

01087 2
2ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

**ESTRUCTURA Y PROCESOS DE INFERENCIA EN LAS
IDEAS FÍSICAS DE LOS ESTUDIANTES: MODELOS
SEMIFORMALIZADOS SOBRE IDEAS PREVIAS**

Tesis
que para obtener el grado de
Doctor en Pedagogía

presenta:

FERNANDO FLORES CAMACHO

Director de Tesis
Dr. Marco Rigo Lemini

México, D. F.

273167

1999

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAG INACIOM

DISCONTINUA.

A mi esposa Lety con quien tengo la alegría de compartir mis ideas y mi vida

A mis hijos Lety, Fer y Rodri.

Agradezco profundamente al Dr. Marco Rigo Lemini quien con amabilidad y profesionalismo apoyó la realización de este trabajo.

Agradezco al Centro de Instrumentos por el apoyo institucional que me ha brindado.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	i
CAPÍTULO I. MODELOS COGNOSCITIVOS Y MODELOS MENTALES	
MENTALES	1
1.1 Modelos Cognoscitivos	2
1.1.1 <i>Modelos que tienen origen en las ciencias cognoscitivas</i>	2
1.1.2 <i>Modelo basado en procesos cognoscitivos evolutivos: La teoría psicogenética</i>	3
1.2 Modelos mentales	5
1.3 Modelos mentales sobre la construcción y el aprendizaje de los conceptos físicos	7
1.3.1 <i>Modelos mentales basados en sistemas y en diferencias entre expertos y novatos</i>	7
1.3.2 <i>Modelos conceptuales y cognoscitivos a partir de las ideas previas</i>	11
1.4 Los modelos mentales y cognoscitivos en la enseñanza de la ciencia	26
1.5 Propuesta para la construcción de modelos para la representación y el aprendizaje de la Física	27
CAPÍTULO II MODELOS DE CONJUNTOS PARA LA REPRESENTACIÓN DE LAS IDEAS DE LOS ESTUDIANTES DE FÍSICA	
DE FÍSICA	30
2.1 Marco teórico: El enfoque de la teoría de conjuntos sobre la estructura de los modelos	30
2.1.1 <i>Modelo de una teoría</i>	33
2.2 El enfoque de la teoría de conjuntos sobre la estructura de los modelos, aplicado a las teorías físicas	34

2.2.1 <i>La estructura lógica de la mecánica clásica de partículas en términos de los modelos de conjuntos</i>	36
2.2.2 <i>La estructura lógica de la estática de fluidos en términos de los modelos de conjuntos</i>	39
2.3 Estructura general de teoría	42
2.3.1 <i>El conjunto Modelo Potencial Posible M_{pp}</i>	42
2.3.2 <i>El conjunto Modelo Posible M_p</i>	43
2.3.3 <i>El conjunto Modelo M</i>	43
2.3.4 <i>Condiciones de Ligadura o Constricciones C</i>	44
2.4 Una propuesta para las representaciones de las ideas de los estudiantes	45
2.4.1 <i>Aplicación a la física escolar</i>	45
2.4.2 <i>De los modelos teóricos a los modelos representacionales</i>	46
2.5 Equivalencia elementos teóricos - conceptos constrictores	47
2.5.1 <i>El caso de la mecánica clásica: Fuerza y movimiento</i>	47
2.5.2 <i>El caso de la estática de fluidos</i>	52
2.6 Equivalencia elementos no teóricos - Reglas de correspondencia	54
2.7 Conceptos constrictores y reglas de correspondencia: condiciones y criterios que los definen	57
2.7.1 <i>Criterios y condiciones para el conjunto Conceptos Constrictores</i>	57
2.7.2 <i>Criterios y condiciones para el conjunto Reglas de Correspondencia</i>	60
2.8 Construcción de inferencias con los conceptos constrictores y las reglas de correspondencia	63

CAPÍTULO III MODELOS PARCIALES POSIBLES:

REPRESENTACIÓN DE LA CONCEPTUALIZACIÓN

FÍSICA DE LOS ESTUDIANTES 66

3.1 Modelos Parciales Posibles: Estructura 66

3.2 Ideas previas de los estudiantes en mecánica	70
3.3 Ideas previas en estática de fluidos	77
3.3.1 <i>Descripción del estudio</i>	78
3.4 Modelos Parciales Posibles. Una representación para las ideas de los estudiantes	80
3.4.1 <i>Modelos parciales posibles para el caso de mecánica</i>	80
3.4.2 <i>Modelos parciales posibles de los estudiantes en Mecánica: Fuerzas y movimiento</i>	90
3.4.3 <i>Modelos Parciales Posibles de los estudiantes sobre presión y flotación</i>	97
3.4.3.1 <i>Modelo parcial posible sobre presión y flotación en gases. (M_{ppG})</i>	97
3.4.3.2 <i>Modelo parcial posible de los estudiantes sobre presión y flotación en líquidos. (M_{ppL})</i>	105
3.5 Aplicación de los modelos resultados de entrevistas	111

CAPÍTULO IV: LOS MODELOS PARCIALES

POSIBLES Y EL CAMBIO CONCEPTUAL	116
4.1 Cambio conceptual su naturaleza y sus implicaciones en el aprendizaje de la Física	116
4.2 El cambio conceptual en la enseñanza de la Física	117
4.2.1 <i>Tendencias actuales en el cambio conceptual</i>	126
4.3 Representación del cambio conceptual con los modelos parciales posibles	132
4.3.1 <i>Transformación de modelos representacionales para describir el cambio conceptual en las ideas de los estudiantes</i>	137
4.4 Proceso conceptual de la transformación de modelos	143

CAPÍTULO V: IMPLICACIONES DE LOS MODELOS PARCIALES POSIBLES PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA	145
5.1 Implicaciones	145
5.1.1 <i>Aportaciones de los modelos parciales posibles a la comprensión de las ideas previas</i>	146
5.1.2 <i>Aportaciones de los modelos parciales posibles a la comprensión del cambio conceptual</i>	148
5.1.3 <i>Implicaciones de los modelos parciales posibles para la investigación en enseñanza de la ciencia</i>	151
5.1.4 <i>Modelos parciales posibles en otros campos de la Física</i>	152
5.1.5 <i>Redes de modelos</i>	152
5.1.6 <i>Modelos parciales posibles en otros campos de la ciencia</i>	152
5.1.7 <i>Los modelos parciales posibles en la investigación sobre solución de problemas</i>	153
5.1.8 <i>Los modelos parciales posibles y el cambio conceptual</i>	153
5.1.9 <i>Los modelos parciales posibles y la historia de la ciencia</i>	153
5.1.10 <i>Los modelos parciales posibles y su relación con la inteligencia artificial</i>	154
5.2 Aportaciones de los modelos parciales posibles a la enseñanza de la Física	154
 CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	157
ANEXO: LAS IDEAS PREVIAS	161
REFERENCIAS	165

INTRODUCCIÓN

El problema de la enseñanza y aprendizaje de la ciencia se ha constituido en uno de los retos más significativos para la enseñanza y para la comprensión de la construcción del conocimiento. A partir de las investigaciones en este campo se ha generado gran diversidad de enfoques y modelos teóricos y prácticos. Esto ha ocurrido así, debido a que en este problema se conjugan dos aspectos del estudio del conocimiento. La construcción de conceptos y teorías científicas y el reto que siempre ha presentado la enseñanza de los conceptos científicos¹. En la investigación sobre enseñanza de la ciencia ambos elementos se han integrado generando diversos enfoques y posiciones, así como distintas formas de investigación.

