

30. El Proceso de modelización y los modelos científicos: dificultades que tienen los estudiantes para entender y aprender

Oscar Orellana; Carlos Verdugo; Juan Redmond

Resumen I: En este trabajo se discute la posibilidad de una metodología de enseñanza-aprendizaje de los contenidos del conocimiento científico a nivel universitario basada en el proceso de modelización y los modelos científicos. Para alcanzar este objetivo general hemos dividido el presente trabajo en dos artículos. Este primer artículo sirve de contexto general para el segundo artículo y está dividido en cuatro subsecciones, a saber: (1) en la introducción que está dividida en 4 partes se plantea el problema, se hacen algunas críticas y se discute la diferencia entre entender y aprehender; (2) en la segunda sección, que está dividida en seis partes hacemos algunos comentarios y observaciones generales sobre los modelos, el proceso de modelización y su naturaleza; (3) en la tercera sección, que está dividida en seis partes hacemos algunos comentarios y observaciones generales sobre la naturaleza de la ciencia en relación con los modelos y el proceso de modelización; y (4) en la cuarta sección que está dividida en cinco partes hacemos algunas observaciones y comentarios generales acerca de la investigación científica, los modelos y el proceso de modelización.

Palabras Claves: Proceso de Modelización, Modelos Científicos, Aprehender, Comprender, Apropiación, Entender, Investigación Científica, Metodología de la Enseñanza-Aprendizaje de la Ciencia, Método y Herramienta Cognitiva.

I.- Introducción:

1.- En el contexto de la relación estudiante-profesor, *el aprendizaje, así como la comprensión y apropiación de un contenido del conocimiento científico* son principalmente, pero no exclusivamente, procesos internos del estudiante (por lo demás bastante misteriosos, incluso a veces irracionales), los cuales el estudiante alcanza por sí mismo ya sea de manera independiente, o con la ayuda o guía de un profesor, siempre

y cuando primero: el estudiante sea capaz de **explicárselo y entenderlo** por sí mismo; o haya **entendido las explicaciones** de manera independiente (por ejemplo de un libro o internet); o haya **entendido las explicaciones** de un profesor; respectivamente. En otras palabras, normalmente, pero no exclusivamente para llegar a aprender y/o comprender y/o apropiarse de un contenido del conocimiento científico, primero hay que *tener y entender algunas explicaciones acerca del contenido del conocimiento científico a la mano.*

El aprendizaje, comprensión y apropiación de un contenido del conocimiento científico son procesos estrictamente internos y algunas de sus fases o sub-fases son irracionales. En tales procesos intervienen: la imaginación, los sueños, la memoria, las pulsiones, las aprensiones, la intuición, los miedos, las preferencias, las motivaciones, la voluntad, las habilidades, las aptitudes, etc., y a su vez requieren del contenido del conocimiento científico a la mano como objeto externo del aprendizaje, comprensión y apropiación. Mientras que **entender una explicación** acerca de un contenido del conocimiento científico es algo racional (intersubjetivo), cuasi-externo. Tarea que normalmente o tradicionalmente es realizada por un profesor, quien posteriormente profiere y ejerce tales explicaciones frente a los estudiantes para que estos entiendan.

En apoyo a los comentarios hechos en los dos primeros párrafos considere las siguientes “definiciones”: (1) “El aprendizaje humano consiste en adquirir, procesar, comprender y finalmente, aplicar una información que nos ha sido “enseñada”, es decir, cuando aprendemos nos adaptamos a las exigencias que los contextos nos demandan. El aprendizaje requiere un cambio relativamente estable de la conducta del individuo. Este cambio es producido tras asociaciones entre estímulo y respuesta.”(Wikipedia.org); (2) “el aprendizaje es el proceso a través del cual se adquieren o modifican habilidades, destrezas, conocimiento, conductas o valores como resultado del estudio, la experiencia, la instrucción, el razonamiento y la observación.” (Wikipedia.org); (3) “el aprendizaje es un proceso de cambio relativamente

permanente en el comportamiento de una persona generado por la experiencia.” (Feldman, 2005); (4) “el aprendizaje es un sub-producto del pensamiento. Aprendemos pensando, y la calidad del resultado del aprendizaje está determinado por la calidad de nuestro pensamiento.” (Schunk, 1988); (5) “El aprendizaje es el proceso mediante el cual se origina o se modifica una actividad respondiendo a una situación siempre que los cambios no puedan ser atribuidos al crecimiento o al estado temporal del organismo (como la fatiga o estar bajo el efecto de las drogas.” (Ernest Hilgard).

Por cierto, las citas del párrafo anterior requieren mayor desarrollo, porque el aprendizaje ocurre en un contexto mucho más amplio que el que reflejan las citas precedentes. Pero este no es lugar, ni el momento para hacerlo. Tampoco contamos con el espacio y el tiempo para profundizar en el tema del aprendizaje en un contexto neurobiológico de la mente, el pensamiento, la consciencia y el cerebro, aún que otra ocasión podría ameritarlo. En cualquier caso a continuación agregamos algunas citas que contextualizan las citas anteriores, desde el punto de vista de la neurobiología:

(a) Antonio R. Damasio (Neurobiólogo) “En ti hay una presencia que guarda una relación singular con algún objeto. De no existir esa presencia, ¿cómo habría de pertenecerte tus pensamientos? ¿Quién podría decir que así es? La presencia silenciosa y sutil, a veces poco más que un “indicio a medias insinuado”, “ofrenda apenas entendida”, para emplear las palabras de T. S. Eliot. Más adelante propondré que la forma más simple de tal presencia también es una imagen, en realidad el tipo de imagen que constituye un sentimiento. En ese sentido tu presencia es el sentir lo que sucede cuando el acto de aprehender algo modifica tu ser. La presencia jamás descansa, desde el despertar hasta dormir. La presencia debe estar allí o no hay tú.”

