníamos sobre los estudiantes de la UACM, a indagar sobre su situación “real”, a diseñar actividades de aprendizaje que se ajustan un poco más a su realidad y a considerarnos (los profesores) como parcialmente responsables del fracaso (o éxito) de los estudiantes.

1.2.5 El segundo conjunto de preguntas: Los objetivos

Para terminar de contextualizar el curso que propusimos, retomemos el segundo conjunto de preguntas que nos planteamos al inicio, “¿qué es lo que necesitan los estudiantes? ¿Cuáles consideramos que son los aspectos relevantes de la Física que queremos enseñar? ¿Por qué son relevantes para ellos? ¿Qué esperamos que sepan y sean capaces de hacer nuestros estudiantes al terminar el curso?”

Estas preguntas tienen que ver con los objetivos generales y específicos de los cursos y su relación con diferentes contextos, algunos más acotados y otros más generales.

En particular, para tratar de resolver algunos de los aspectos de la problemática mencionada, el propósito de las materias de IF propuestas fue que los estudiantes adquirieran contacto directo con el proceso de pensamiento científico a través del estudio de sistemas físicos y que desarrollaran a partir de su experiencia:

1. Una concepción vivencial de la ciencia,
2. La construcción de algunos conceptos físicos básicos tales como masa, volumen, densidad, corriente, resistencia, velocidad media, velocidad instantánea, aceleración, sistema, interacción, variable, etc.,
3. Definir estos conceptos operacionalmente,
4. Reconocer regularidades y patrones,
5. Utilizar el método de control de variables,
6. El uso y la interpretación de diferentes formas de representación científica (representaciones gráficas y algebraicas),
7. La construcción de modelos explicativos con capacidad predictiva, y
8. El diseño y registro de experiencias de indagación y explicación de fenómenos simples.

Todo esto poniendo énfasis en el desarrollo explícito de algunas habilidades de pensamiento crítico que subyacen a las metodologías y contenidos mencionados. En particular, en esta primera aproximación, se destacan el pensamiento hipotético deductivo, la distinción entre observación e inferencia, y la incorporación de las preguntas: “¿Qué sabemos...? ¿Cómo sabemos que...? ¿Por qué aceptamos o creemos...? ¿Cuál es la evidencia de...?” como parte fundamental de la reflexión del estudiante.

En concreto, ¿cuál es el E_f de estos cursos? ¿Qué esperamos que sepan y sean capaces de hacer los estudiantes después de la intervención docente?

En términos de hábitos, esperamos que mejoren las competencias de lecto-escritura y que se incrementen las capacidades de trabajo y estudio. En términos de contenidos, esperamos que se cultive un entendimiento operativo de los conceptos y las metodologías antes mencionadas. Por último, en términos de habilidades de pensamiento crítico, se espera observar una ligera mejoría en algunas de las habilidades que se mencionaron previamente, acompañada de algún cambio en el estado de desarrollo del razonamiento lógico abstracto.

Respecto al esquema $E_i \rightarrow E_f$, hemos discutido el principio y el final, dónde se estaba y hacia dónde se deseaba ir. En la próxima sección se discutirá y justificará la solución que propusimos a nuestra problemática; es decir, la propuesta específica de intervención docente (\rightarrow).

2. La propuesta de solución

Como ya se mencionó, la solución a nuestra problemática se concretó en los cursos de IF. Se inicia esta sección con un breve recuento de estos cursos, aclarando las diferencias en los objetivos específicos de cada uno. Después, se presenta un esquema que sintetiza la aproximación de trabajo empleada; dicha representación esquemática permitirá delinear claramente los elementos relevantes de ambos cursos, así como el proceso de diseño, implementación y evaluación. Pensamos que haciendo uso de este esquema la justificación del uso de la *indagación guiada* como herramienta didáctica se vuelve clara y significativa.

2.1 Los cursos de “Introducción a la Física”

Como se mencionó al inicio del artículo, se implementaron dos cursos llamados “Introducción a la Física” en el Programa de Integración para las Ingenierías y en el primer semestre a la carrera de Promoción de la Salud. Para distinguirlos más fácilmente, al primero lo llamaremos IF-1 y al segundo IF-2.

2.1.1 El curso de IF-1

El propósito del curso de IF-1 era contribuir a que los estudiantes de Ingeniería llegaran a sus cursos de Mecánica con más herramientas (conceptuales, metodológicas y de razonamiento lógico abstracto) de las que tenían. Cómo ya lo dijimos, lo que se buscaba era acortar la brecha entre donde realmente estaban nuestros estudiantes y los requerimientos mínimos indispensables para tener éxito en un curso de Física

a nivel universitario. Para esto se diseñó un curso que empezara en donde se encontraban los estudiantes al llegar a la universidad y que concluyera trabajando las nociones básicas de cinemática (las cuales tienden a ser uno de los obstáculos más grandes para los estudiantes al entrar al curso de Mecánica I para ingenieros). Este curso estaría acompañado del trabajo en Matemáticas, que ya se hacía en el PI.⁴ El reto fue elegir contenidos relevantes de la Física que se presentaran en forma rigurosa y, al mismo tiempo, a un nivel adecuado para nuestros estudiantes. Lo primero que hicimos fue apoyarnos en trabajos relacionados con nuestra problemática reportados en la literatura y, de manera muy particular, en el trabajo desarrollado por el Grupo de Enseñanza de la Física de la Universidad de Washington.

Los primeros materiales que desarrolló el Physics Education Group (PEG) de la Universidad de Washington en Seattle, EUA fueron los textos de *Physics by Inquiry* (McDermott/PEG, 1996) que fueron específicamente diseñados para ayudar a los estudiantes con dificultades a tener éxito en las carreras científicas. Dichos materiales fueron concebidos y elaborados desde la perspectiva constructivista para desarrollar, de manera explícita, habilidades de razonamiento científico a la par de otras destrezas necesarias. En ellos se plantean situaciones adecuadas para practicar la asociación de conceptos científicos, representaciones y modelos, con fenómenos del mundo real.

Debido a su eficacia, profundidad y compatibilidad con nuestra problemática, decidimos basar el curso en el de ellos. Los contenidos fueron seleccionados, adaptados y elaborados en actividades de aprendizaje que se constituyeron en cuadernos de trabajo. El criterio para seleccionarlos fue empezar en el punto en donde considerábamos que verdaderamente estaban los estudiantes —no donde nos hubiera gustado que estuvieran— y terminar con elementos de cinemática a la par que se desarrollan algunas habilidades de pensamiento que considerábamos importantes.

Los contenidos del curso están organizados en tres Unidades de trabajo: Propiedades de la Materia, Circuitos eléctricos y Cinemática.

En la primera unidad se introducen algunos de los elementos nodales de nuestra propuesta en términos metodológicos —el método de control de variables, las definiciones operacionales y el razonamiento proporcional— y de habilidades de pensamiento, promoviendo principalmente el pensamiento hipotético deductivo, la distinción entre observación e inferencia, y constantemente se cuestiona al estudiante con las preguntas: “¿Qué sabemos...? ¿Cómo sabemos que...? ¿Por qué aceptamos o creemos...? ¿Cuál es la evidencia de...?”.

En la segunda unidad los estudiantes utilizan tanto el razonamiento deductivo como inductivo para desarrollar un

⁴En el PI de la UACM se imparten tradicionalmente tres talleres: Taller de Matemáticas, Taller de Expresión oral y escrita, y Taller de Identidad, conocimiento y aprendizaje.

modelo basado en sus propias observaciones, que pueden usar para predecir y explicar el comportamiento de focos en circuitos colocados en diferentes configuraciones. Además, a través de esta experiencia atisban la naturaleza de un modelo científico: qué es, cómo puede construirse, cómo puede usarse y cuáles son sus limitaciones.

En la última unidad se estudia cómo describir el movimiento en una dimensión en términos de los conceptos de posición, desplazamiento, lectura de reloj, intervalo de tiempo, velocidad y aceleración (todos se definen operacionalmente). Se introducen las representaciones gráficas y se investiga cómo pueden usarse para representar y predecir el movimiento de objetos reales.

Como se puede observar, los contenidos conceptuales son relativamente sencillos; sin embargo, el foco del trabajo está en el desarrollo tanto de conocimiento operativo de algunos conceptos básicos y metodologías propias de la Física como de algunas de las habilidades de pensamiento crítico subyacentes. Las investigaciones que respaldan el trabajo propuesto en las tres unidades (en términos de dificultades y preconcepciones, habilidades subyacentes, efectividad de los materiales, etc.) se pueden encontrar en (Boudreaux, 2008; Heron, 2003; Loverude, 2003; McDermott, 1992; McDermott, 1984; Ortiz, 2005; Rosenquist, 1987; Shaffer, 1992; Shaffer, 2005; Trowbridge, 1980; Trowbridge, 1981).

Con el trabajo de la última unidad y el apoyo correspondiente en el área de las Matemáticas, consideramos que el estudiante puede encontrarse listo para afrontar el curso de Mecánica I del Ciclo Básico de Ingeniería.

Desde el punto de vista metodológico, las actividades de aprendizaje están hechas para que los estudiantes experimenten y analicen situaciones problemáticas en el contexto del laboratorio; algunas veces de forma individual y otras por equipo. El trabajo correspondiente a cada unidad de aprendizaje consiste en la realización de estos experimentos y la discusión continua acerca de qué se hizo, para qué se hizo y cómo se hizo, el registro individual del trabajo en una bitácora, los trabajos para desarrollar fuera del aula de forma individual y en grupo (tareas), así como evaluaciones formativas, autoevaluaciones y evaluaciones de los estudiantes al curso y al profesor.