Por ejemplo, en los trabajos de Piaget y sus colaboradores, el problema epistemológico y el de construcción de estructuras de conocimiento están estrechamente relacionados y prácticamente la totalidad de sus contribuciones, en cuanto a procesos cognoscitivos, parten del análisis en los sujetos de la génesis de nociones sobre aspectos fenomenológicos que atañen a la ciencia, en especial la Física y las Matemáticas.

El surgimiento mismo del constructivismo como enfoque orientador de la enseñanza, tiene también ese origen dual que se encuentra por un lado, en las propuestas psicológicas, que reconocen en el sujeto (individual y colectivo) el constructor de nociones y representaciones que llevarán a la formación de los conceptos y, por otro, en el análisis histórico y epistemológico de la ciencia que ha mostrado los mecanismos dinámicos de la construcción de las teorías científicas.

Esta situación ha llevado a la investigación en la enseñanza de la ciencia a dar prioridad a los aspectos conceptuales como el surgimiento de las nociones científicas, la representación o generación de modelos, los vínculos con la historia y las posibles formas de transformación conceptual. Entre esos caminos de investigación destacan las ideas previas o preconcepciones que focalizan la atención de investigadores y docentes por sus implicaciones para dar cuenta de lo que ocurre en el aula. En especial, la generalidad que presentan estas ideas en investigaciones llevadas a cabo en diversas latitudes y su resistencia a ser modificadas por las acciones escolares, dieron origen a una revisión de las formas de enseñanza y precipitaron la adopción del enfoque constructivista.

Con las ideas previas surge el problema de su transformación, lo que da lugar a diversos enfoques e investigaciones sobre el cambio conceptual. El cambio conceptual se convierte en un paradigma de la enseñanza de la ciencia y en su entorno, se agrupan diversas concepciones sobre la naturaleza del conocimiento. En especial, los aspectos epistemológicos que tienen como fundamento la dinámica de la construcción de nociones y teorías científicas parecen adecuados para sustentar la idea del cambio conceptual como aprendizaje. Sin embargo, el problema del cambio conceptual ha resultado sumamente complejo desde diversos puntos de vista: El teórico, puesto que, por una parte, el aspecto de la construcción de los conceptos científicos es un tema de discusión abierto y por otra, no se cuenta con la claridad suficiente sobre los mecanismos cognoscitivos que implican el cambio conceptual. El práctico, porque los intentos para lograr en el aula el cambio

¹ De Boer G. E. (1991) *A History of ideas in Science Education. Implications for Practice*. The Teacher College Press. Columbia University. New York.

conceptual con los modelos disponibles, no presentan resultados concluyentes y sí una diversidad de posibles interpretaciones sobre lo que ocurre en clase.

Ante la situación presentada, se ha comenzado a retomar la investigación sobre los modelos cognoscitivos y mentales por un lado y por el otro, el de representación de los procesos y de estructuración conceptual. El estudio de los modelos mentales y cognoscitivos y de representación de estructuras de pensamiento, se ha visto favorecido por el desarrollo computacional y, sobre todo, por los enfoques de las denominadas ciencias cognoscitivas. Sin embargo, es necesario apuntar que también la revisión sobre las ideas centrales de la epistemología y psicología genética, así como una estrecha vinculación entre historia de la ciencia y epistemología, han brindado interesantes enfoques a la comprensión de los modelos cognoscitivos, en especial, para el caso de la Física.

Un aspecto que no ha sido suficientemente abordado, tanto en la investigación sobre cambio conceptual como en la de representación y modelos, es la vinculación entre las estructuras de conocimiento de los estudiantes y la de las teorías físicas. Sean éstas como se enseñan en la escuela o las propias de la física formal. Este es, sin embargo, un aspecto muy importante porque si no se establecen esos vínculos, difícilmente se podrá contar con un referente para el cambio conceptual y para una representación que permita diferenciar las formas de inferenciación y significación de los estudiantes de las teorías físicas.

Se considera necesario abordar este problema porque los conceptos no son entidades aisladas y libres de estructura y, por el contrario, no tienen sentido ni posibilidad de representar la naturaleza sin esa estructura². Las teorías físicas implican entonces, no sólo los conceptos y leyes, sino su interrelación, formalismo y mecanismos de evaluación y falsación.

El motivo de este trabajo es realizar un intento para contribuir a la solución de este problema para lo cual se presenta la elaboración un modelo de representación que permita, bajo una estructura de conjuntos e inferencia común, comparar los modelos de las teorías físicas con los de los estudiantes. Representación que denomino "Modelos Parciales Posibles". Estos modelos serán conjuntos formados a partir de las ideas de los estudiantes acerca de un campo de conocimiento de la Física y permitirán la clasificación en dos tipos de elementos, aquellos que los sujetos usan como referentes básicos o fundamentales y los que utilizan como relaciones entre factores. Los modelos también contendrán un proceso inferencial para construir posibles predicciones sobre fenómenos físicos y criterios para la determinación de los elementos de los conjuntos que los constituyen.

El proceso metodológico seguido para la construcción del modelo teórico propuesto, contempla fundamentalmente dos aspectos. Uno que implica la construcción del modelo basado en consideraciones teóricas y otro, su aplicación con ideas previas de los estudiantes obtenidas a partir de dos fuentes de base empírica. El proceso es el siguiente:

- (a) Se lleva a cabo una revisión sistemática de diversos modelos mentales y cognoscitivos elaborados por diversos autores para representar la conceptualización de las nociones físicas de los estudiantes. Del análisis de esos trabajos se precisa qué nuevas consideraciones y aproximaciones es necesario hacer para dar solución al problema de representación planteado.