“Así, en último término la neurobiología de la consciencia enfrenta por lo menos dos problemas: el problema de la generación de la película en el cerebro, y el problema de cómo el cerebro engendra, además, la sensación de que hay un

dueño y observador del filme. Ambos problemas están tan intrincadamente relacionados que el segundo se cobija en el primero. En efecto, el segundo problema es generar la apariencia de un dueño y observador del filme dentro del filme; y los mecanismos fisiológicos detrás del segundo problema tienen una influencia sobre los mecanismos que subyacen al primero. Ahora bien, pese a la intimidad de los problemas, separarlos es una manera de escindir el problema en partes y tornar más manejable la investigación completa de la consciencia.”

“Vista desde este ángulo, la consciencia consiste en construir conocimiento acerca de dos hechos: que el organismo se involucra en la relación con algún objeto, y que en la relación el objeto produce cambios en el organismo.”

“Desde este marco de referencia, entender la biología de la consciencia se transforma en descubrir cómo el cerebro puede cartografiar los dos actores y las relaciones que mantienen.”

(Extractos de la introducción del libro de Antonio R. Damasio titulado: “Sentir lo que sucede: Cuerpo y emoción en la fábrica de la consciencia)

(b) Rodrigo Pascual (Doctor en Neurociencias): “Pero el “self” no sólo es depositario de información, por compleja que ésta sea; también es agente que actúa hacia un entorno físico, socioemocional y cultural, modificándolo. Así, podemos ampliar el concepto de “self” considerándolo como aquella actividad cerebral que conduce a una percepción o conciencia unificada, coherente y dinámica de nosotros mismos, pero en interacción con otros “selves”. Desde una perspectiva neurobiológica podemos afirmar que es una representación, interpretación y predicción que hace nuestro sistema nervioso acerca del mundo interno y externo, tomando luego sus propias decisiones en cuanto agente actuante en él.”

(Extracto del capítulo (1), pagina 20, del libro de Rodrigo Pascual titulado: “Neurobiología Del Self y Sus Extravíos”)

En consecuencia, cómo se pasa del haber entendido las explicaciones acerca de un determinado contenido del conocimiento científico a aprenderlo, comprenderlo y hacerlo

propio es “un camino largo y pedregoso”. Cómo se pasa de haber entendido las explicaciones acerca de un determinado contenido del conocimiento científico a la encarnación de este en una red neuronal propia (a aprenderlo, comprenderlo, apropiárselo y agenciárselo), requiere de muchísimo entrenamiento, adiestramiento y trabajo personal (si no está convencido de esta afirmaciones pregúntele a cualquier experto en una determinada área del conocimiento: ¿cómo llego a dominar su disciplina?, la respuesta es invariablemente con mucho trabajo y sacrificio). El camino al revés (“el de los genios”) no está prohibido, ni vedado, por el contrario es posible y existen múltiples casos en que primero alguien tuvo una intuición, una visión, un sueño, una imagen, una inspiración, etc., que posteriormente procede a entender y a explicar, para que otros también puedan entenderla. Un ejemplo paradigmático de este tipo caso lo constituye la experiencia del famoso matemático Srinivasa Aiyangar Ramanujan, quien en muchas ocasiones al levantarse de la cama, escribía resultados y fórmulas matemáticas extraordinarias, que trataba de comprobar, aunque no siempre era capaz de dar una demostración rigurosa. Ramanujan solía decir que la diosa de NAMAKKAL le inspiraba las fórmulas en sueños.

En opinión del famoso matemático inglés del siglo pasado G. H. Hardy (ver: “Matemáticas en el Mundo Moderno”, Scientific American, Editorial Blume, Capítulo II Biografías, páginas 87 y 88)): “Los límites del conocimiento de Ramanujan eran sorprendente, como su profundidad. Era un hombre capaz de resolver ecuaciones modulares y teoremas....de un modo jamás visto antes, su dominio de las fracciones continuas era... superior a la de todo otro matemático del mundo; ha encontrado por sí solo la ecuación funcional de la función zeta y los términos más importantes de la teoría analítica de los números; sin embargo no había oído hablar jamás de una función doblemente periódica o del Teorema de Cauchy y poseía una vaga idea de lo que era una función de variable compleja....”

Note que los últimos contenidos de variable compleja mencionados en la cita de Hardy son conocimiento estándar y necesario, para entender la función zeta de Riemann y la teoría analítica de números. Así como Ramanujan, existen muchos casos similares de genialidad tanto en matemáticas, como en otras áreas del conocimiento, que no viene al caso glosar aquí.