El trabajo de bitácora es la herramienta principal que diseñamos para tratar los problemas de lecto-escritura y las dificultades para registrar y ordenar el aprendizaje. La demanda de trabajo y formalidad que requiere el curso apuntan a trabajar con las carencias de hábitos de trabajo y estudio.

Es importante señalar que aunque el trabajo sucede en un laboratorio, las actividades de aprendizaje no son prácticas de laboratorio (en el sentido tradicional del término⁵) sino más

bien, indagaciones guiadas que buscan construir rigurosamente las nociones físicas a partir de la experiencia concreta, análisis y la reflexión, al mismo tiempo que se desarrollan las habilidades de pensamiento científico necesarias, como abundaremos más adelante.

Dados estos contenidos y esta propuesta metodológica, en donde el ritmo de trabajo es el del estudiante y no el del profesor, el curso de IF-1 está pensado para cubrirse en dos semestres. Como veremos más adelante, tan sólo para cubrir "Propiedades de la materia" adecuadamente, nuestros estudiantes requieren del orden de 100 horas.

2.1.2. El curso de IF-2

Cronológicamente, se implementó primero el curso IF-1. Sin embargo, algunos profesores que formaban parte del equipo de trabajo impartían el curso "Física de la célula" en el primer semestre de la carrera de Promoción de la Salud. El programa de esta materia incluía una extensa lista de temas de Física, los cuales son necesarios para entender adecuadamente algunos de los fenómenos que ocurren en la célula y sus interacciones. Estos temas incluían: cinemática, dinámica y principios de conservación, elementos de termodinámica y principios de electromagnetismo (lo suficiente como para resolver la ecuación del potencial de acción). Como se puede inferir, considerando que los estudiantes que cursaban dicha materia estaban casi en la misma situación que los que atendíamos para Ingeniería, los índices de no aprobación y deserción eran muy altos.

Aprovechando el trabajo que se estaba haciendo para IF-1, se propuso cambiar el programa de "Física de la célula" por el mismo curso IF-1. El argumento que se presentó fue el siguiente: dadas las condiciones de los estudiantes, era casi nula la posibilidad de acceder a los contenidos que se proponían de una manera funcional (*i.e.*, *no* declarativa); si se esperaba que alcanzaran algún tipo de aprendizaje operativo, debía ser con otros temas (aquellos que requirieran menos elementos previos). Propusimos dar un curso que se correspondiera más adecuadamente con la realidad de los estudiantes y que contribuyera, sobre todo, al desarrollo de algunas habilidades de pensamiento indispensables para el quehacer científico en general. Consideramos que la relevancia de estudiar Física para un futuro Promotor de la Salud no está *sólo* en los conocimientos que pueda obtener, sino primordialmente en las destrezas de pensamiento que puede desarrollar en el contexto de aprender Física rigurosamente (más importante que los contenidos de la Física, son las habilidades de pensamiento que la subyacen).

Producto de la reflexión y de la experiencia al impartir el

⁵ Cuando decimos prácticas de laboratorio tradicionales nos referimos a las prácticas que se realizan para confirmar o respaldar los resultados que se presentan en la parte teórica del curso (medir el valor de g , confirmar el principio de Arquímedes, etc.). En nuestro caso, no hay

tal separación, e intentamos que la teoría se construya a partir de la confrontación directa con situaciones problemáticas que generan la necesidad de la teoría. Por ejemplo, la necesidad de explicar y predecir que sucederá con el brillo relativo de los focos en un circuito simple si hacemos algún cambio, da lugar a la construcción de un modelo para la corriente eléctrica.

propio curso, se decidió trabajar solamente con la unidad "Propiedades de la materia". Esto se debió a que decidimos jerarquizar, para este curso en particular, el trabajo cuidadoso con las habilidades de pensamiento y las metodologías científicas pues, como ya hemos mencionado, consideramos que éstas son más relevantes para la formación de un promotor de la salud. Para poder hacer esto es necesario cubrir toda la unidad y dar tiempo a los estudiantes para llegar a sus propias conclusiones. Cabe señalar que en un semestre de 108 horas de clase apenas conseguimos terminar con el curso.

2.2 Un esquema para describir el diseño, la implementación y justificación de la solución

Como se discutió en el anterior apartado, la aproximación metodológica fue la misma para los cursos IF-1 e IF-2, las diferencias residen en los propósitos específicos y algunos de los contenidos.

Para apoyar la descripción del desarrollo e implementación de los cursos presentaremos un esquema que describe y estructura nuestra propuesta de trabajo.⁶ Simultáneamente, dicho esquema permite entender la elección de la *indagación guiada* como solución al problema.

Retomando la pregunta "¿cómo diseñamos estos cursos?", en retrospectiva podríamos decir que apoyándonos en el esquema de trabajo mostrado en la Figura 1. Dicho esquema es un diagrama dinámico en donde se sintetizan todos los elementos que tomamos en cuenta en el proceso de diseñar e implementar los cursos de IF. Como se puede ver (con las flechas bidireccionales), todas las partes están en interrelación.

A continuación explicaremos las diferentes componentes del diagrama y, después, cómo se relacionan entre sí. Veamos pues en qué consiste cada parte:

- 1. Propósitos generales.** Esto es, posiblemente, lo primero en lo que hay que pensar. En términos del esquema $E_i \rightarrow E_f$, esto correspondería a pensar en E_f . Dependiendo del contexto, los propósitos pueden ser muy generales (como los objetivos de largo plazo) o más específicos.
- 2. Los qués.** Aquí se incorporan los aspectos propios del campo, en nuestro caso la Física, y se relacionan con los propósitos. Se reflexiona, con el mayor rigor y cuidado posible, en los elementos conceptuales y metodológicos necesarios para llegar a los objetivos establecidos. En particular, y esto es central, se reflexiona acerca de los mecanismos cognitivos subyacentes (habilidades de pensamiento y conocimientos) que se requieren para lograr estos objetivos.⁷

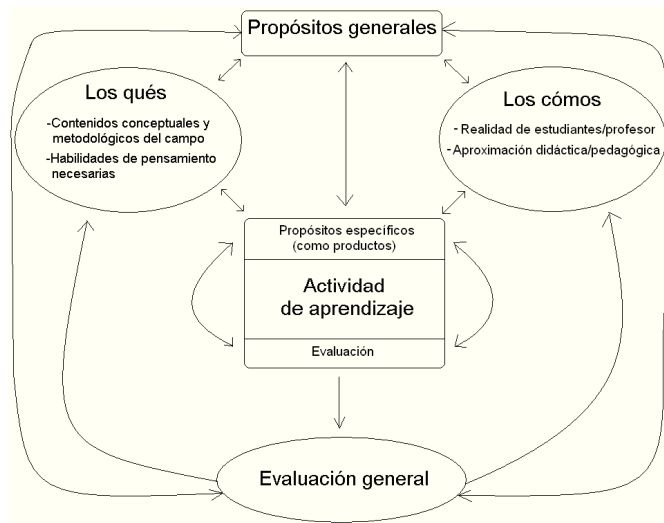


Figura 1. Esquema que incorpora los elementos que consideramos más relevantes para el diseño e implementación de cualquier curso.

3. Los cómo. En este punto se indaga acerca de tres aspectos principales:

- a) La realidad de los estudiantes.** Se investiga y considera la situación específica de los estudiantes. ¿Dónde se encuentran en términos cognitivos (habilidades de pensamiento y preconcepciones)? ¿Cómo se encuentran sus habilidades de trabajo y estudio y sus destrezas en lecto-escritura?⁸
- b) La realidad de los profesores.** Se examina cómo se posicionan los profesores ante la enseñanza. ¿Cuál creen que es su papel? ¿Qué entienden por enseñar? ¿Cómo enfrentan las dificultades que surgen en este proceso? ¿Cuáles son sus capacidades y preferencias

metodológicos) no son claros, si hay huecos lógicos de los cuales no se está consciente, si no se proveen todos los elementos necesarios para arribar a las conclusiones adecuadas, etc., entonces será muy difícil que se cumplan los propósitos. Si los contenidos son incorrectos o inconsistentes ¿cómo podemos esperar que nuestros estudiantes entiendan? Hemos fracasado antes de empezar. La relevancia (e inclusive preponderancia) de la elección de contenidos en el problema de la enseñanza de la ciencia (en particular, de las matemáticas) es discutida con gran lucidez por H. Wu (2002; 2005).

Por otro lado, la posibilidad de identificar los mecanismos cognitivos que subyacen a los contenidos es, para el común de los físicos, aún más difícil. Esto se debe a que para el físico común estos mecanismos se manifiestan en forma implícita, no son algo que cultivó voluntariamente, sino algo que se dio de manera natural. De este modo, el explicitar estas habilidades de pensamiento requiere un entrenamiento y esfuerzo extra.

⁸ Las indagaciones acerca de la situación de los estudiantes, así como la de los profesores, no se limita a investigar los puntos aquí mencionados. Sin embargo, los que consideramos son los que nos parecen más relevantes y tratables.

⁶ Este esquema, propuesto por Chernicoff (2008), sintetiza los elementos que se consideran más importantes para el diseño e implementación de cualquier curso e incorpora todos los elementos que hemos encontrado útiles acerca de la enseñanza de la ciencia.