² Flores Fernando y Gallegos Leticia (1993) Consideraciones sobre la Estructura de las Teorías Científicas y la Enseñanza de la Ciencia. *Perfiles Educativos* N.62 pp24-30

- (b) A partir de considerar los elementos del análisis crítico hecho a los modelos estudiados, se lleva a cabo la descripción de la construcción del modelo propio. Esta construcción parte de los fundamentos de la teoría de modelos con una aproximación de conjuntos y, con base en ello, se elabora una propuesta que sea aplicable a las características conceptuales de los estudiantes. Para ello, se tomaron en consideración las características cognoscitivas de las ideas de los alumnos y la estructura de los conceptos de la Física. El modelo teórico propuesto requirió de la determinación de nuevas categorías conceptuales denominadas "conceptos constrictores" y "reglas de correspondencia" así como un conjunto de condiciones que deben ser cumplidas por las ideas previas de los estudiantes para poder ser clasificadas en las categorías correspondientes.
- (c) Un factor importante para una propuesta que contribuya a resolver el problema de caracterizar las conceptualizaciones de los estudiantes y compararlas con las de la Física, es la posibilidad de establecer una transición entre ambas representaciones. Para ello, fue necesario en el proceso de definición y construcción de los modelos, analizar la posibilidad de la transición y construir modelos específicos de la física escolar, en este caso, de las fuerzas y el movimiento y de la estática de fluidos.
- (d) Para dar cuenta de la capacidad del modelo teórico propuesto de representar - además de la física escolar - las concepciones de los estudiantes, el modelo fue aplicado a sus ideas previas para los temas físicos que se tomaron como referente en el trabajo. Estas ideas previas, se obtuvieron de dos fuentes. Las correspondientes a las fuerzas y movimiento - ideas previas en mecánica - fueron tomadas de una revisión de las investigaciones más significativas que sobre ideas previas en este campo se han llevado a cabo en los últimos años. La muestra de trabajos analizados fue amplia, confiable y lo extensa que se tiene en la literatura internacional. Por ello, se considera que son datos relevantes para determinar la funcionalidad del modelo teórico propuesto. Por otro lado, en el tema de estática de fluidos se tomaron datos de un trabajo empírico propio en el cual se determinaron las principales ideas previas de los estudiantes en aspectos como flotación y presión. Este trabajo cuenta con entrevistas exhaustivas a estudiantes que contribuyen a validar la capacidad del modelo teórico para representar las ideas e inferencias de los estudiantes.
- (e) Finalmente, se lleva a cabo una propuesta para representar con el modelo teórico procesos de cambio conceptual que serán, a fin de cuentas, los procesos aplicables en situaciones de enseñanza.

Como puede apreciarse de los propósitos y de la metodología propuesta, en el presente trabajo se pretende contriuir con una aproximación teórica a la construcción de modelos de representación de las ideas que sobre los conceptos y fenómenos físicos tienen los estudiantes -principalmente del nivel bachillerato -. La validación del modelo propuesto se lleva a cabo, sin embargo, con ideas previas obtenidas de manera empírica por diversos investigadores en el caso de la mecánica y, para el caso de los fluidos, por un trabajo previo del cual se indican las referencias y el proceso metodológico seguido para obtenerlas.

El trabajo se presenta en cinco capítulos que brevemente se describen a continuación.

El primero, consiste en una revisión de los desarrollos sobre modelos mentales y cognoscitivos en general y en particular sobre los elaborados para representar las ideas de los estudiantes acerca de los conceptos de la Física. Esta revisión conlleva un análisis sobre las investigaciones más representativas indicando sus alcances y limitaciones. Al final del capítulo, se presenta un balance de esas aportaciones mostrando la necesidad de completar esos desarrollos con una propuesta que incorpore el problema de la relación entre la estructura de las teorías físicas y la representación de los estudiantes. Se plantea el propósito del trabajo y su justificación.

En el segundo capítulo, se lleva a cabo un análisis detallado de la estructura de la mecánica clásica de partículas y de la estática de fluidos a partir del modelo de teoría de conjuntos para establecer un formalismo lógico-matemático. Posteriormente, se hace una adecuación al formalismo para abarcar la física escolar, esto es, la física que se enseña en la escuela, que en general no tiene el formalismo axiomático de las teorías expresadas en su estructura matemática. Hacia el final de este capítulo, se hacen las adecuaciones de los modelos para poder representar las concepciones de los estudiantes y se determinan los criterios conceptuales que deben cubrir las ideas de los estudiantes para ser ubicadas en dos conjuntos específicos; los conceptos constrictores y las reglas de correspondencia que jugarán un papel central en los modelos parciales posibles.

En el tercer capítulo, se realiza un análisis de las ideas previas que se tienen reportadas en la literatura sobre el tema de fuerzas y movimiento. Se describen y sintetizan las investigaciones más relevantes en este campo. Para las ideas previas sobre la estática de fluidos, se toman los resultados de una investigación que, en colaboración, realizamos previamente donde se determinaron las ideas previas de los estudiantes del bachillerato de la UNAM. Con las ideas previas obtenidas, se construyen a manera de ejemplo, los modelos parciales posibles para ambos casos: fuerza y movimiento y estática de fluidos. Con ello se muestra la posibilidad de elaboración y descripción que tienen los modelos propuestos para representar las concepciones de los estudiantes y sus formas posibles de inferenciación. Con los modelos parciales posibles de las ideas de los estudiantes, se deducen, para el caso de la mecánica, ideas previas que están reportadas en las investigaciones sobre el tema y que los modelos muestran que no son fundamentales en el sentido de constituir una base explicativa para los estudiantes, lo cual se explica porque pueden ser deducidas de otras ideas que son parte del núcleo del modelo. También se muestra la posibilidad de los modelos parciales posibles para representar las concepciones que sobre otros fenómenos relacionados al tema tienen los estudiantes, para lo cual se aplican los modelos parciales posibles y se muestra cómo las inferencias deducidas a partir del modelo para la estática de fluidos, corresponde con lo que los estudiantes elaboran, por ejemplo, en una entrevista sobre flotación.

En el capítulo IV se aborda el problema del cambio conceptual. Se inicia con una descripción y análisis del tema a partir de las investigaciones y propuestas más importantes y se hacen notar sus diferencias así como la situación actual en la que se encuentra este campo. Los modelos parciales posibles se aplican para describir una posible situación de cambio conceptual utilizando el desarrollo histórico de la estática de fluidos y se sugieren algunas consideraciones para representar y promover el cambio conceptual en los estudiantes.

En el capítulo V se llevan a cabo algunas consideraciones sobre las implicaciones de los modelos parciales posibles en la comprensión de las ideas previas y el cambio conceptual. También se proponen algunas implicaciones para la investigación en enseñanza de la ciencia en aspectos como la solución de problemas y la inteligencia artificial.

El trabajo culmina con el capítulo VI en el que se apunta una serie de consideraciones y conclusiones que se desprenden de los modelos parciales posibles, orientadas hacia la reflexión teórica sobre las implicaciones de los modelos propuestos en el campo de la investigación en enseñanza de la ciencia

CAPÍTULO I

MODELOS COGNOSCITIVOS Y MODELOS MENTALES

Uno de los problemas más importantes de la investigación sobre la formación de conceptos en la enseñanza de la ciencia ha sido el desarrollo de representaciones o modelos que permitan ante diversas situaciones, interpretar los problemas de aprendizaje. En especial, en la investigación sobre el aprendizaje de las ciencias, este tema se ha abordado de manera sistemática, lo que ha permitido la construcción de modelos de diversa índole. Desde aquellos que esquematizan una serie de pasos y procesos hasta los que construyen estructuras simbólicas (matemáticas y lógicas) y llevan a cabo consideraciones epistemológicas.