En estas notas sumarias no nos referiremos a los casos extraordinarios (a los genios que aprenden aparentemente por sí mismos sin necesidad de ninguna explicación, o a aquellos como decía Kant: “que establecen la regla”), solo nos referiremos a los casos normales que se dan en la relación estudiante-profesor (es decir, a aquellos que inician su proceso de aprendizaje entendiendo las explicación dadas por el profesor) y la contribución y dificultades que podrían hacer y tener, el proceso de modelización y los modelos, respectivamente, como metodología y herramienta (o instrumento) de aprendizaje, comprensión y apropiación de un determinado contenido del conocimiento científico, pasando primero por la explicación y el entender, como elementos básicos de la enseñanza.

Para evitar posibles confusiones dejemos claro una vez más (a riesgo de ser majadero), que el aprendizaje es un proceso principalmente interno, tanto para los genios, como para las personas normales. Pero, las personas normales inician su aprendizaje entendiendo alguna explicación, lo cual por lo demás no garantiza el aprendizaje. El aprendizaje al ser un proceso principalmente interno, se logra con muchísimo trabajo personal. Por cierto existen algunas recetas o técnicas para “aprender a aprender”, unas más exitosas que otras. Pero, no son más que buenas o malas explicaciones de cómo se debe llevar a cabo el trabajo personal, para llegar apropiarse o agenciarse un determinado contenido del conocimiento científico.

Los comentarios y observaciones que siguen a continuación están basados en el conocimiento que tienen los autores acerca de: (1) el proceso de modelización y los modelos científicos en filosofía de la ciencia; (2) el extenso ejercicio de

la docencia en filosofía de la ciencia, lógica y teoría de modelos; y (3) la larga experiencia que tiene uno de los autores dictando cursos de modelización, experimentación en túneles de viento, piscinas de modelación de ondas, modificaciones aerodinámica; y en las investigaciones realizadas por él mismo sobre modelos provenientes de disciplinas tales como: dinámica de fluidos, aerodinámica y perfiles aerodinámicos; economía y finanzas; mecánica cuántica; extracción secundaria de petróleo; “breaking and pinching jets”; propagación de ondas sobre el agua; fenómenos de advección y difusión de contaminantes; etc.

De acuerdo a nuestra experiencia los modelos pueden ser usados como herramientas o instrumentos metodológicos de enseñanza, para ayudar a los estudiantes a iniciar su proceso de aprendizaje acerca del universo y el mundo, incluida la filosofía de la ciencia y la lógica. Los modelos pueden y deben ser usados como base de una buena explicación (los cuales a su vez también requieren de una buena explicación que debiera venir dada por el proceso de modelización correspondiente), porque, por una parte, una porción importante de los contenidos del conocimiento científico están encapsulado en los modelos científicos, y por otra parte, una proporción no menos importante de la investigación científica se hace usando modelos.

Las razones para usar los modelos en lugar de los sistemas que supuestamente representan son múltiples y variadas, a continuación mencionamos algunas: suelen ser más económicos, disminuyen los riesgos, son menos complejo, pueden ayudarnos a descubrir algunos rasgos o hechos acerca del sistema que supuestamente representan, una vez consolidados pueden servir para entregarle conocimiento (teórico y/o práctico) a los estudiantes (sobre todo cuando representan un concepto, una ley o una teoría, y un sistema del mundo físico, como por ejemplo: un perfil aerodinámico, respectivamente), y también pueden servir para razonar acerca de los sistemas que supuestamente modelan. Por ejemplo, podemos estudiar e investigar la dinámica y evolución de zonas criminales en una ciudad dada, estudiando

e investigando el correspondiente modelo. **Pero, aprender usando modelos no es algo fácil.** Entonces tiene sentido preguntarse: ¿cómo es posible aprender usando modelos como vectores del contenido del conocimiento científico? Más, arriba hemos dicho que primero, no solo el profesor o guía, sino que el estudiante en general debe **entender**. Una vez que entienden, con suficiente ejercitación, practica y experiencia personal, puede que aprendan el contenido del conocimiento científico objeto de apropiación. Donde la ejercitación, práctica y experiencia (es decir, las diferentes acciones que puede llevar a cabo un profesor o estudiante en relación con un modelo), apuntan a: hacer suyo el modelo como representación del sistema que supuestamente modela, de alguna manera le saca información al modelo, y por último convierte los resultados obtenidos del modelo en afirmaciones acerca del sistema que supuestamente modela. Sobre estas cuestiones nos extenderemos en la glosa y secciones que siguen a continuación. En particular, haremos varios comentarios relacionados con las dificultades que tienen los estudiantes para aprender con la ayuda y utilización de modelos y en las conclusiones del segundo artículo nos referiremos al problema de transponer el conocimiento obtenido de un modelo en conocimiento acerca del sistema objeto que supuestamente modela, entre otros problemas relacionados con la utilización de modelos para aprender.