⁷ La reflexión interna sugerida sobre el campo requiere de un conocimiento profundo y panorámico del mismo; es decir, de sus contenidos, metodologías y lógica interna. Si los contenidos (conceptuales y

didácticas? ¿Qué tan cómodos se sienten en su campo? etc.

c) *La elección didáctica/pedagógica.* Aquí se analizan, con base en los dos elementos previos (la realidad de los estudiantes y profesores), cuáles son las estrategias de enseñanza/aprendizaje adecuadas para encarar o que son acordes con esta realidad. Se discuten las diferentes opciones, y su pertinencia, dadas las condiciones específicas (por ejemplo, si los estudiantes a los que está dirigido el curso tienen carencias serias respecto a sus hábitos de lecto-escritura, la estrategia de discutir artículos de investigación puede no ser la más adecuada; o si el profesor que impartirá el curso aprendió y ha enseñado en forma declarativa toda su vida, pedirle que enseñe en forma constructiva u operativa, puede generar algunos problemas).⁹ En este punto se considera la modalidad de intervención docente adecuada.

4. Actividad de aprendizaje. En este punto se sintetiza, implementan y convergen todos los ingredientes anteriores en una propuesta específica, la llamada “actividad de aprendizaje” (Furlan, 1979; Remedi, 1979). Ésta puede ser larga o corta, durar un día o un semestre, sin embargo hay tres elementos que, desde nuestra perspectiva, es importante que estén presentes:

- a) *Apertura.* Donde se establecen los propósitos de la actividad a manera de productos.
- b) *Desarrollo.* El conjunto de actividades concreta y específicamente diseñadas para alcanzar los propósitos. Aquí se presenta el conflicto cognitivo y se intenta resolver (cambio conceptual).
- c) *Cierre.* Donde se concluye la actividad y se evalúan los propósitos. Es importante asegurarse de que haya consistencia entre la apertura y el cierre; es decir, que al terminar se resuelvan las dificultades que se explicitaron en la apertura. La correspondencia entre la evaluación y los propósitos no debe minimizarse. Es por esto que proponemos pensar los propósitos como productos desde el principio. La actividad de aprendizaje juega el rol de la transformación (\rightarrow) en el esquema $E_i \rightarrow E_f$.

5. Evaluación general. Una vez que se ha aplicado la actividad de aprendizaje se valora su eficacia. Para esto es necesario contrastar los resultados obtenidos (por ejemplo en las evaluaciones de los estudiantes) con los propósitos establecidos. Si la evaluación general (por ejemplo del curso) es insatisfactoria, entonces hay cuatro lugares naturales donde buscar las causas: los propósitos, los *qués*, los *cómos* y la actividad de aprendizaje. No hay nada, a

priori, que nos indique dónde buscar primero, esto es más bien una cuestión de elección personal y experiencia (posiblemente el pedagogo buscará primero en los *cómos*, el físico buscará primero en los *qués*, etc.). Sea como fuere, si el trabajo previo con estos elementos fue sistemático y riguroso, identificar las causas y trabajarlas será un proceso más claro y eficiente.

La relación entre todos estos elementos no es unidireccional. A veces los *qués* o los *cómos* condicionan los propósitos, otras veces una actividad de aprendizaje explicita los *qués*, etc. El orden tampoco es absoluto, en muchas ocasiones se empieza por el final o por la mitad. En algunas situaciones se jerarquizan los *cómos* (por ejemplo en los entornos pedagógicos) y en otras los *qués* (como en los entornos de discusión curricular). Lo importante es que, se esté donde se esté, esta representación esquemática (o diagrama) es una poderosa herramienta para reflexionar sobre nuestro quehacer docente, nos ayuda a que todas las elecciones que hacemos (que suelen estar implícitas y, por lo tanto, convertirse en puntos ciegos) se expliciten claramente. En pocas palabras, provee un marco para que nos aproximemos al problema de la enseñanza haciendo uso de nuestras habilidades científicas.

2.3 Aplicando el esquema a los cursos

A continuación se hará uso del esquema presentado para describir el desarrollo e implementación de los cursos de IF. Esperamos que a través de este ejercicio, la razón por la que elegimos la *indagación guiada* como método didáctico principal se haga evidente, así como lograr describir con claridad algunas características propias de los cursos. Se intentará hacer más explícito lo anterior presentando un ejemplo concreto en la sección 2.3.1.

1. **Los propósitos** generales y específicos de los cursos ya fueron discutidos en las secciones anteriores.
2. Acerca de **los qués**, la elección de estos contenidos no fue arbitraria. Se escogieron temas que fueran relevantes y que, dadas las posibilidades de los estudiantes (en habilidades y conocimientos), pudieran ser presentados rigurosamente, a la vez de que se desarrollaban las habilidades y hábitos que establecimos en los propósitos (es decir, buscando consistencia con los propósitos en todos sus niveles). Esto significó, en los dos cursos, elegir temas relativamente sencillos (como principio de Arquímedes) que no requirieran de un gran bagaje conceptual, pero que permitieran introducir conceptos (nociones de masa, volumen, densidad, circuito, corriente, velocidad, aceleración, etc.) y metodologías relevantes (control de variables, razonamiento proporcional, definiciones operacionales, construcción de un modelo, diferentes representaciones científicas, etc.) en el contexto del trabajo experimental. Además, se consideraron algunos resultados sobre las preconcepciones y dificultades en los estudiantes que representan un obstáculo significativo para poder acce-

⁹ En este punto se incorpora el factor de los estudiantes E_i (que ya se había incorporado en el esquema $E_i \rightarrow E_f$), pero también el factor profesor (más precisamente, la intervención docente).

der a temas más complejos; por ejemplo, buena parte de los estudiantes de licenciatura tienen dificultades para distinguir entre los conceptos de masa y volumen (Heron, 2003). ¿Qué implicaciones tendrá esto sobre la posibilidad de entender conceptos más complejos que descansan sobre estas nociones primarias? ¿Cuántas veces hemos dado clase asumiendo que esta distinción es obvia y que está presente en nuestros estudiantes?

3. **Los cómo.** Una buena parte de esto fue abordado cuando se analizaron las causas, ahí se discutió la situación específica de los estudiantes y, parcialmente, la de los profesores. Pero hay una parte de los *cómo*s que no se ha tocado aún: la elección pedagógica.

Si se considera la hipótesis de trabajo (basada en las investigaciones realizadas en los Estados Unidos durante los últimos 30 años) que asevera que, a nivel licenciatura, en promedio un tercio de los estudiantes se encuentra en el período formal, un tercio en el período concreto y un tercio en la transición del concreto al formal y, si además, tomamos en cuenta que la posibilidad de la apropiación a través de la verbalización de ideas abstractas es característica del período formal (Delval, 1983; Piaget e Inhelder, 1958) entonces la elección de una forma de instrucción primariamente verbal parecería no ser la mejor opción. Por otro lado, también sabemos que la transición del período concreto al formal acontece a través de la experiencia concreta (valga la redundancia) y, sobre todo, (sin ser privativo de este período) que el aprendizaje requiere del *involucramiento mental activo* por parte del “aprendiz”. La importancia del involucramiento intelectual activo como un ingrediente central del aprendizaje se discute en el trabajo seminal de Piaget e Inhelder (1958) y en McDermott (1991) como atestigua esta cita: “Reconocemos que, para que los estudiantes adquieran un entendimiento funcional de la Física, deben ser participantes activos del proceso de aprendizaje.”

Bajo estas consideraciones elegimos la “*Indagación guiada* en el entorno del laboratorio” como nuestra propuesta pedagógica. La *indagación guiada* es consistente con el propósito de que los estudiantes desarrollen conocimiento operativo y habilidades de pensamiento, y el trabajo de laboratorio es consistente con la situación particular de nuestros estudiantes.

En esta aproximación se trabajan actividades de aprendizaje planteadas desde una perspectiva constructivista y que fomentan el *involucramiento mental activo* por parte del estudiante.

Antes de seguir, vale la pena hacer una pausa para aclarar algunos conceptos fundamentales en nuestra argumentación.

¿Qué entendemos por “*indagación guiada*”? Al interior de la Física hay un orden lógico y metodológico que permite ir resolviendo las diferentes dificultades que surgen dentro de la misma. Si se estudia la evolución de los conceptos científicos se puede reconocer que en la génesis de los mismos suele haber un conjunto de preguntas que no se pueden contestar. La evolución de los conceptos está relacionada con la posibilidad de ir contestando con mayor claridad y profundidad es-

tas preguntas. En retrospectiva es posible estructurar este proceso de manera lógica y ordenada identificando las evidencias y los razonamientos necesarios para contestar estas preguntas. Es esta estructura la que *guía* la indagación (esta estructura es parte de lo que encontramos en los “*qués*” del esquema).

Este tipo de indagación es diferente a la utilizada para resolver problemas abiertos (Gil, 1993). Desde nuestra perspectiva, los requerimientos para abordar este tipo de problemas de manera satisfactoria exceden las posibilidades de nuestros estudiantes de nuevo ingreso (Wu, 1994). Para nuestros estudiantes la indagación abierta no resulta una experiencia de aprendizaje significativa dado que la posibilidad de generar y responder preguntas abiertas es una habilidad mucho más compleja que contestar preguntas de manera ordenada y llegar a ciertas conclusiones con base en las respuestas. En todo caso, desarrollar y aplicar dicha habilidad sería un propósito de los que hemos llamado a largo plazo, como para el final de la carrera. Además, la *indagación guiada* ofrece un andamiaje para aprender a estructurar un proceso de indagación al mismo tiempo que se desarrollan conceptos y metodologías relevantes para el campo disciplinar. Si los ingredientes conceptuales y metodológicos necesarios para contestar una pregunta no están presentes, la indagación resulta un ejercicio estéril (Wu, 2005; Arons, 1997).