Estos desarrollos tienen origen en los modelos cognoscitivos generales que intentan describir el conocimiento de los sujetos. Estos modelos generales nacen de dos vertientes; por un lado, a partir de la psicología cognoscitiva y por el otro de la psicología genética. En la primera se encuentran aquellos desarrollos cognoscitivos cuyo origen se tiene en las denominadas ciencias cognoscitivas y cuya hipótesis básica es la correspondencia entre los procesos cognoscitivos de los sujetos y los que se establecen con las computadoras. En la segunda, se tienen los desarrollos que se sustentan en una concepción de evolución de estructuras cognoscitivas que se constituyen de esquemas operacionales (concretos y abstractos).

Actualmente es posible diferenciar entre dos tipos de modelos que cumplen con el propósito de construir referentes para interpretar los procesos y mecanismos de comprensión de los sujetos. Los que se denominan "**modelos cognoscitivos**" que tienen como propósito principal la creación de estructuras generales para la comprender la cognición humana y artificial y los "**modelos mentales**" que a diferencia de los modelos cognoscitivos, son construcciones basadas en contenidos particulares en un sentido amplio, esto es, conceptos, situaciones y procesos. A continuación se presenta una breve descripción de los modelos cognoscitivos y posteriormente de los modelos mentales

1.1 Modelos Cognoscitivos

1.1.1 Modelos que tienen origen en las ciencias cognoscitivas

Dentro de esta línea, se han desarrollado dos corrientes principales para la construcción de lo que se denominan arquitecturas de la mente o para la representación de la mente¹: La arquitectura simbólica y la arquitectura conexionista. La arquitectura simbólica descrita por Newell, Rosenbloom y Laird² establece las estructuras y funciones

¹ Una arquitectura es un diseño fundamental que especifica un sistema de procesamiento de información. Simon H y Kaplan C. (1990) Foundations of Cognitive Science. en Posner M (ed). *Foundations of Cognitive Science*. The MIT Press. Cambridge.

² Newell Allen; Rosenbloom Paul & Laird John (1990) Symbolic Architectures for Cognition en Posner (ed). *Foundations of Cognitive Science*. MIT Press. Cambridge.

del procesamiento humano de información de manera equivalente a una computadora, no sólo en la descripción de procesos, sino también en su conformación, esto es, en su estructura funcional. La denominación de "simbólica" radica en que la arquitectura reconoce y procesa símbolos (que en el caso de las computadoras son vectores de bits). Estos modelos, tienen un procesamiento lineal, es decir, establecen secuencias temporales de pasos o procesos. Dentro de sus estructuras se encuentran aspectos como memorias a corto y largo plazo, procesador, entradas y salidas, etc. Con estos modelos se han creado sistemas inteligentes (inteligencia artificial) que simulan por ejemplo, el reconocimiento de patrones y tareas simples. Estos sistemas simulan procesos como los que pueden realizar lo sujetos cuando se tienen claramente definidas las funciones, los conocimientos y un conjunto de reglas claramente especificadas. El desarrollo de estos modelos es, desde luego, dependiente del desarrollo tecnológico de los sistemas de cómputo.

Más interesante y prometedora parece la arquitectura conexionista que tiene como base el funcionamiento neurofisiológico para construir modelos computacionales que simulen tareas cognoscitivas. Esta aproximación conexionista asume que existe un conjunto de unidades procesadoras que se interrelacionan en paralelo para llevar a cabo tareas cognoscitivas complejas. "La estrategia básica de la aproximación conexionista es tomar como unidad de procesamiento fundamental algo cercano a una neurona abstracta. Imaginamos que la computación es llevada a cabo a través de interacciones simples entre esas unidades de procesamiento. Esencialmente la idea es que esos elementos de procesamiento envían números por medio de líneas que las conectan. Esta identificación provee de constricciones interesantes sobre la clase de algoritmos que pueden subyacer en la inteligencia humana."³ El marco de referencia sobre el que se basan los modelos conexionistas (entre ellos las redes neuronales) consiste de: (a) un conjunto de unidades de procesamiento; (b) un estado de activación; (c) un patrón o esquema de conexiones; (d) reglas de activación; (e) reglas de aprendizaje y (f) un medio ambiente. Con estos elementos se construyen los modelos de forma que las conexiones entre cada unidad tengan parámetros específicos de activación y de conjunción, siempre en función de estados de entrada y procesos internos (llamadas unidades ocultas) y de estados de salida.

Debe notarse que en las unidades ocultas se pueden establecer los procesos de corrección que definen algoritmos de aprendizaje. Estos modelos conexionistas que funcionan en paralelo, presentan diversas ventajas sobre los modelos lineales, entre esas ventajas se encuentra la posibilidad de aprendizaje⁴, la solución de tareas complejas compartiendo funciones entre las diversas unidades y la de satisfacer constricciones o restricciones que cierto tipo de problemas pueden presentar, al incorporar esas restricciones en el proceso de interacción (reglas de conectividad) entre las unidades de procesamiento.

Entre los temas que se han desarrollado actualmente en la aproximación conexionista se encuentran aplicaciones en neurociencias, aprendizaje y generalización,

³ Rumelhart David (1990). *The Architecture of Mind: A Connectionist Approach*. En Posner M (ed). *Foundations of Cognitive Science*. The MIT Press, Cambridge.

⁴ Por aprendizaje, se entiende aquí el mejoramiento en la ejecución de una acción o procedimiento por medio de mecanismos de retroalimentación.

mecanismos computacionales y aplicaciones en ramas como la Física, la Psicología y la Ingeniería.

Los modelos cognoscitivos no solo se han construido para representar de manera genérica la arquitectura de los procesos cognitivos. También se han desarrollado con ellos modelos sobre los procesos del conocimiento científico⁵. Un estudio interesante es el desarrollado por Nowak y Thagard⁶ quienes desarrollaron un modelo computacional de tipo asociacionista que trabaja en paralelo y que presenta cómo se puede decidir entre dos teorías científicas a partir de sus conexiones. Para ello toman el caso de Copérnico y Ptolomeo. Analizaron los libros de cada uno de ellos "De revolutionibus" de Copérnico y el "Almagesto" de Ptolomeo y encuentran, para una serie de hechos observables, las hipótesis de cada uno. Con estos datos y la posibilidad de relaciones explicativas el programa es capaz de valorar ambas teorías y decidir por la de Copérnico como la mejor de ellas. Este tipo de programas deciden sobre relaciones, determinan reglas de coherencia y no coherencia para las relaciones, así como de competencia entre hipótesis y presentan con ello, una nueva forma de aproximarse a la revisión histórica de la ciencia.