2.- Teniendo presente que el aprendizaje es un proceso principalmente interno del estudiante. Es aún más difícil, sino imposible, que un profesor logre que un estudiante inicie su propio proceso de aprendizaje y/o comprensión y/o apropiación de algún contenido del conocimiento científico, si él mismo (el profesor) no lo ha aprendido y/o comprendido y/o hecho suyo. Por lo tanto, en los comentarios que siguen a continuación supondremos que el profesor ha aprendido los contenidos del conocimiento científico que tiene que enseñar y domina el proceso de modelización y los modelos relacionados con tales contenidos del conocimiento científico (hipótesis provisional que complementaremos donde corresponda). Como se afirma en (1), el estudiante típico aprende y comprende por experiencia propia en la medida en

que recrea y “se vive” el conocimiento que ha logrado **entender** ya sea de manera independiente (por ejemplo leyendo y/o viendo y/o escuchando las explicaciones de un libro o internet o las que se pueda dar por sí mismo, respectivamente), o con la ayuda de las explicaciones dadas por un profesor. Es decir, para que un estudiante normal llegue a aprender y/o comprender un contenido científico (y de esta forma llegue a apropiárselo), primero tiene que **entender las explicaciones** acerca de tal contenido del conocimiento científico.

3.- Un profesor avezado es aquel que encuentra los medios para que un estudiante **entienda** un determinado contenido del conocimiento científico (práctico, conceptual o teórico), llevando a cabo acciones tales como: (a) hacer excelentes descripciones de la realidad problemática (por ejemplo, de un fenómeno u objeto que se quiere modelar); (b) da buenas explicaciones que van de la complejidad de la realidad problemática a una simplificación de la misma, dejando claro las: modificaciones, abstracciones, eliminaciones, neutralizaciones, distorsiones, hipótesis provisionales, etc. que se han hecho (para por ejemplo, llegar a un modelo, o concepto, o ley, o teoría); (c) utiliza ejemplos paradigmáticos que dejen ver y permitan la generalización y escalamiento del mismo (como por ejemplo, un perfil aerodinámico); (d) ilustra el contenido desde diferentes puntos de vista; (e) hace experimentos concretos y mentales; (f) utiliza diferentes metodologías entre las cuales se encuentran los modelos científicos; (g) otras acciones.

4.- Como hemos dicho en el último párrafo del apartado (1), el **entendimiento** de una proporción no menor de los contenidos del conocimiento científico (conceptual, teórico o práctico), esta encapsulado y se puede lograr con la ayuda de modelos. Pero, no es trivial lograr que los estudiantes **entiendan** algún contenido del conocimiento científico (conceptual, teórico o práctico), utilizando modelos. En efecto, existen una serie de dificultades a superar, detectadas en la práctica de la enseñanza utilizando modelos, que iremos señalando durante el desarrollo de este trabajo.

Por ejemplo, si el problema a modelar es de naturaleza física, algunas de las dificultades que tienen los estudiantes dice relación con el volumen y diversidad cognitiva que debieran tener acerca de: los conceptos, leyes y teorías físicas involucradas en el fenómeno; el lenguaje matemático pertinente o adecuado; los modelos previos y/o básicos que involucra el problema; un poco de filosofía de la ciencia y epistemología; la distinciones entre un problema metafísico, lingüístico y epistemológico; etc. Además, de poseer competencias o habilidades tales como: capacidad de abstracción y buena imaginación; habilidades manuales; saber usar instrumentos de medición; saber interpretar; etc. En otras palabras, el estudiante debe dominar varios campos semióticos y prácticos diferentes, saber transitar de uno a otro de ida y de vuelta, y saber combinarlos (por ejemplo, si se trata de modelar un problema de mecánica clásica, el estudiante debe saber combinar y dominar al menos los campos semióticos correspondientes a: la geometría, el álgebra, el cálculo diferencial e integral y la mecánica clásica), y desde el punto de vista práctico debe tener las habilidades y competencias para: levantar la información relévale y pertinente del problema a tratar, trabajar en un laboratorio haciendo experimentos, utilizar los instrumentos de medición e interpretar los resultados de manera efectiva y eficiente, todo lo cual frecuentemente es mucho pedir, desde el punto de vista de la “economía de la enseñanza” (ver: “Misión de la Universidad” de José Ortega y Gasset).

II. Algunos Comentarios y Observaciones Generales Sobre los Modelos, el Proceso de Modelización y Sus Naturalezas

5.- Un modelo es siempre el modelo de algo, hecho por alguien a partir de algo, con algún propósito u objetivo o intención, en un contexto definido, y con una forma, modo o manera determinada de aproximarse al algo como sistema objeto a modelar. Por lo tanto, un modelo es siempre la simplificación de algo a una cierta escala espacio-temporal y en consecuencia es artificial. En este sentido un modelo es un

artefacto o artilugio que representa algunos aspectos del “sistema objeto” a la correspondiente escala espacio-temporal, y que el científico usa, por ejemplo, para explicar (y en el mejor de los casos predecir) el comportamiento de objetos, fenómenos, sistemas, o procesos. Los modelos como herramienta y metodología de investigación son usados en disciplinas científicas diversas que van de la física y la química a la ecología, las ciencias de la tierra, la filosofía de la ciencia, las matemáticas y la lógica.

Los modelos también son usados para ilustrar de manera más simple, explicar y describir: conceptos, teorías, objetos, fenómenos, sistemas y procesos, en la sala de clase frente a los estudiantes, con el objetivo principal de que el estudiante **entienda**. Pero, muchas veces el profesor se queda en las explicaciones, soluciones y conocimiento del modelo, olvidando, por una parte, explicar la correspondencia y relación que existe entre el modelo y el sistema objeto que supuestamente modela, y por otra parte, también olvida hacer la transposición del conocimiento obtenido del modelo al conocimiento del sistema objeto que supuestamente modela. Todo lo cual forma parte del proceso de modelización. En consecuencia, queda trunca la explicación del concepto, teoría, objeto, fenómeno, sistema, o proceso más complejo, y no se logra el objetivo de entendimiento principal de partida.