Por otro lado, ¿qué entendemos por la aproximación constructivista? Tomamos la definición práctica que da McDermott (1991) en la siguiente cita:

“... todos los individuos deben construir su propio conocimiento y el conocimiento que ya tienen (o que piensan que tienen) afecta significativamente lo que pueden aprender. El estudiante no es visto como un receptor pasivo del conocimiento sino más bien como un participante activo de su creación. El aprendizaje significativo, que implica la habilidad de interpretar y usar el conocimiento en situaciones no idénticas a aquellas en las que se adquirió inicialmente, requiere un involucramiento mental profundo de parte del que aprende. La mente del estudiante no es una “*tábula rasa*” sobre la cual puede escribirse información nueva sin tomar en cuenta lo que ya existe ahí. Si el instructor no hace un esfuerzo consciente de guiar al estudiante para que lleve a cabo las modificaciones necesarias para poder incorporar de forma correcta la información nueva, el estudiante puede hacer el reacomodo por su cuenta.” (McDermott, 1991)

Lo anterior se plasma en dos estrategias complementarias que son centrales para entender cómo se diseñan las actividades de aprendizaje, y cómo es nuestro trabajo en el salón de clases con los estudiantes. Éstas son: 1) suscitar, confrontar y resolver, y 2) el diálogo socrático. En el lenguaje constructivista la primera estrategia está relacionado con la generación del conflicto cognitivo y la búsqueda del cambio conceptual.

La estrategia de *suscitar, confrontar y resolver* se utiliza para

asegurar el involucramiento activo de los estudiantes con el fin de superar dificultades que resultan altamente persistentes. Esto se hace al exponer deliberadamente situaciones donde los estudiantes tienen la tendencia de cometer un error para confrontar directamente la dificultad conceptual o de razonamiento que subyace (McDermott, 1991).

Por “diálogo socrático” entendemos una estrategia didáctica en donde el rol del profesor no es el de dar respuestas sino, más bien, hacer preguntas. Estas preguntas buscan ayudar al estudiante a evidenciar el problema (suscitar), entender el conflicto (confrontar) y, eventualmente, a solucionarlo (resolver); se trata de probar y/o reforzar los razonamientos propios de los estudiantes, explicitar sus preconcepciones, confrontarlas con las evidencias y someterlas al análisis y la reflexión para resolverlas. A través de este método, se busca por un lado indagar en los procesos de pensamiento y preconcepciones de los estudiantes (lo cual permite mejorar el diseño de actividades de aprendizaje), y por el otro, contribuir al desarrollo de la autonomía intelectual de los estudiantes. La hipótesis es que, en el momento que damos la respuesta “matamos” el involucramiento mental activo de los estudiantes.¹⁰

4. Las actividades de aprendizaje. Las actividades de aprendizaje que diseñamos están basadas, principalmente, en los textos de *Physics by Inquiry*, vols. I y II. Tal y como están, estas actividades de aprendizaje ya incorporan buena parte de los elementos que discutimos en los puntos anteriores dado que, como ya hemos comentado, buena parte de nuestra aproximación a la enseñanza está fuertemente influenciada por los trabajos de Arons. Fue él quien fundó el PEG, y es sobre la base de su propuesta que el grupo ha trabajado en la enseñanza de la Física desde entonces y por más de treinta años.

Los materiales fueron diseñados justamente en este marco; sin embargo, estas actividades no incorporan la realidad específica completa de nuestros estudiantes y profesores. Considerando esto decidimos modificar y complementar estas actividades de aprendizaje. En particular, vinculado con la *indagación guiada* vale la pena mencionar que introdujimos los siguientes elementos:

a) Trabajo de bitácora: su propósito es trabajar directamente con las dificultades de lecto-escritura y de organización del trabajo. La bitácora permite que estudiantes y profesores indaguen acerca de los procesos

de pensamiento de los primeros a través de explicitar, en forma escrita, las explicaciones y razonamientos detrás de todo lo que se hace. El trabajo de bitácora se discute con cada uno de los estudiantes cotidiana e individualmente. Además, a través de este instrumento, se pretende empezar a cultivar los elementos más primarios de la meta cognición.¹¹

b) Trabajo con los maestros: establecimos un seminario semanal para reflexionar sistemáticamente sobre el curso, en particular, para generar un lenguaje común, basado en la experiencia, que permita hacer de la reflexión académica entre profesores una herramienta confiable para la toma de decisiones acerca del curso¹² y familiarizarnos con un método didáctico (la *indagación guiada*) no familiar para la mayoría de los profesores involucrados.

c) Laboratorio de IF: estas actividades de aprendizaje requieren de material experimental y un entorno adecuado donde llevarlas a cabo. El generar estos entornos conducentes para profesores y estudiantes también fue algo que hicimos y que consideramos forma parte integral de las actividades de aprendizaje (si no hay dónde y con qué hacer las actividades, no hay actividades).

5. La evaluación general. El tema de la evaluación es tan extenso y complejo por sí mismo que una discusión al respecto excede los alcances de este artículo y nos desviaría de la discusión en torno a la *indagación guiada*. En particular nuestra postura es que la evaluación no se puede hacer en una sola instancia como un examen (Trowbridge, 1980) y que se requiere tomar en cuenta los siguientes elementos:

a) La importancia de establecer, de común acuerdo y con la mayor claridad posible, cuáles son los propósitos centrales y periféricos del curso.

b) Escribir esos propósitos como productos específicos que nos permitan evaluar si el propósito se ha logrado o no (o a qué nivel se ha logrado).

c) Evaluar cotidianamente y en el contexto de un equipo de trabajo, si esos propósitos (como productos) se están cumpliendo o no. O más precisamente a qué nivel se están cumpliendo. Además, intentamos tener

¹⁰ Al principio, para la mayoría de nuestros estudiantes esta forma de interacción es muy incómoda. A lo largo de toda su vida académica se han acostumbrado a recibir las “respuestas correctas” de los profesores. El esfuerzo intelectual que implica esta aproximación inicialmente es muy confrontativo. Con el paso del tiempo, y una vez que descubren que son capaces de llegar a conclusiones que pueden argumentar y respaldar por sí mismos, que son capaces de entender, esta actitud cambia drásticamente y es suplantada por el placer de descubrir (por lo menos ese es el objetivo).

¹¹ Constantemente reflexionamos con los estudiantes acerca de: ¿qué se está haciendo?, ¿para qué se está haciendo? y ¿cómo se está haciendo? Esto apunta a que el estudiante no pierda claridad sobre el proceso de aprendizaje. Además, como parte de la evaluación del curso, se le pide al estudiante un reporte escrito en donde describa cómo arribó a algunas de las conclusiones relevantes de las unidades.

¹² Una de las dificultades más grandes que enfrentamos con este curso es que cada uno de los profesores que lo impartía lo entendía de una manera distinta. Nos tomó un par de años de discusión constante el siquiera poder tener acuerdos mínimos acerca de cuáles eran los objetivos centrales del curso y qué significaba esto para nosotros.

más de un criterio para evaluar (tareas, exámenes, discusión con el estudiante, etc.).

- d) Discutir los resultados obtenidos intentando ser cuidadosos en cómo se interpretan. Lo anterior reconociendo la dificultad de interpretar los resultados de la evaluación separados de (o sin considerar) la participación de los profesores, y a la dificultad de interpretar los resultados de la evaluación separados de (o sin considerar) el marco conceptual donde estamos parados.

2.3.1 Un ejemplo concreto: Propiedades de la materia

Ahora vamos presentar con un ejemplo algunas de las cosas que hemos expuesto en forma teórica. Para ello nos concentraremos en discutir algunos aspectos de la unidad "Propiedades de la materia" (común a los dos cursos de IF) y mostraremos cómo utilizar el marco que hemos presentado.

Imaginemos que queremos dar el curso de IF con las condiciones que previamente hemos mencionado, y supongamos que uno de nuestros objetivos es que el estudiante universitario comprenda el principio de Arquímedes.

¿Cómo presentarlo? ¿Por dónde empezar? ¿Qué elementos y habilidades se requieren para entender el principio de Arquímedes? ¿Qué habilidades desarrollará el estudiante con esto? ¿Cuál sería la ruta a seguir para lograr estos objetivos? ¿Cómo lo enseñaría? ¿En cuánto tiempo lo presentaría? ¿Cómo evaluaría si el estudiante ha entendido, o si ha cumplido los propósitos?

Si nos hubieran hecho estas preguntas hace algunos años hubiéramos contestado algo como lo siguiente:

"Discutir primero las leyes de Newton, asegurando que el estudiante las entienda y sea capaz de hacer diagramas de cuerpo libre adecuadamente. Después, introducir la pregunta sobre cómo saber si un cuerpo flotará en un líquido dado. Pedir al estudiante que utilice las leyes de Newton para explicar cuál sería la condición de flotación y que dibuje el diagrama de cuerpo libre para el cuerpo (analizando un cubo de líquido y asumiendo que está estático). Dado que el estudiante no sabe cuál es la naturaleza de la fuerza que ejerce el agua sobre el objeto, no puede escribir el lado izquierdo de $\vec{F} = m\vec{a}$ de manera explícita. Relacionado con lo anterior, se pueden hacer investigaciones experimentales para arribar al hecho de que la fuerza actúa perpendicularmente a las superficies y depende de la profundidad (en términos de la presión hidrostática, esto se expresa como $p = p_0 + \rho gh$). Una vez que cuentan con este elemento, los estudiantes pueden reconocer que la fuerza que ejerce el líquido sobre el objeto no depende de la profundidad a la que éste está sumergido, sino de la diferencia de presiones entre la parte de arriba y la parte de abajo del objeto. Considerando esto y haciendo algunas cuentas, pueden llegar a la conclusión de que la fuerza total que ejerce el líquido sobre el objeto, apunta hacia arriba y tiene una magnitud de $F_f = \rho g V_{desp}$, donde V_{desp} es el volu-

men del objeto que está sumergido en el líquido, y ρ es la densidad del líquido.