También se han abordado a través de las redes neuronales, problemas de estructuración del conocimiento en el aspecto epistemológico donde, a partir de programas de este tipo, se infieren representaciones sobre la naturaleza del conocimiento científico como por ejemplo las tesis de Feyerabend⁷

1.1.2 Modelo basado en procesos cognoscitivos evolutivos: La teoría psicogenética

Este es el caso de la psicología y la epistemología genéticas que fueron desarrolladas por Piaget y sus colaboradores en las décadas de los cincuenta a los setenta. Esta teoría del desarrollo del conocimiento y de los procesos cognoscitivos tiene como fundamento al sujeto como constructor de conocimiento a partir de su interacción con la realidad, así como los mecanismos para interpretarla. Esta construcción es un proceso que el sujeto va elaborando de manera evolutiva o genética. Este desarrollo lleva implícito que el sujeto construye mecanismos abstractos y reguladores de acción e interpretación bajo el supuesto de una lógica operatoria que funciona tanto en la acción práctica como en la acción con categorías abstractas; es una especie de marco lógico funcional y estructurado que es construido a partir de la interacción. Como Piaget apunta, "Como lo hemos dicho antes, todo observable está siempre vinculado a una interpretación y ésta comporta necesariamente, por una parte, significaciones, pero también, por otra parte, vínculos inferenciales entre éstas o en función de las precedentes. Y esas inferencias tanto implícitas como explícitas, no podrían consistir, desde sus formas elementales, sino en implicaciones entre esquemas de acciones."⁸ Los esquemas de interacción y significación que los sujetos

⁵ Una interesante recopilación de estudios cognitivos sobre los modelos y procesos cognitivos relativos a la construcción del conocimiento científico se encuentra en Giere (ed.) *Cognitive Models of Science*. Serie Minnesota Studies in the Philosophy of Science. University of Minnesota Press. 1992

⁶ Nowak G & Thagard P. (1992). Copernicus, Ptolomy, and Explanatory Coherence. en Giere R.(ed.) *Cognitive Models of Science*. University of Minnesota Press pp 274 - 309

⁷ Churchland P. M. (1992). A Deeper Unity: Some Feyerabendian Themes in Neurocomputational Guise. en Giere R. (ed.) *Cognitive Models of Science*. University of Minnesota Press. pp 342 - 366

⁸ Piaget J. y García R. (1989). *Hacia una lógica de significaciones*. Gedisa Editorial. México

construyen a lo largo de su desarrollo, pueden en general, caracterizarse por sus posibilidades de acción en niveles o estadios que, desde luego, no son entidades rígidas y absolutas que todos los sujetos deban desarrollarlas de la misma manera, sino que son posibilidades de acción e interpretación determinadas por el propio desarrollo de los sujetos. Como mecanismos psicológicos, la psicología genética establece dos procesos; el de acomodación y el de asimilación, que son complementarios y que son regulados por un proceso de equilibración. La equilibración permite al sujeto interaccionar de manera suficiente con los objetos y con los significados. Sin embargo, el equilibrio es temporal, y ante nuevas situaciones se pasará al desequilibrio para continuar el proceso de reestructuración de los esquemas cognoscitivos y sus operaciones implícitas.

Las operaciones que los sujetos construyen tienen que ver con reglas de interpretación generales como la invariancia, la reversibilidad, la conservación etc., que aparecen a lo largo del desarrollo de los sujetos y en función de sus interacciones con el medio.

Para Inhelder y Piaget, el estadio más amplio y que permite que al sujeto llevar a cabo interacciones de manera abstracta con la realidad, es lo que denominan "estadio de las operaciones formales"; en el cuál el sujeto es capaz de operar con entes no sólo abstractos sino posibles, es decir, puede hacer inferencias sobre conceptos y situaciones que pueden ocurrir y no sobre hechos observados. Para ello, se proponen mecanismos cognoscitivos modelables a través de una lógica de conjuntos con grupos de operaciones como el semi-grupo INRC⁹.

En todo el desarrollo cognoscitivo propuesto en la psicología genética, el sujeto es un constructor de significados y procesos, para lo cual requiere lo que Piaget denomina "toma de conciencia"¹⁰, Es decir, que el sujeto pueda dar sentido consistente y coherente a sus acciones por medio del reconocimiento de procesos invariantes como las conservaciones y las reversibilidades. Esta toma de conciencia es un proceso complejo que implica que las nociones que el sujeto construye, se van convirtiendo en elementos explicativos y por consiguiente causales.

Los planteamientos contruidos a partir de la epistemología y psicología genéticas, han sido muy amplios y de diversa índole, desde aquellos que tienen que ver directamente con los procesos educativos, hasta los que han orientado la investigación cognoscitiva y epistemológica. En cuanto al desarrollo de modelos, esta teoría ha contribuido de manera notable a dar sustento a diversos modelos elaborados para interpretar lo que ocurre en la enseñanza de la ciencia como se verá más adelante.

La propia teoría piagetiana, plantea la posibilidad de a través de un formalismo lógico, dar cuenta de los procesos de construcción de inferencias sobre el comportamiento de algún proceso. Así, a partir de lo que Piaget denomina "operaciones concretas" los sujetos construyen formas inferenciales que tienen características que las hace útiles para trabajar variables así como procesos reversibles que implican el reconocimiento de las reciprocidades y las negaciones.

⁹ Inhelder B y Piaget J. (1972) *De la lógica del niño a la lógica del adolescente*. Ed Paidós. Buenos Aires

¹⁰ Piaget J. (1981) *La toma de conciencia*. Ediciones Morata. Madrid.

El pensamiento abstracto que se alcanza el nivel de las "operaciones formales" es modelado por Piaget e Inhelder como una lógica combinatoria, esto es, por un conjunto de dieciséis operaciones binarias (afirmación, negación, conjunción, incompatibilidad, disyunción, negación conjunta, implicación, no implicación, implicación recíproca, negación de la implicación recíproca, equivalencia, exclusión recíproca, la afirmación de una proposición, la negación de una proposición, afirmación de la proposición correlativa, negación de la proposición correlativa) bajo las cuales, los sujetos construyen inferencias posibles o elaboran hipótesis sobre el comportamiento de una variable, por ejemplo en términos de su supresión o cancelación¹¹.

Desde luego, que las operaciones binarias funcionan bajo un esquema lógico de segundo orden o regulador que tiene características al menos de grupo algebraico (semi-grupo INRC). Este modelamiento lógico de los procesos cognoscitivos del sujeto, es uno de los aspectos que más se han cuestionado del trabajo de Piaget. En especial, porque parecen no corresponder a un modelo genérico que explique situaciones anómalas, como los razonamientos que efectúan sujetos situados por debajo de las edades correspondientes al pensamiento formal y sobre todo por no dar cuenta de otro tipo de problemas conceptuales a los que se enfrentan los sujetos con contenidos específicos para los cuales la lógica combinatoria y su estructura de grupo quedan limitados para explicarlos.

A continuación se describirán algunos de los modelos para el aprendizaje de la Física, desarrollados desde las dos vertientes presentadas. En primer lugar se presentarán los desarrollados a partir de las ciencias cognoscitivas y después los elaborados tomando en cuenta la epistemología y psicología genéticas.