6.- En el contexto de la formación y aprendizaje universitario, los propósitos de la utilización de modelos se pueden resumir en cuatro, a saber: (6.1) producir formas más simples de un concepto, o teoría, u objeto, o fenómeno, o sistema, o proceso; (6.2) representar conceptos o teorías de diferentes grados de complejidad y objetos, fenómenos, sistemas y procesos de diferentes escalas espacio-temporales, particularmente de aquellos objetos, fenómenos, sistemas y procesos, que se manifiestan a pequeñas y grandes escalas espacio-temporales, tales como: átomos, núcleos, súper novae, la atmosfera terrestre, el sistema solar, microbios, bacterias, ADN, etc.; (6.3) permitir el **entendimiento o visualización** de conceptos ,o teorías ,u objetos ,o fenómenos, o sistemas, o procesos, y a partir de allí proveer

los estímulos necesarios, pero no suficientes, para aprender o generar conceptos, imágenes, o teorías, que a su vez le permitan **entender y visualizar**, por ejemplo un objeto, o fenómeno, o sistema, o proceso; lo cual a su vez constituya la base para aprender y/o comprender, por ejemplo el objeto, fenómeno, sistema, o proceso a la mano; y en consecuencia (6.4) proveer la explicación y/o descripción, por ejemplo de un objeto, fenómeno, sistema, o proceso científico.

7.- En el proceso de modelización intervienen: el “algo” o sistema objeto (lo que deseamos entender), el modelador o fuente de un cierto bagaje de conocimiento (algo conocido para nosotros a partir de nuestra vida diaria, o experiencias previas, o conocimiento acumulado) y finalmente el modelo (lo que nos ayuda a hacer el puente entre el sistema objeto y el modelador o fuente). Así, el proceso de modelización se puede decir que envuelve la transferencia de algunos rasgos o aspectos del modelador o fuente del conocimiento al sistema objeto y viceversa. En cierto sentido, el proceso de modelización es un mapeo de ida y vuelta de algunos rasgos o aspectos entre el modelador o fuente del conocimiento y el sistema objeto. Tales aspectos o rasgos se actualizan de algún modo, manera o forma en el modelo.

En general, el proceso de modelización consiste en la generación de una representación física, conceptual, o matemática de un concepto, teoría, objeto, fenómeno, sistema, o proceso real, que es difícil de entender, u observar, respectivamente.

8.- Puesto que el proceso de modelización envuelve simplificaciones del algo o sistema objeto, se sigue que el modelo es una versión más simple del algo o sistema objeto y comparte tan solo algunos atributos con el algo o sistema objeto. En consecuencia, la extensión de los atributos que comparten “el algo” (o sistema objeto), el modelador o fuente del conocimiento, y el modelo, varían. Debido a esto el modelo y “el algo” o sistema objeto en algunos casos pueden ser de muchas maneras bastante diferentes. Esto no debe ser tomado a mal, porque esta es una característica intrínseca y beneficiosa de los modelos y del proceso de modelización. De

hecho, debido a que los modelos son más simples que los sistemas objetos de modelización, podemos ignorar detalles irrelevantes o sin importancia, y enfocarnos en las facetas más interesantes o importantes del “algo” o sistema objeto.

9.- Algunos modelos son simples, como por ejemplo: un dibujo dos dimensional o una estructura de bolas y varillas para ilustrar algunos aspectos de la geometría molecular en moléculas pequeñas. Otros modelos son altamente complejos, como por ejemplo modelos de la estructura atómica que se estudian en cromodinámica cuántica.

10.- Los términos “modelo” y “modelización” se usan de muchas maneras. En consecuencia, existen varias tipologías de modelos con pretensiones taxonómicas (exhaustiva y completa), que se han desarrollado desde el punto de vista científico (sin mencionar aquellas que se han desarrollado en filosofía de la ciencia y epistemología), para clasificar los modelos, por ejemplo y utilizando la “definición” de modelo dada en el apartado (5): (a) se puede usar el propósito o uso del modelo (que puede ir desde el concepto o fenómeno de interés, al modelo usado por un individuo o modelo mental); (b) la naturaleza del modelo (que puede ir de modelos físicos a modelos conceptuales o simbólicos); (c) la disciplina a la que pertenece el modelo y/o el modelador (matemático, físico, químico, biológico, económico, financiero, sociológico, psicológico, cognitivo, etc.); (d) forma, modo o manera de aproximación al “algo” o sistema objeto; entre otros criterios o medidas clasificatorias. Pero, ninguna ha logrado el objetivo ordenador de ser exhaustiva y completa. Es decir, una clasificación exhaustiva y completa de los modelos científicos es un problema abierto, tanto desde el punto de vista científico, como de la filosofía y epistemología de la ciencia, y es muy probable que permanezca así, lo cual no significa que no se deba intentar una sistematización del proceso de modelización y una clasificación de los modelos.