Las habilidades desarrolladas a través de este trabajo serían la utilización de diagramas de cuerpo libre y las leyes de Newton en un entorno distinto y el cultivo de la forma de solucionar problemas de la Física.

¿Cómo lo enseñaríamos? Intentando dar explicaciones claras, usando el pizarrón, preguntándoles a los estudiantes si entienden o no, haciendo alguna demostración en clase y dejando buenos problemas de tarea.

En términos de lo que se necesita, diríamos que se necesitan manejar las leyes de Newton, suma de vectores y un poco de álgebra.

¿En cuánto tiempo se enseña? En una semana ¿Cómo evaluaría? Con problemas estándar de libro de texto."

Pensamos que muchos de nuestros colegas propondrían formas similares dado que así aprendimos la mayoría el Principio de Arquímedes y porque así se presenta en la mayoría de los libros de texto. También suponemos que estarían de acuerdo en que un entendimiento operativo (en el sentido que lo hemos definido en la sección anterior) sería deseable.

Sin embargo, éste es un tema que se ha estudiado bastante y, por ejemplo, algunas investigaciones muestran que, inclusive después de la intervención docente como la que acabamos de describir, los estudiantes no pueden aplicar el principio de Arquímedes ni siquiera en situaciones muy simples (Loverude, 2003).

¿Qué podemos hacer? En términos del esquema que presentamos lo anterior muestra que la evaluación general no es la que esperábamos y por tanto tenemos cuatro aspectos para que revisar en nuestro planteamiento: los propósitos, los *qués*, los *cómos* y la actividad de aprendizaje.

Los propósitos y los contenidos están establecidos con claridad, pero ¿qué sucede con los *cómos*? Si indagamos acerca de la realidad de los estudiantes, tal vez encontremos que la elección de cómo presentar el Principio de Arquímedes no es la más adecuada para ellos porque las leyes de Newton es un tema muy complejo de incorporar operativamente (McDermott, 1984); de manera que, si queremos llegar al Principio de Arquímedes vía las leyes de Newton, tenemos que estar seguros que los estudiantes las entienden. Pero las leyes de Newton son uno de los contenidos centrales del curso de Mecánica I, de manera que para tomar el curso de IF los estudiantes tendrían que haber terminado satisfactoriamente Mecánica I.

En nuestro caso, a partir de que se consideró la realidad de nuestros estudiantes, nos dimos cuenta que sus dificultades eran *muy* profundas, mucho más de lo que habíamos imaginado. No podían distinguir entre masa y volumen, no tenían elementos para interpretar (mucho menos diseñar) un experimento sencillo, y el limitado conocimiento que tenían de Física era puramente declarativo; en términos de habilidades de matemáticas, el problema no estaba en dificultades con álgebra o trigonometría, sino en fracciones y razonamiento

proporcional, no había claridad acerca de conceptos básicos como el de “área” y “volumen”¹³ y el manejo de las representaciones gráficas, algebraicas y verbales era profundamente pobre.

El anterior es un ejemplo de cómo la reflexión acerca de los *cómos*, nos puede llevar a repensar los propósitos y los *qués*. En nuestro caso, esto nos llevó a elegir propósitos más cercanos a los estudiantes y, en particular, más enfocados al desarrollo de metodologías científicas y habilidades de pensamiento. En términos de los contenidos, no se llegó al Principio de Arquímedes completo sino a la posibilidad más básica de predecir el comportamiento de hundimiento o flotación de objetos simples en un líquido dado. Aunque este contenido parezca casi trivial, la construcción rigurosa del mismo nos toma del orden de 108 horas de clase.

Para pensar en los *qués* se invita a preguntarnos: ¿Qué elementos conceptuales y metodológicos se requieren para poder predecir el comportamiento de hundimiento o flotación de objetos simples en un líquido dado? ¿Qué habilidades de pensamiento crítico son necesarias para poder entender estos contenidos? ¿Cuáles son las preconcepciones que obstaculizan el aprendizaje operativo de estos conceptos?

A continuación presentamos de nuevo cómo lo pensamos a manera de ejemplo en la Unidad de Trabajo Propiedades de la Materia.

El comportamiento de hundimiento o flotación de objetos simples en un líquido dado se puede predecir si conoce la densidad del objeto y la del líquido. Para conocer la densidad hay que saber la masa y el volumen, más precisamente hay que saber cómo medir estas cantidades. Esto implica poder definir operacionalmente la masa, el volumen y la densidad.

Para llegar a la conclusión de que lo que predice si un objeto flotará, o no, en un líquido dado es el cociente de las densidades del objeto y el líquido, se requiere poder diseñar experimentos que nos permitan saber cuándo una variable dada *determina* el comportamiento de un sistema dado. Para esto es necesario el método de control de variables. De hecho, antes de saber si una variable determina el comportamiento de un sistema hay que establecer cuáles son las variables que afectan o influyen al comportamiento del mismo. Esto también requiere del método de control de variables. Para poder trabajar con masa, volumen, densidad y la relación entre estos tres conceptos es indispensable hacer uso del razonamiento proporcional.

En resumen, los conceptos imprescindibles para poder predecir el comportamiento de hundimiento o flotación de objetos simples en un líquido dado son: la masa, el volumen y la densidad. Las metodologías necesarias son: el control de variables, las definiciones operacionales y el razonamiento proporcional. Vale la pena hacer notar que los tres elementos

metodológicos previos no sólo son indispensables para acceder a este tema, sino son un ingrediente fundamental de casi todo el trabajo en Física. ¿Cómo se pueden interpretar los resultados de un experimento si no se entiende el control de variables? ¿Cómo se puede alcanzar un entendimiento operativo de un concepto si ni siquiera se ha definido operacionalmente?¹⁴ ¿Cómo se pueden trabajar los conceptos de velocidad y aceleración sin el razonamiento proporcional? Si ha encontrado dificultad al enseñar alguna de estas cosas, tal vez se debe a que hay algunos de estos elementos que no están presentes (o muchos otros más).

¿Cuáles son las habilidades de pensamiento que subyacen a los tres aspectos metodológicos previos? Como ya se había mencionado, el pensamiento hipotético deductivo, el poder distinguir entre observación e inferencia, el repetido uso de las preguntas: “¿Qué sabemos...? ¿Cómo sabemos que...? ¿Por qué aceptamos o creemos...? ¿Cuál es la evidencia de...?”, y el poder reconocer que las palabras son símbolos para las ideas y no las ideas mismas.

¿Cuáles son las preconcepciones que obstaculizan el aprendizaje operativo de estos conceptos? Las investigaciones en el tema muestran que la dificultad principal radica en el hecho de que una parte significativa de los estudiantes no es capaz de distinguir entre masa y volumen, es decir, que usan estos dos términos en forma indistinta. Considerando esto, sería importante que esta dificultad se explicita y se trate con cuidado antes de abordar el tema de densidad.

Todo lo anterior se ve reflejado en el orden y en las actividades propuestas para la Unidad de Trabajo Propiedades de la Materia. El tema de hundimiento y flotación se presenta sólo después de establecer un cimiento conceptual sólido: se construyen definiciones operacionales de masa, volumen y densidad, se establece la diferencia entre masa y volumen y se introduce el método de control de variables en un contexto diferente y significativo. Posteriormente, se guía a los estudiantes a que desarrollen una serie de reglas que les permitan predecir si un objeto se hunde o flota en un líquido dado y, si flota, qué tanto líquido desplazará. No se presenta un marco referencial que involucre fuerzas ni el concepto de presión.

La elección de la *indagación guiada* como aproximación didáctica queda entonces determinada a partir de los propósitos de la intervención docente y del bagaje científico —conceptual y metodológico— de nuestros estudiantes. Comienzan el trabajo de la unidad con observaciones de cómo se comportan varios objetos cuando se les sumerge por completo en el agua y se les suelta. Los estudiantes diseñan, llevan a cabo e interpretan experimentos con el fin de identificar las variables que determinan si los objetos se hundirán o flotarán (en esta etapa sólo se usan objetos con densidad uniforme). Estas actividades ayudan a reforzar el desarrollo de la habilidad de control de variables. Los estudiantes observan que los objetos con volúmenes iguales, pero diferente masa, pueden

¹³ Una buena argumentación del por qué estos elementos matemáticos se deben apuntalar previo a (o en conjunción con) el trabajo en Física se puede ver en Arons (1997).