1.2 Modelos mentales

En otro nivel de representación se encuentran los modelos mentales. Éstos se han constituido en un campo de investigación sobre diversos aspectos como representaciones espaciales y visuales, modelos sobre el discurso, modelos sobre el razonamiento y sobre las diferencias entre expertos y novatos entre los más significativos. Johnson-Laird¹² en una amplia descripción del tema, establece que los modelos mentales fueron inicialmente formulados por Kenneth Carig (1943) quien los definió como un proceso en el que "los seres humanos trasladan los eventos externos en modelos internos y razonan para manipular esas representaciones simbólicas". Estos modelos en general, deben verse como representaciones dinámicas o simulaciones de la realidad (del mundo externo). Los modelos mentales son así, construcciones que representan simbólicamente o por medio de imágenes mentales situaciones que son referidas por el lenguaje. Como afirma Johnson-Laird¹³ "hay abundante evidencia de que la coherencia de un discurso depende en parte de cuán fácil es construir un solo modelo mental del él".

¹¹ Inhelder B y Piaget J. (1972) Op. cit. pp247-259

¹² Johnson-Laird P.N (1990). Mental Models. en Posner M (Ed) *Foundations of Cognitive Science*. MIT Press Cambridge pp 469 - 499

¹³ Ibid.

La investigación sobre modelos mentales, asume que los sujetos por medio de ciertos símbolos construyen representaciones o analogías correspondientes a la realidad, esto implica que son construcciones centradas en el sujeto y que no es posible establecer de manera unívoca, un modelo mental para cada situación y para la generalidad de los sujetos. Incluso, un mismo sujeto puede utilizar diversos modelos mentales para situaciones semejantes.

Por otro lado, se infiere también que los esquemas que construyen los investigadores son a su vez modelos mentales sobre los propios modelos. Esto lleva a una situación sumamente compleja si se pretende que los modelos construidos sean fieles a los procesos que describen, pero se torna una situación simple cuando se reconoce que los modelos son construcciones que permiten comprender ciertos tipos de representación y de razonamiento de los sujetos, sin pretender identificarlos con sus formas de pensamiento.

Esta interpretación sobre los modelos abre un amplio panorama para comprender ciertos aspectos del conocimiento de los sujetos por medio de los modelos mentales. En particular, los procesos físicos que son cercanos a la realidad inmediata de los sujetos, pueden ser analizados por medio de modelos de los modelos y comprender con esas construcciones los posibles problemas que se presentan. Por ejemplo, en las preconcepciones o ideas previas que generalmente están basadas, como describe diSessa,¹⁴ en primitivos fenomenológicos.

Un argumento importante que establece Johnson-Laird es que las teorías basadas únicamente en representaciones lingüísticas (simbólicas y estructurales) no dicen nada acerca de cómo las palabras se relacionan con el mundo, por lo que es necesario que se cuente con un referente, esto es, con la posibilidad de interpretar a través de las palabras y los símbolos, hechos, procesos e ideas. Efectivamente, las palabras al requerir de un referente, evocan un objeto, una situación u otros símbolos dentro de una estructura como podemos decir de las Matemáticas y la Física. Sin este referente que permita una simulación de una realidad externa, cognoscible solo a través de la representación, no sería posible inferir (ni inductiva ni deductivamente) ningún hecho contingente.

Los modelos mentales plantean, ante ciertas interpretaciones, el problema de la relativización del conocimiento por ser considerados construcciones personales. Sin embargo, hay que hacer notar que este aparente relativismo, es el mismo que se presenta en toda visión constructivista del conocimiento y que se resuelve por la posibilidad de compartir modelos semejantes por medio de representaciones socializadas, y por ende, trasladables de un modelo a otro por formas subyacentes generales del conocimiento (que bien pueden ser los aspectos estructurales puramente simbólicos como la lógica o bien bajo estructuras más complejas como las piagetianas). Esta característica los hace particularmente fructíferos para comprender aspectos como las representaciones de los estudiantes en Física sobre situaciones fenomenológicas y las correspondientes preconcepciones. Lo anterior posibilita explicar cómo los sujetos construyen nociones

¹⁴ diSessa A. (1983) Phenomenology and the evolution of intuition. En Gentner D. Y Stevens A. (eds) *Mental Models*. Lawrence Erlbaum associates. Pub. Pp 15-34

basadas en situaciones que no tienen una interpretación física adecuada, pero que sirven de modelo de funcionamiento de la realidad física inmediata.

Ante esta posibilidad diversos estudios sobre las representaciones físicas de los estudiantes se han llevado a cabo, a continuación se describirán algunos de los más significativos.

1.3 Modelos mentales sobre la construcción y el aprendizaje de los conceptos físicos

1.3.1 Modelos mentales basados en sistemas y en diferencias entre expertos y novatos

Los modelos mentales sobre la comprensión de los procesos físicos, tienen diversas formas y enfoques. Algunos se centran sobre los procesos de razonamiento, otros sobre la descripción funcional de los sistemas físicos, otros sobre esquemas sistemáticos de ciertas clases de fenómenos y otros más sobre aspectos abstractos y simbólicos. Esta diversidad implica que los modelos mentales son dependientes del contexto y de las expectativas y alcances de comprensión determinados por el investigador. Sin embargo, son valiosos elementos heurísticos para analizar la naturaleza de la construcción de las nociones científicas en los sujetos y para apoyar los procesos de enseñanza - aprendizaje.

Los modelos que se describirán a continuación, son representativos de esta diversidad. Serán analizados en términos de su estructura y sus implicaciones para comprender los problemas conceptuales en el aprendizaje de la Física; en especial en los temas que se abordarán en este trabajo: la mecánica de partículas y los conceptos de presión y flotación en fluidos.

Uno de los primeros modelos que ha tenido gran influencia en la investigación sobre las nociones físicas de los estudiantes es el desarrollado por A. diSessa¹⁵ quien plantea, en primer lugar, que los sujetos no construyen nociones completas y coherentes sobre una realidad fenomenológica, sino "pedazos". Así, las representaciones de los sujetos son entidades que atienden, describen o explican una sola situación particular y no forman parte de una visión totalizadora sobre una clase extensa de fenómenos naturales. diSessa plantea que los sujetos construyen a partir de su interacción con la realidad elementos básicos que denomina "primitivos fenomenológicos". Éstos, son constructos derivados de manera directa de la fenomenología con la que el sujeto tiene contacto cotidianamente, y constituye una base o sustrato sobre el que se interpretan los fenómenos y elaboran explicaciones, predicciones y aplicaciones.