Por cierto, sería de gran ayuda para el tema principal tratado en este artículo (es decir, para la utilización de los modelos como metodología de la enseñanza y el aprendizaje), el que dichos problemas estuvieran resueltos. Por lo tanto, se

mantendrán en el trasfondo y volveremos sobre ellos en lo que sigue a continuación, pero sin el ánimo de resolverlos.

III.- Algunas observaciones y comentarios generales sobre la naturaleza de la ciencia en relación con los modelos y el proceso de modelización:

11.- Como dijimos previamente, los modelos tienen un cierto número de propiedades fundamentales, como por ejemplo: son una invención o descubrimiento humano o una construcción mental; son una simplificación del “algo” o sistema objeto; son un artificio o artilugio o artefacto; etc. Como tales, ellos representan una aproximación a la realidad, o una versión simple y limitada del “algo” o sistema objeto. Por lo tanto, inevitablemente representan un entendimiento incompleto de la entidad, o fenómeno, o sistema, o proceso a la mano. Entonces, se podría decir que los modelos están errados o limitados en algunos aspectos claves. En consecuencia, en el presente trabajo asumimos que los modelos son intrínsecamente limitados, porque el entendimiento y conocimiento humano nunca empatan la realidad. Sin embargo, estas limitaciones no han detenido ni al hombre de ciencia, ni a la ciencia en general en su afán y objetivo de lograr mayor conocimiento acerca del mundo que nos rodea. Todo lo contrario, basta observar el mundo en que vivimos, para darnos cuenta del éxito notable, que ha tenido la tecno-ciencia. Artefactos tecnológicos tales como: GPS; computadoras; teléfonos celulares; satélites; escáneres; aviones; motores de búsqueda; simuladores; sistemas expertos; etc.; son el producto de la tecno-ciencia y los correspondientes modelos.

12. Muchos modelos tienen limitaciones evidentes (reconocibles inmediatamente), las cuales pueden ser de mucha utilidad a la hora de usar o poner a trabajar el modelo. Por ejemplo, considere la mecánica de Newton. Ciertamente esta teoría que contiene un modelo del espacio físico como sistema de fuerzas que actúan a distancia instantáneamente (el problema de la acción a distancia), no funciona bien cuando los objeto se mueven a grandes velocidades y debe

ser sustituida por el modelo de espacio físico de la teoría especial de la relatividad (el espacio curvo en el cual ninguna información puede viajar más rápido que la velocidad de la luz). Pero, localmente y a velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz, el modelo de espacio newtoniano funciona perfectamente bien y a nadie se le ocurriría tirarlo al “tarro de la basura”.

Aún que en general a nadie se le ocurría calcular la distancia recorrida por un automóvil, o la distancia entre dos paredes de un dormitorio, usando la teoría general o especial de la relatividad, hoy ya existen artilugios como el así llamado Global Localization System (GPS) y sistemas de medición basados en la luz (rayos láser) y su velocidad, que nos permiten calcular la distancia recorrida por un automóvil y la distancias entre dos paredes de un dormitorio de manera muchísimo más precisa que con los medios técnicos antiguos, sin movernos del lugar en que estamos parado. Pero, si queremos explicar por qué los muones que se generan al chocar los rayos solares con la atmosfera terrestre a una distancia de más o menos 2 kilómetros de distancia de la superficie de la tierra y que tienen una vida propia de aproximadamente 2 micrones (milisegundos), un 40% de ellos chocan con la superficie de la tierra, no utilizaríamos el modelo del espacio newtoniano, si no que la teoría especial de la relatividad, porque los muones se mueven a una velocidad cercana a la de la luz. Más aún, de acuerdo a la mecánica de Newton ningún muon chocaría con la superficie de la tierra, mientras que de acuerdo a la teoría especial de la relatividad si llegarían. En otras palabras todo modelo tiene su rango de aplicabilidad, fuera del cual no es válido. Debido a esto mismo, todo modelo es usado y abusado hasta que se encuentran sus propias limitaciones, las cuales pasan a formar parte integral del modelo.

13.- Lo que es particularmente interesante en relación con la naturaleza de la ciencia es que aunque los modelos de un mismo sistema objeto tengan limitaciones e incluso sean contradictorios entre sí, esto no significa que son descartados. Los fines que persigue la ciencia son diferentes de los fines

que persigue el epistemólogo. Aquí es pertinente considerar la siguiente cita de A. Einstein (ver: "Philosopher-Scientist", Evaston, Library of Living Philosophers, 1949, page 684): *"La ciencia sin epistemología es (en la medida que sea concebible) primitiva y confusa. Sin embargo, tan pronto como el epistemólogo, que busca un sistema claro, se abre camino a través de él, tiende a interpretar el contenido especulativo de la ciencia según los parámetros de ese sistema y a rechazar lo que no encaje en él. El científico, por el contrario, no puede permitirse un esfuerzo tan grande para alcanzar una epistemología sistemática. Por lo tanto, aparece ante el epistemólogo sistemático como un oportunista sin escrúpulos"*. Por ejemplo, considere la aplicación que hizo Stephen Hawking de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad (dos teorías mutuamente contradictorias) a la termodinámica de los hoyos negros.