¹⁴ Ésta es una condición necesaria pero no suficiente.

comportarse de manera distinta, así como objetos que tienen la misma masa, pero diferente volumen. Ellos concluyen que tanto la masa como el volumen son variables que influyen en el hundimiento o flotación de los objetos pero, cada una, por sí sola, no lo determinan. Los estudiantes luego observan que objetos con la misma densidad se comportan igual, independientemente de su masa y su volumen. Consecuentemente, infieren que la densidad de un objeto determina si se hundirá o flotará en el agua. Después de llevar a cabo experimentos similares en agua salada y alcohol, concluyen que si la densidad de un objeto es menor a la del fluido entonces flotará; si es mayor, se hundirá. Esto se expresa como una condición sobre la diferencia o cociente de las densidades del objeto y el líquido. Finalmente con experimentos que emplean un juego de trozos de madera cubiertos en cera revelan que los objetos flotantes desplazan un volumen menor a su propio volumen pero una masa igual a su propia masa. Lo anterior está relacionado con el Principio de Arquímedes, pero en nuestro trabajo llegamos hasta este punto.

Con todo lo anterior, y los elementos discutidos en la sección y apartados previos contamos con los propósitos, los *qués* y los *cómo*s. En el anterior apartado también se habló acerca de las actividades de aprendizaje. Veamos qué pasó con la evaluación y cómo se relacionó con los demás ingredientes.

Uno de los propósitos importantes que se establecieron para el curso es que, después de terminarlo, el estudiante debería ser capaz de diseñar experimentos para saber si una variable influye o no en el comportamiento de un sistema dado. Los resultados de las evaluaciones arrojaban que este propósito no se estaba logrando. Encontramos que las causas de esto estaban “repartidas” a su vez en los propósitos, los *qués*, los *cómo*s y las propias actividades de aprendizaje.

Cuando revisamos en los propósitos, nos dimos cuenta que la relevancia del tema de control de variables no era lo suficientemente clara en el programa. Lo anterior se reflejaba en los *cómo*s, ya que la importancia de este tema no era evidente para los profesores y, en particular, no contaban con estrategias adecuadas para ayudar a los estudiantes a solventar sus dificultades con este tema. Pensando en cómo ayudar a los estudiantes revisamos los *qués*, y nos percatamos de que el diseño de experimentos que se estaba pidiendo requería, implícitamente, tener claros algunos elementos previos que no se discutían en los materiales y que los estudiantes no necesariamente contaban con ellos. Tales elementos eran: identificar el sistema, identificar el comportamiento a observar, identificar variables, tener claro qué se quiere averiguar con el experimento, describir el procedimiento que se va a seguir para lograr esto, distinguir cuáles son los posibles resultados y, por último, cuáles son las conclusiones que se siguen en función de los resultados observados. Esto nos llevó a modificar y complementar las actividades de aprendizaje incorporando estos nuevos elementos.

La efectividad de estos cambios está siendo actualmente evaluada en el entorno de clase, en las evaluaciones formati-

vas, y por último en la evaluación final del curso.

Apenas, después de ocho años de implementar los cursos, sentimos que estamos en condiciones para empezar a evaluar los logros del curso en términos de los propósitos centrales. En la siguiente sección se muestran algunos de los resultados que hemos obtenido y cuáles son las perspectivas de trabajo tenemos.

3. Resultados y perspectivas

3.1 Resultados

El diseño e implementación de los cursos de IF ha arrojado resultados en diversos ámbitos. En términos de productos, esto se concretó en el diseño de programas, la realización de cuadernos de trabajo (para propiedades de la materia, circuitos eléctricos y cinemática), el diseño del trabajo de bitácora, de evaluaciones diagnósticas, formativas y finales (tareas y exámenes en diversas modalidades) y en la elaboración de cuestionarios para la evaluación del curso y de los profesores. Por otro lado, como se comentará más adelante, ha servido como un espacio de formación docente sistemática y formal.

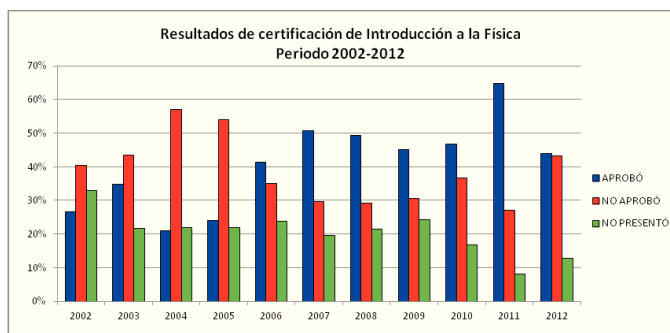
En 2005, y por razones no académicas, el curso de IF-1 fue cancelado y el proyecto se mantuvo a través de IF-2 en el contexto de la carrera de Promoción de la Salud. Los resultados que presentamos a continuación son sobre dicho curso.¹⁵

En términos numéricos, desde 2004 a la fecha alrededor de 25 profesores han impartido el curso IF-2. Se ha atendido a más de 2500 estudiantes y, en general, los índices de aprobación, asistencia y entrega de tareas aumentaron significativamente.

La asistencia y entrega de tareas aumentó a un promedio de 75% y en la gráfica 1 mostramos los resultados de aprobación y no aprobación en el periodo 2002-2008 de los estudiantes en el curso IF-2. En la misma gráfica también se muestra el porcentaje de estudiantes que se inscriben para presentar la evaluación final del curso y que no lo hacen, dado que es un porcentaje relacionado con el índice de deserción en el propio curso. Cabe mencionar que, desde 2004, la aprobación del curso se hace a través de una evaluación final llamada “certificación” en la cual se evalúan los conocimientos operativos (a través de preguntas adecuadas, McDermott, 1992) que un estudiante debe tener después de haber cursado satisfactoriamente el curso. Estos conocimientos son acordados previamente por los profesores involucrados y relacionados con los propósitos del curso.

Como se puede observar, el porcentaje promedio de estudiantes que aprueban la materia ha ido aumentando desde la implementación del curso. Vale la pena hacer notar que el cambio curricular se dio en 2004 y que en dicho año y 2005 los índices fueron menores que los que había inicialmente. Este resultado lo atribuimos a un periodo de ajuste a la pro-

¹⁵ A partir de 2011 el curso IF-1 se está volviendo a impartir en el Programa de Integración y estamos adquiriendo nuevos datos.



Gráfica 1. Porcentajes de estudiantes que aprobaron, no aprobaron y que no se presentaron a la evaluación final en el curso IF-2 durante el periodo comprendido entre 2002 y 2008.

puesta por parte de los mismos profesores que impartimos el curso.

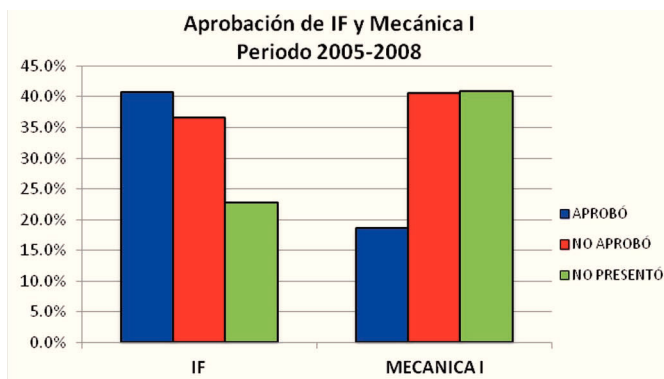
En la gráfica 2 mostramos el promedio de estos datos para el periodo comprendido entre 2005 (ya que estaba implementado el curso de IF-2) y 2008, comparado con la misma información para el curso de Mecánica I. Sólo se muestran los datos de este periodo ya que después de 2009 la modalidad de evaluación para el curso de Mecánica I incorporó la posibilidad de aprobar el curso a través de exámenes parciales y no necesariamente a través de un examen de certificación, como el descrito en la nota anterior para IF-2. Por lo anterior, consideramos que los resultados de los procesos de evaluación a partir de esa fecha entre ambos cursos ya no son comparables de manera directa. En ella se puede ver el contraste entre los resultados obtenidos por los estudiantes en el curso de IF-2 y el curso de Mecánica I, al menos respecto a los porcentajes de aprobación y deserción (relacionado con el porcentaje de estudiantes que no presentan la evaluación final).

Por otro lado, en cuestionarios de opinión con preguntas abiertas aplicados a 63 estudiantes al finalizar los cursos (2005, 2007 y 2009), se reportan los siguientes datos:

- 30% mencionó que su expresión escrita mejoró,
- 60% identificó la necesidad de modificar sus actitudes hacia el aprendizaje,
- 75% reportó que la bitácora le ayudó a mejorar su forma de argumentar o justificar respuestas,
- 79% mencionó que le gustó el diseño del curso,
- 41% reportó haber aprendido a diferenciar entre observar e inferir y a hacer experimentos,
- 25% reconoció que requiere más horas de trabajo en aula, y
- 80% mencionó que no le cambiaría nada al curso.

Estos resultados nos sugiere que la percepción de los estudiantes del curso IF-2 es favorable.

En términos de la experiencia de los profesores que han impartido las materias de IF, estos cursos han abierto (en algunos) la posibilidad de encarar el problema de la enseñanza



Gráfica 2. Promedio del porcentaje de los estudiantes que aprobaron, no aprobaron y no se presentaron a la evaluación final en los cursos de IF-2 y Mecánica I durante el periodo comprendido entre 2005 y 2008.

de la ciencia desde otra perspectiva, la que no se nos enseñó durante nuestra formación académica. Algunos de estos profesores formamos un equipo de trabajo y mantenemos un seminario semanal continuo sobre enseñanza de la Física donde discutimos cotidianamente cómo mejorar nuestra práctica.

3.2 Perspectivas

El trabajo con los cursos de IF sirvió como un semillero donde han germinado diversos proyectos. A continuación presentamos algunos de ellos en relación con el trabajo a futuro que tenemos.