Sobre esta base de los primitivos fenomenológicos, diSessa¹⁶ describe que el sujeto cuando hace sus inferencias e interpretaciones utiliza un proceso de reorganización y reconocimiento de los primitivos fenomenológicos. El reconocimiento puede darse en dos niveles; uno en el que el sujeto atiende a ciertas pistas que considerará prioritarias (*cuing priority*) y que son las que le parecen más sugerentes y, por otro lado, cuando el

¹⁵ diSessa A. (1988) Knowledge in pieces. En Forman G. Y Pufall P. (Eds) *Constructivism in the computer age*. Lawrence Erlbaum Associates Inc. Hillsdale NJ. Pp 49-70

¹⁶ diSessa A. (1983) Op. cit.

sujeto atiende a ciertas nociones confiables porque han sido sistemáticamente adecuadas en diversas situaciones previas (*reliability priority*). A partir de esos elementos se da un proceso de inducción y de retroalimentación que permite a un sujeto, no solo brindar una replicación a un fenómeno específico en términos de los primitivos fenomenológicos seleccionados, sino analizarlo y, en su caso, transformarlo por un reordenamiento o reorganización mental de sus concepciones prioritarias.

Debe notarse que este modelo también permite explicar (en términos de concepciones prioritarias) las dificultades de los sujetos para aceptar otros primitivos fenomenológicos distintos a los que él ha dado prioridad para tenerlos como elementos explicativos de ciertas situaciones físicas. Uno de los ejemplos que proporciona es el de un estudiante de física que, ante un problema que no logra explicar del todo, se muestra renuente a aceptar la sugerencia del investigador con la cuál se explica el fenómeno por considerarla ajena a la situación física según sus propios primitivos y jerarquías entre esos primitivos que ha previamente establecido¹⁷.

Con este modelo, diSessa explica las ideas intuitivas de los estudiantes en términos de que "son una larga colección de primitivos fenomenológicos en función de los cuales ellos ven el mundo y a los cuales apelan como explicaciones autocontenidas de lo que ven"¹⁸. Este autor a partir de los elementos expuestos, planteará un esquema más formalizado con otro tipo de consideraciones - no sólo cognoscitivas - en particular consideraciones epistemológicas como se analizará más adelante en este capítulo y en el tercero.

Otro modelo basado en el estudio de las diferencias entre expertos y novatos, es el de Larkin¹⁹ quien en primera instancia clasifica como "representación ingenua", la de los novatos y como "representación física" la de los expertos. Las diferencias entre ambas las resume en el siguiente cuadro:

Representaciones Ingenuas	Representaciones Físicas
Entidades familiares	Entidades físicas
Inferenciación por simulación (siguiendo el flujo del tiempo)	Inferenciación constreñida
Distante de los principios físicos	Cercano a los principios físicos
Estructura de árbol, solo una fuente de inferencia	Estructuras gráficas, fuentes redundantes de inferencia
Propiedades difusas de las entidades	Propiedades específicas de las entidades

¹⁷ El caso específico es de una esfera metálica que rebota en una superficie dura. El estudiante puede describir en términos de conservación de la energía el problema, pero es incapaz de describir la situación cuando ocurre el contacto entre la esfera y la superficie rígida. El investigador plantea entonces que se haga la consideración de la deformación de las superficies en el impacto y se emplee el modelo del resorte ante lo que el estudiante no acepta, por dar prioridad a otros elementos que considera más fundamentales como la supuesta rigidez de los materiales que colisionan.

¹⁸ diSessa A.(1983) Op. cit. p 32.

¹⁹ Larkin Jill (1983) The Role Problems Representation in Physics. En Gentner & Stevens (eds.) *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers. N Jersey. pp 75 - 98

Como puede apreciarse en la tabla, las concepciones ingenuas están centradas en las características observables y “familiares” de un proceso físico. Por ejemplo, en un problema de física los estudiantes lo abordan en términos de sus constituyentes (bloques, superficies, masas, etc.). Estas representaciones tienen en la solución de los problemas una estructura de árbol que sigue una línea correspondiente al flujo de tiempo y no son, por lo general, independientes del tiempo como exigiría una representación física a partir de entidades o conceptos físicos.

Por su parte, las representaciones que denomina “físicas”, son independientes del tiempo, están basadas en entidades físicas (leyes y principios, relaciones matemáticas, etc.) y sus inferencias se elaboran a partir de las reglas impuestas por el desarrollo matemático y de relación entre los conceptos físicos (inferenciación constreñida en términos de Larkin).

Para las representaciones físicas, Larkin describe lo que denomina “esquemas”. Estos esquemas son representaciones que indican las interacciones percibidas en los procesos físicos a través de modelos específicos. Por ejemplo, para la representación y solución de problemas en mecánica este autor propone el Esquema de Fuerza y el Esquema del Trabajo - Energía. El Esquema de Fuerza, esta basado en la segunda ley de Newton y establece las relaciones entre el movimiento y la fuerza aplicada y el Esquema del Trabajo - Energía, está basado en la modificación del estado caracterizado por la energía cinética o potencial de un sistema físico por un trabajo realizado. Ambos esquemas están caracterizados por lo que Larkin denomina “Reglas de Construcción” que “actúan sobre las representaciones ingenuas originales para producir entidades en la representación física”²⁰ y “Reglas de Extensión” que incorporan nuevas representaciones físicas a las ya existentes.

Con las representaciones anteriores y las reglas de construcción y extensión, este investigador describe cómo resuelven los problemas los expertos y los novatos, encontrando que, además de utilizar representaciones diferentes como se ha mostrado en el cuadro, los expertos inmediatamente recurren a los esquemas para construir la representación física de la situación que se quiere comprender o resolver.

Este proceder de los expertos dependerá de la complejidad del problema. Para los problemas simples, los expertos encuentran de manera inmediata la representación correcta correspondiente a los esquemas, pero a medida que el problema se va haciendo más complejo, la relación entre los esquemas es menos clara y los caminos de inferenciación por consiguiente, le llevan a explorar diversas situaciones posibles, pero sin abandonar los esquemas.

El modelo propuesto por Larkin es una descripción de cómo los expertos utilizan los esquemas construidos en la Física, a partir de leyes que indican la relación entre entidades físicas fenomenológicas como la masa y la aceleración o bien, entre entidades físicas abstractas como la energía cinética y potencial para el caso de la mecánica. Este modelo poco puede decir acerca de las estructuras y procesos de construcción de estos esquemas y presenta, por consiguiente, una visión estática de la representación construida fuera del sujeto. De esta manera, las representaciones a las que hace referencia, son las

²⁰ Larkin Op. cit. página 82

que aparecen en los textos de física y que el sujeto simplemente toma y utiliza para representar toda situación física.

Por otro lado, este modelo no proporciona ningún referente sobre la construcción de los modelos ingenuos de los novatos (que son los estudiantes) ni de las posibles transiciones de las representaciones ingenuas hacia las que denomina físicas. Otro aspecto importante es que, si bien, en la representación física se considera que las inferencias son construidas con reglas específicas, éstas no se hacen explícitas y no se muestra cómo se emplean en situaciones físicas particulares y por otro lado, no se hace ninguna caracterización de las mismas en términos de los esquemas de fuerza o de trabajo - energía.