Pero esa no es la única diferencia: (a) los epistemólogos distinguen las leyes fenomenológicas de las leyes teóricas. Según ellos las primeras son acerca de las apariencias y las segundas son acerca de la realidad detrás de las apariencias, las cuales llaman observables y no observables, respectivamente. Pero, los físicos hablan de observable y no observable cuando quieren hacer la distinción entre ley fenomenológica (meramente descriptiva) y ley fundamental (explicativa); (b) claramente para más de un filósofo (particularmente para el realista metafísico) la realidad es algo inobservable. Pero, para los físicos la realidad es algo diferente. Entre otras propiedades, la realidad para los físicos, en última instancia, no solo tiene que ser observable ya sea de manera directa o indirecta (por medio de artilugios tecnológicos), sino que también tiene que ser medible en la manera, modo o forma en que lo hacemos pragmáticamente con las cosas en nuestra vida ordinaria de todo los días; (c) "When philosophers discuss the laws of nature, they speak in terms of universality and necessity. Science too knows the terminology of laws, both in title (Ohm's law, the law of conservation of energy), and in generic classifications (laws of motion, conservation laws, constitutive laws). Scientists,

however, do not speak of law in terms of universality and necessity, but in terms of symmetry, transformations, and invariance” (ver: Bas C. Van Fraassen: “Laws and Symmetry”, introduction, page 1).

Por cierto, en física existen cosas que no se pueden observar y medir de esa manera pragmática y directa a que hemos aludido más arriba, en esos casos se construyen modelos consistentes con nuestra limitada experiencia de la vida diaria y los datos fenomenológicos que se tengan a la mano. En física teórica también existen teorías y modelos que son relativamente a priori, pero tales teorías y modelos tiene valides especulativa solamente, en otras palabras no tienen ninguna valides desde el punto de vista pragmático, hasta que no pasan las correspondientes pruebas experimentales y se concilian con los correspondientes datos fenomenológico y mediciones pertinentes.

En este contexto aparece una diferencia en la forma, modo o manera en que el científico y el estudiante se aproximan y utilizan los modelos. Los científicos entienden y ven los modelos de una manera funcional y utilitaria. Los científicos entienden la naturaleza de los modelos y los usan de manera pragmática, sabiendo cuáles son sus limitaciones y que frecuentemente deben ser modificados. Los estudiantes, no necesariamente tienen esta comprensión de los modelos, y en consecuencia tienden a pensar en los modelos en términos concretos y por lo tanto no se dan cuenta de sus limitaciones, esto se debe en parte al éxito notable que han tenido algunos modelos, como por ejemplo el modelo de Watson y Crick para la estructura del ADN, o la teoría especial de la relatividad, o los modelo del átomo en mecánica cuántica. Lo cual a su vez, puede llevar a los estudiantes a confundir el modelo de un concepto, teoría, objeto, fenómeno, sistema o proceso, con la realidad o sistema objeto, e incluso sustituir la realidad por el modelo, cometiendo la “falacia de la concreción fuera de lugar” (“fallacy of misplaced concreteness”; Alfred N. Whitehead: “Proces and Reality”).

14.- Detrás de la presente discusión esta la eterna controversia realismo v/s anti realismo. Las posiciones anti

realista de toda índole, se reducen casi siempre al solipsismo o al escepticismo radical, las cuales son posiciones filosóficas respetables e irrefutables. Pero, ninguno de nosotros, en la calidad de educadores, sería capaz de asumir tales posiciones sinceramente. En consecuencia, en el presente trabajo se adopta un realismo moderado, que no cree que la realidad sea independiente de nuestras acciones y lenguaje. Si no que más bien como seres intrínsecos, situados y tan reales como él o lo que más, tenemos una relación pragmática con ella (la realidad), lo cual se refleja en una cierta correspondencia entre el lenguaje y la realidad. Lenguaje, que por lo demás es tan real como las manzanas, los burros, nosotros, los cerros, los planetas y las galaxias. De todas maneras, sería importante discutir aspectos tales como: la sub determinación de las teorías por los datos; la carga teórica de la observación; la inconmensurabilidad de las teorías; y la realidad de los objetos científicos, en relación con los modelos. Pero, este no es el lugar, ni el momento para hacer tal discusión.

15.- Otro aspecto relevante en este contexto es que los científicos frecuentemente usan múltiples modelos para por ejemplo: describir algo, o explicar un fenómeno, o representar una tabla de datos. En particular, se usan múltiples modelos, tanto en física, como en química, cuando se desea dar a entender o desarrollar el entendimiento de conceptos microscópicos, como por ejemplo: la estructura atómica y los enlaces químicos.

Nuevamente, aquí se pueden apreciar diferencias significativas de como un científico y un estudiante ven y usan modelos múltiples de un mismo concepto, teoría, objeto, fenómeno, sistema, o proceso. El uso pragmático y conocimiento de las limitaciones de los diferentes modelos hacen que el científico los use para entender diferentes aspectos de un mismo problema, mientras que el estudiante o un neófito pueden enredarse en aparentes contradicciones entre los modelos.