1) Diseño de cursos basados en la propuesta general de IF. Algunos profesores asumieron la propuesta metodológica de IF como propia. Sobre esta base, se dieron a la tarea de repensar y replantear los cursos que estaban dando desde esta perspectiva. Esto se ha concretado en una propuesta para los cursos de Mecánica I y II para las carreras de Ingeniería, así como el desarrollo de un curso de Matemáticas que acompaña a IF en el Programa de Integración.

2) Formación de profesores. Otra de las líneas de trabajo que esperamos seguir es la formación de profesores. Los materiales *Physics by Inquiry*, que forman la columna vertebral de nuestro trabajo, fueron desarrollados inicialmente para apoyar a los estudiantes con dificultades que querían acceder a carreras científicas; pero con el tiempo y la prueba del uso, se convirtieron en la base de un programa muy exitoso de formación de profesores que se lleva a cabo en la Universidad de Washington.

Dado que nuestros estudiantes ingresan a la universidad sin un filtro, como un examen de admisión, consideramos que son una muestra representativa del estado de la educación científica en algunos sectores de nuestro país y, por consiguiente, una muestra de los profesores que la implementan. El estado de nuestros estudiantes nos permite diagnosticar, por lo menos indirectamente, el estado de algunos profesores.

Lo que observaron los investigadores del PEG es que los materiales que eran relevantes para los estudiantes de licen-

ciatura también lo eran para los profesores de ciencias, desde primaria hasta preparatoria. A partir de 2007, hemos tenido oportunidad de trabajar con profesores de educación básica, media superior y superior y para ellos estos materiales parecen resultar muy útiles y relevantes.

3) Trabajo de Evaluación. Considerando las dificultades de la evaluación y, simultáneamente de su importancia, estamos llevando a cabo un proceso cuidadoso y sistemático de evaluación tanto de los cursos IF-1 e IF-2 dado que ambos se están impartiendo actualmente. Como se dijo antes, recién ahora, ocho años después de haber comenzado con el proyecto, consideramos que algunos de los objetivos de los cursos son suficientemente claros en los materiales, pero sobre todo en los profesores, como para poder empezar a rastrearlos en una evaluación más formal y sistemática del curso. El propósito es evaluar el impacto que los cursos de IF tienen sobre el desempeño de los estudiantes a mediano y largo plazo.

Hemos comenzado ya a hacer un diagnóstico más preciso sobre la situación académica de los estudiantes que ingresan a la UACM, en particular en torno a sus conocimientos en Matemáticas y al manejo de la habilidad de control de variables, de tal forma que las decisiones académicas que tomemos acerca de cómo ayudarlos estén respaldadas por información un poco más robusta.

4. Conclusiones

Para cerrar nos gustaría retomar la pregunta inicial que hicimos, ¿por qué enseñar a través de la indagación?

Como mencionamos al principio, el propósito de este artículo no fue responder dicha pregunta de manera general o teórica, sino utilizar nuestra experiencia al enfrentar una problemática específica en la UACM que, al plantearla de manera clara y dentro de un marco específico, nos condujo a elegir la *indagación guiada* como solución.

Si el lector trabaja con estudiantes que no se muestran interesados, que no parecen aprender, que no pueden aplicar lo aprendido en otros contextos, que no aprueban y desertan o que incluso aquellos que aprueban parecen tener un entendimiento superficial del tema; es posible que el problema se deba a la falta de correspondencia entre las capacidades cognitivas de los estudiantes, sus conocimientos previos y sus hábitos y los cursos que se les están dando. Esta brecha se puede identificar en la práctica a través de la apatía y desinterés por parte de los estudiantes u observar que hacen un gran esfuerzo para memorizar los contenidos del curso que les suele producir mucha agitación y ansiedad.

Si esta descripción corresponde al estado inicial, E_i , de sus estudiantes y su propósito, E_f , es que adquieran conocimiento operativo, desarrollen habilidades de pensamiento crítico, generen hábitos de estudio y reconozcan o identifiquen el gozo de entender por sí mismos (*acompañados* de la intervención docente) entonces esperamos haber establecido que la *indagación guiada* puede ser una propuesta viable de intervención docente, para lograr la transformación.

Más allá nuestra experiencia y de los resultados alentado-

res que hemos obtenido en la UACM, el trabajo de años de grupos como el PEG de la Universidad de Washington han mostrado que la enseñanza de la Física a través de la *indagación guiada* produce buenos resultados respecto a la adquisición de conocimiento operativo, el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico y la generación de hábitos de estudio, (McDermott, 1991; Heron, 2003). Los resultados obtenidos por nuestros estudiantes tienen una correspondencia con los resultados reportados por el PEG, aunque la situación inicial de nuestros estudiantes es distinta a la de sus estudiantes y nuestro alcance es menor. Actualmente estamos trabajando para reportar esta situación.

Resumiendo y con base en nuestra experiencia consideramos que tenemos evidencia para respaldar que la *indagación guiada*:

1. Ayuda a promover un conocimiento operativo o funcional en el sentido definido por Arons y McDermott; es decir, un conocimiento no sólo de hechos o datos sino de la evidencia que los sustenta y de los procesos seguidos para obtenerlos, incluyendo las suposiciones hechas para ello o las limitaciones en su alcance, y es un conocimiento del que se puede dar cuenta (sustentar y justificar) y que se puede aplicar a situaciones diferentes de las que se utilizaron para aprenderlo.

Como ya mencionamos, al interior de la Física (y del resto de las ciencias) hay un orden lógico y metodológico que permite ir resolviendo las diferentes dificultades que surgen dentro de la misma. En retrospectiva es posible estructurar y guiar este proceso de manera lógica y ordenada identificando las evidencias, los razonamientos necesarios y limitaciones para contestar estas preguntas desarrollando, precisamente, un conocimiento operativo.

2. Ayuda a desarrollar habilidades de pensamiento crítico de manera explícita. En relación con el punto anterior, al identificar el orden lógico y metodológico para resolver ciertas preguntas se debe identificar también las habilidades de pensamiento subyacentes o necesarias para hacerlo. Muchos estudiantes, alrededor del 85% en el caso de los estudiantes de la UACM, no cuentan con ellas por lo que, si no se desarrollan, encontrarán dificultades recurrentes para apropiarse de los conocimientos propuestos. La ventaja de la *indagación guiada* es que contribuye explícitamente a desarrollar dichas habilidades pues el propio proceso de la indagación requiere que los estudiantes pongan en marcha dichos procesos mentales como parte de su estructura.
3. La *indagación guiada* planteada en el laboratorio contribuye a que los estudiantes transiten del periodo concreto al formal, en términos piagetianos. Como hemos mencionado y sustentado, la mayoría de nuestros estudiantes no se encuentra en el periodo formal, sino más bien en el concreto o haciendo la transición; por lo que los procesos de razonamiento propuestos deben tener correspondencia con sus capacidades cognitivas (ser vivenciales) para que se involucren activamente en el proceso de aprendi-

zaje. La *indagación guiada* permite establecer las condiciones para generar un conflicto cognitivo (adecuado al estado de los estudiantes) y ofrecer un camino guiado y estructurado (también de acuerdo con el estado cognitivo de los estudiantes) para resolverlo.

Por otro lado, para aquellos estudiantes que se encuentran en el periodo formal, la limpieza conceptual y metodológica que la *indagación guiada* ofrece resulta estimulante ya que encuentra, quizá por vez primera, respuestas claras a sus preguntas y un orden lógico en el proceso de construcción de conocimientos.

4. Contribuye a desarrollar hábitos de estudio y trabajo a la par de la lecto-escritura. Las propias características de un proceso de indagación más el requisito de responder preguntas y registrar por escrito evidencias, razonamientos seguidos y las conclusiones alcanzadas en dicho proceso en una bitácora o en reportes de trabajo o de indagación, demanda en los estudiantes el desarrollo de hábitos de estudio y trabajo autónomo al mismo tiempo que fortalece la lecto-escritura (dado que es la herramienta básica de trabajo).
5. Fomenta el gozo del aprendizaje y del entendimiento. Un proceso de aprendizaje con las características descritas en los puntos anteriores, acompañado por el esfuerzo asociado, permite descubrir a los estudiantes el gozo de aprender y descubrir.

Los resultados que hemos obtenido después de ocho años de implementar estos cursos nos permiten identificar, con base en los diagnósticos que hemos realizado, que el estado real inicial de nuestros estudiantes E_i parece tener correspondencia con el estado que consideramos al diseñar los cursos de IF. Por otro lado, los resultados de las evaluaciones que hemos hecho a lo largo de estos años (y que no sólo corresponden al índice de aprobación) nos sugieren que los estudiantes, después de la intervención docente que planteamos, desarrollan algunos conocimientos de manera operativa y algunas habilidades de pensamiento crítico, a la par de mejorar sus hábitos de estudio, trabajo y lecto-escritura.

Dado que nuestros estudiantes son una muestra de un sector muy numeroso de los estudiantes que terminan el ciclo de educación media superior en nuestro país (y de sus profesores) consideramos que la *indagación guiada* puede ser una solución para tratar de resolver y subsanar las dificultades asociadas con la enseñanza y aprendizaje de la ciencia y en particular de la Física, al menos para estudiantes en condiciones similares. Es importante recalcar que las dificultades que se observan en estudiantes también se observan en profesores (McDermott, 2000) de modo que lo aprendido con los estudiantes de la UACM puede ser extrapolable respecto a algunos profesores de ciclos anteriores al menos en la Ciudad de México. La *indagación guiada* parece ser, entonces, una herramienta valiosa tanto para la formación en ciencia de algunos estudiantes y profesores.

A la luz de la experiencia que hemos tenido, nos parece

que adoptar la *indagación guiada* como método didáctico requiere claridad por parte de los profesores en dos aspectos fundamentales: por un lado debe haber precisión conceptual, metodológica y de las habilidades de pensamiento que subyacen (lógica interna del campo) respecto a los contenidos que se van a enseñar, así como el reconocimiento de las preconcepciones de los estudiantes. Por el otro, debe haber claridad y conocimiento sobre la metodología didáctica utilizada; en particular, respecto a la *indagación guiada* se deben conocer y entender las características del diálogo socrático y de la estrategia de suscitar, confrontar y resolver.

Consideramos que la *indagación guiada* es una buena herramienta que puede utilizarse en los cursos de formación y actualización docentes, pero no se les puede pedir a los profesores que enseñen ciencia utilizando la *indagación guiada*, si no han tenido una experiencia de aprendizaje de esa manera.

A la luz de esto, la formación de profesores requiere de: a) conocimiento profundo del campo disciplinar que se quiere enseñar (Wu, 2002), y b) conocimiento/experiencia profundo en las herramientas didácticas utilizadas. Consideramos que la *indagación guiada* entrelaza elegantemente estos dos aspectos.

Lo anterior nos parece particularmente relevante dado que hoy en día es frecuente encontrar, en cualquier programa o diseño curricular de materias de ciencia, términos como pensamiento crítico, indagación, constructivismo, etc., sin que haya claridad en su significado y sin que los profesores tengan un conocimiento y experiencia directa al respecto.

Esperamos que este artículo contribuya a motivar y dar argumentos a otros profesores para incorporar la indagación como una herramienta didáctica, no desde la teoría, sino con el sustento en alguna evidencia empírica acompañada de argumentos racionales.

5. Bibliografía

- Arons, A. B., *Teaching Introductory Physics*, E.U.A.: Wiley, 1997.
- Belmonte, M., *Mapas conceptuales y uves heurísticas de Gowin: Técnicas para todas las áreas de las Enseñanzas Medias*, Bilbao, España: Ediciones Mensajero, 1994.
- Boudreaux A., Shaffer P.S., Heron P.R.L., and McDermott, L. C., Student understanding of control of variables: Deciding whether or not a variable influences the behavior of a system, *American Journal of Physics*, 76(2), 163-170, 2008.
- Chernicoff, L., *Reporte de Actividad Docente*, México, D.F.: Facultad de Ciencias, UNAM, 2008.
- Delval, J. *Creer y pensar: la construcción del conocimiento en la escuela*, Barcelona, España: Paidós, 1983.
- Flavel, J. H. *La psicología evolutiva de Jean Piaget*. Psicología, México, D.F.: Siglo XXI, Paidós, 1993.
- Furlan, A., Planeación de unidades de trabajo. En: Aportaciones de la didáctica a la enseñanza superior. UNAM, México, D.F., 1979.
- Galagovsky, L. R., Didáctica de las ciencias experimentales. En: Moglia P. y C. Cuesta (comp.), *La formación docente y la investigación en didácticas específicas*. Buenos Aires: Cuadernos del C.E.D.E., UNSAM, 2007.
- Gil, D. y M. Guzmán, *Enseñanza de las Ciencias y la Matemática. Tendencias e Innovaciones*. Biblioteca Virtual O.E.I., 1993.
- Heron P. R. L., Loverude, M. E., Shaffer, P. S., and McDermott, L. C., Helping students develop an understanding of Archimedes' principle,

- Part II: Development of research-based instructional materials, *American Journal of Physics*, **71**(11), 1188, 2003.
- Inhelder, B., and Piaget, J., *The Growth of Logical Thinking from Childhood to Adolescence*. New York: Basic Books, 1958.
- Lowerude, M. E., Kautz, C. H., and Heron, P. R. L., Helping students develop an understanding of Archimedes' principle, Part I: Research on student understanding, *American Journal of Physics*, **71**(11), 1178, 2003.
- McDermott, L. C., et al., Strategies to improve the performance of minority students in the Sciences. En: *Teaching minority students. New directions for teaching and learning*, No. 16, Jossey-Bass, 1983.
- McDermott, L. C., Preparing K-12 teachers in physics: Insights from history, experience and research, *American Journal of Physics*, **74**(9), Editorial, 2006.
- McDermott, L. C., Oersted Medal Lecture 2001: Physics education research – The key to student learning, *American Journal of Physics*, **69**(11), 1127-1137, 2001.
- McDermott, L. C., Guest comment: How we teach and how students learn – A mismatch?, *American Journal of Physics*, **61**(4), 295-298, 1993.
- McDermott, L. C., Millikan Lecture 1990: What we teach and what is learned: Closing the gap, *American Journal of Physics*, **59**, 301-315, 1991.
- McDermott, L. C., Research on conceptual understanding in mechanics, *Physics Today*, **37**(7), 24-32, 1984.
- McDermott, L. C., Heron P. R. L., Shaffer, P. S., Stetzer, M. R., Improving preparation of K-12 teachers through physics education research, *American Journal of Physics*, **74**, 763-767, 2006.
- McDermott, L. C., Redish E. F., RL-PER1: Resource Letter in Physics Education Research, American Association of Physics Teachers, 1999.
- McDermott, L. C., Rosenquist, M. L., van Zee, E. H. Student difficulties in connecting graphs and physics: Examples from kinematics, *American Journal of Physics*, **55**(6), 503-513, 1987.
- McDermott, L. C., Shaffer, P. S., Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding, *American Journal of Physics*, **60**, 994-1003, 1992.
- McDermott, L. C., Shaffer, P. S., Constantinou, C. P., Preparing teachers to teach physics and physical science by inquiry, *Physics Education*, **35**(6), 411-416, 2000.
- McDermott, L. C., Shaffer, P. S., and the Physics Education Group, *Tutorials in Introductory Physics*, E.U.A.: Prentice Hall, 2001.
- McDermott, L. C. and University of Washington. Physics Education Group, *Physics by inquiry. Volume I: an introduction to physics and the physical sciences*. New York: Wiley, 1996.
- McDermott, L. C. and University of Washington Physics Education Group, *Physics by inquiry Volume II: an introduction to physics and the physical sciences*. New York, Wiley, 1996.
- Novak, J. D., Gowin, D. B., *Aprender a aprender*. Barcelona, España: Martínez Roca, 1999.
- Ortiz, L. G, Heron, P. R. L., and Shaffer, P. S., Investigating student understanding of static equilibrium and accounting for balancing, *American Journal of Physics*, **73**(6), 545-553, 2005.
- Piaget, J., *Problemas de la psicología genética*. México, D.F., Ariel Quinceñal, 1980.
- Piaget, J., Beth, E. W., *Epistemología Matemática y Psicología*. Barcelona: Grijalbo, 1980.
- Reif, F., Millikan Lecture 1994: Understanding and teaching important scientific thought processes, *American Journal of Physics*, **63**, 17-32, 1994.
- Remedi, E., Construcción de la estructura metodológica. En: *Aportaciones de la didáctica a la enseñanza superior*, México D.F.: UNAM, 1979.
- Rosenquist, M. L., McDermott, L. C., A conceptual approach to teaching kinematics, *American Journal of Physics*, **55**, 407-415, 1987.
- Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D., Freedman, R. A., *Física Universitaria*. México: Addison Wesley Longman, 1999.
- Shaffer, P. S., McDermott, L. C., Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part II: Design of instructional strategies, *American Journal of Physics*, **60**, 1003-1013, 1992.
- Shaffer, P. S., McDermott, L. C., A research-based approach to improving student understanding of the vector nature of kinematical concepts, *American Journal of Physics*, **73**, 921-931, 2005.
- Trowbridge, D. E., McDermott, L. C., Investigation of student understanding of the concept of acceleration in one dimension, *American Journal of Physics*, **49**, 242-253, 1981.
- Trowbridge, D. E., McDermott, L. C., Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension, *American Journal of Physics*, **48**, 1020-1028, 1980.
- Wu, H., Must Content Dictate Pedagogy in Mathematics Education?, 2005. Consultada por última vez el 11 de septiembre de 2012 en la URL: <http://math.berkeley.edu/~wu/Northridge2004a2.pdf>
- Wu, H., What is so difficult about the preparation of mathematics teachers? [Executive Summary]. Consultada por última vez el 11 de septiembre de 2012 en la URL: <http://math.berkeley.edu/~wu/>
- Wu, H. The role of open-ended problems in mathematics education, *Journal of Mathematical Behavior*, **13**, 115-128, 1994.

Bibliografía complementaria

- Feynman, R. P., *Qué significa todo esto*. Drakontos, Barcelona España: Grijalbo Mondadori, 1999.
- Feynman, R. P., *The pleasure of finding things out*. Cambridge MA. E.U.A.: Basic Books, 1999.
- Feynman, R. P., *The character of physical law*. England: Penguin Books, 1992.
- Heisenberg, W., *The physicist's conception of nature*. New York: Harcourt, 1958.
- Heron, P. R. L., Meltzer, D. E., Guest Editorial: The future of physics education research: Intellectual challenges and practical concerns, *American Journal of Physics*, **73**, 2005.
- Hestenes, D., Who needs physics education research?, *American Journal of Physics*, **66**, 465-467, 1998.