16.- En el uso de múltiples modelos de un mismo fenómeno u objeto, pueden existir modelos complejÍsimos que son muy precisos y exactos en relación con el sistema objeto y otros pueden ser muy simples y cualitativos respecto del mismo sistema objeto. Pero, esto no quiere decir que los modelos cuantitativos y sofisticados son superiores a los modelos simples y cualitativos; porque por ejemplo un modelo simple puede establecer una analogía fecunda a la hora de levantar una teoría. Por ejemplo, Maxwell levanto toda su teoría sobre el electro-magnetismo, usando un modelo analógico cualitativo basado en dinámica de fluidos. Debido a ello las ecuaciones de Maxwell están plagadas de rotacionales y divergencia.

IV.- Comentarios y Observaciones Generales acerca de la Investigación Científica, los Modelos y el Proceso de Modelización

17.- Como ya lo notamos en el último párrafo del apartado (1), no hay ninguna duda, que los modelos y el proceso de modelización son parte importante del quehacer científico y que los modelos juegan diferentes funciones en la investigación científica, entre las cuales podemos destacar: (a) descubrimiento (formación o generación de nuevo conocimiento, conceptos, y formulación de hipótesis); (b) desarrollo de (nuevas teorías y experimentos), evaluación de (hipótesis, teorías, argumentos) y; (c) exposición (explicar teorías, hipótesis, conceptos).

18.- Aún que no existe una receta, ni un conjunto de reglas generales, para crear un modelo. De acuerdo a nuestra experiencia y groso modo, el proceso de modelización tiene al menos seis etapas, a saber: (1) focalización de la realidad problemática, o problema central: concepto, teoría, objeto, fenómeno, sistema, o proceso a ser modelado como sistema cerrado o abierto; (2) aproximación a dicha realidad problemática utilizando la ciencia y la tecnología a la altura de los tiempos (levantamiento en el lenguaje adecuado a la naturaleza del problema); (3) simplificación, abstracción, modificación, eliminación, neutralización, etc. de algunos aspecto de la realidad problemática; (4) aplicación de las leyes

consistentes con la naturaleza de la realidad problemática, hipótesis provisionales, y aplicación del lenguaje matemático (si es que corresponde), para diseñar y explicitar el modelo; (5) sacarle información al modelo: experimentación, simulación, resolución, etc.; (6) calibración o modulación del modelo, para comparar los niveles de precisión, o imitación, o de analogía, etc., de este respecto del sistema que supuestamente modela.

19.- En relación con el proceso de modelización es importante hacer hincapié en la dinámica del proceso de modelización y los modelos que genera, porque los datos y evidencia directa e indirecta que se tienen a la mano son reconsiderados constantemente. En consecuencia, la relación entre los datos y la evidencia directa o indirecta y el modelo desarrollado por los científicos para explicar y/o describir los datos y evidencia a la mano es revisada iterativamente. En otras palabras, los pasos enumerados previamente se recorren una y otra vez generándose un círculo virtuoso, cuyo objetivo es obtener un modelo que represente adecuadamente el “algo” o sistema objeto en los aspectos o caracteres seleccionados, a la escalada espacio-temporal correspondiente.

20.- La aceptación o rechazo de un modelo se relaciona con el propósito para el cual fue creado el modelo, lo cual se lleva a cabo utilizando los criterios o medidas definidas para modular o calibrar el modelo respecto del concepto, teoría, objeto, fenómeno, sistema, o proceso, que supuestamente representa. La medida de un modelo se define utilizando los modos, formas o maneras en que nos aproximamos al sistema objeto y los rasgos o aspectos del sistema objeto supuestamente representados por el modelo.

21.- Resumiendo, la modelización y los modelos constituyen un proceso para desarrollar, comparar, y testear diferentes modelos en competencia de una realidad problemática bien definida como sistema. Pero, ningún modelo es perfecto. Si bien es cierto que el proceso de modelización es una metodología fundamental de la ciencia moderna, los modelos científicos productos del proceso de modelización (en el mejor

de los casos) son una buena aproximación en cierto sentido y a una cierta escala espacio-temporal de los conceptos, teorías, objetos, fenómenos, sistemas, o procesos, que representan. Los modelos no son réplicas exactas del “algo” o sistema objeto. Los científicos están constantemente buscando la manera de mejorar, refinar, complementar, calibrar y/o modular sus modelos de cara al “algo” o sistema objeto.

Reconocimiento: El presente trabajo ha sido financiado en parte por la Universidad Técnica Federico Santa María, Casilla 110-V, Valparaíso, Chile, y por el proyecto FONDECYT titulado: Modeling in Science and Abstract Objects: for a fictional artefactual approach”, número 1141260, 6 de Marzo de 2014.

Bibliografía

1. Duval, R., Lang, P. (1995). *Semiosis y Pensamiento Humano: Registros semióticos y aprendizajes intelectuales*, S.A. Editions scientifiques européennes.
2. Duval, Raymond. (1999). *Argumentar, demostrar, explicar: ¿continuidad o ruptura cognitiva?* Grupo Editorial Iberoamericano.
3. Caldwell, J. and Douglas K. S. Ng (2004). *Mathematical Modelling: Case Studies and Projects*, Kluwer Academic Publishers.
4. William F. Lucas (Ed.) (1978). *Modules in Applied Mathematics: Volumes 1 (Differential equations models), 2 (Political and related models), 3 (Discrete and system models), and 4 (Life science models)*, Springer-Verlag.
5. Friedman, A. and Littman, W. (1994) *Industrial Mathematics: A Course in Solving Real-World Problems*, SIAM.

* * *