Por lo que respecta a los novatos, la situación es aún más difusa porque no se establece más que son reglas sujetas a construcciones tipo árbol, dependientes del tiempo (según el proceso físico que se analice) pero que no muestran cómo el sujeto las utiliza ni qué relación existe entre éstas y las de los expertos.

Finalmente es conveniente señalar que el trabajo de Larkin, refleja una situación observable al describir las diferencias que se perciben entre profesores y estudiantes en situaciones de clase cuando se resuelven problemas. Por un lado el profesor describe a los alumnos cómo utiliza las leyes de la física para interpretar los datos del problema y por su parte, la dificultad de los alumnos de comprender cómo se utilizan los conceptos físicos, debido a que su representación del problema es diferente, centrado en observables y no en conceptos.

Otros investigadores han desarrollado modelos basados en arquitecturas simbólicas como los desarrollados para representar los mecanismos cognoscitivos generales para situaciones específicas. Estos modelos se realizan pensando en cómo pueden ser modelados y procesados por programas de cómputo y por ello desarrollan categorías semejantes a los sistemas entrada/salida, en los que lo que importa es el establecimiento de reglas de funcionamiento.

Un ejemplo de estos modelos, es el trabajo de Williams, Hollan y Stevens²¹ quienes conciben los modelos mentales como compuestos de objetos autónomos con una topología asociada y que son ejecutables (*runnable*) por medio de inferencias cualitativas. Esto lo precisan de la siguiente manera “La noción central de esta concepción de modelos mentales es la noción de objeto autónomo... Un objeto autónomo es un objeto mental con una representación explícita de estado, es decir una representación explícita de sus conexiones topológicas con otros objetos. Un modelo mental es una colección de objetos autónomos ‘conectados’. Correr un modelo mental corresponde a modificar el parámetro del modelo por propagación de información usando reglas internas y una topología específica”²².

La construcción de esos objetos autónomos, es explicada como la “captura” de las intuiciones de la vida cotidiana acerca de los objetos del mundo real. Sin embargo, no se establecen los mecanismos de captura de esas nociones. Con este tipo de modelos se crean

²¹ Williams M. D., Hollan J. D. y Stevens A. L. (1983) Human Reasoning About a Simple Physical System. En Gentner & Stevens (eds) *Mental Models*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers. N Jersey

²² Williams, Hollan & Stevens. Op. Cit. página 133

programas de cómputo que simulan situaciones representadas a través de diagramas de sistemas y de conexiones entre los objetos. Estos modelos son simuladores de procesos. En este sentido, no pueden generalizar procesos de interpretación y razonamiento sobre situaciones físicas diversas viéndose así, limitados a representar un solo proceso. Por ello, consideramos que estos modelos no contribuyen a explicar los problemas conceptuales y de razonamiento que presentan los estudiantes de física como tampoco se consideran útiles para desarrollar estrategias de enseñanza.

1.3.2 Modelos conceptuales y cognoscitivos a partir de las ideas previas

El reconocimiento de las ideas previas o 'preconcepciones' en la década de los 80's, provocó una forma diferente de aproximarse a la construcción de la representación de los conceptos científicos en los estudiantes (ver anexo). Una de las consecuencias más importantes de este hecho, es que los trabajos sobre expertos y novatos cambiaron radicalmente en sus expectativas de investigación. El propio reconocimiento de las ideas previas como posibles sistemas de representación de una porción de la realidad, llevaron a la concepción de ideas como los esquemas alternativos cuya idea central es, que los sujetos construyen modelos coherentes de la realidad, que funcionan para la explicación y predicción de los fenómenos a que hacen referencia constituyéndose así en alternativos (en sentido restringido) a las explicaciones científicas.

También se ha sugerido que las ideas previas guardan cierto paralelismo con las representaciones que han aparecido en la historia de la ciencia. Por ejemplo, los trabajos de McCloskey²³ y Clement²⁴ muestran cómo las ideas de los estudiantes acerca del movimiento y las fuerzas, son ideas muy cercanas a las teorías del *ímpetus* desarrolladas hacia fines de la edad media.

A partir de esos modelos iniciales sobre las ideas previas, se han ido desarrollando modelos más centrados en los procesos de los estudiantes intentando representar la estructura de esas ideas previas. Ello ha llevado, a los investigadores, a utilizar modelos mentales, modelos cognoscitivos, la psicología genética y a últimas fechas efectuar un acercamiento a los aspectos epistemológicos de la ciencia para encontrar nuevos elementos explicativos sobre el proceso de formación y de transformación de esas ideas previas.

Los trabajos a los que nos referiremos adelante, son una selección que muestra la diversidad de enfoques y aproximaciones que pueden elaborarse a partir de las concepciones de los estudiantes. Estos modelos son un intento que va más allá de establecer un proceso que pueda simular los razonamientos de los sujetos o las características que presentan los expertos y los novatos ante la solución de un problema. Tienen como propósito explicar las construcciones que llevan a cabo los sujetos y que les sirven para explicar cierto ámbito de la realidad. Están centrados en la génesis y

²³ McCloskey M. (1983) Naive Theories of Motion en Gentner & Stevens (eds) *Mental Models*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers New Jersey. Pp 299-324

²⁴ Clement J. (1983) A Conceptual Model Discussed by Galileo and Used Intuitively by Physics Students. en Gentner & Stevens (eds) *Mental Models*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers New Jersey. Pp 325-340

funcionamiento de las ideas previas y en los problemas conceptuales que pueden observarse en las dificultades de comprensión de los conceptos científicos.

Un buen ejemplo de un trabajo que intenta explicar la estructura y formas de razonar de los estudiantes jóvenes sobre el movimiento es el de John Ogborn quien presenta un modelo de lo que denomina “teoría de sentido común sobre el movimiento” (*A commonsense theory of motion*)²⁵. Para la construcción de su modelo, Ogborn se plantea resolver las siguientes preguntas: ¿Qué clase de explicaciones se necesitan?, ¿qué niveles de explicación se requieren? y ¿qué se tiene a favor o en contra de tales explicaciones? Estas preguntas intentan ser contestadas a partir de establecer los elementos básicos que se presentan en el denominado sentido común.

Para ello, recurre a la experiencia más simple con el movimiento los objetos que caen o que no caen por estar soportados. Entre los elementos más importantes que establece para este modelo son:

Todo requiere de soporte menos el suelo.

Para soportar algo se requiere de un esfuerzo.

Si el soporte o el esfuerzo no es suficiente se rompe.

Puede haber un soporte parcial (por ejemplo un nadador está soportado parcialmente por el agua y tiene que hacer el resto por su esfuerzo).

Cuando un objeto comienza a caer, cae más rápido si cae de más alto.

Además se requiere de un conjunto de conceptos como lugar, trayectoria, y relaciones de ubicuidad como sobre, debajo, a un lado de, etcétera. En cuanto al movimiento, la regla básica es:

El movimiento requiere de un esfuerzo (fuerza).

Todos los elementos mencionados arriba, constituyen los componentes de esa teoría del sentido común, que como puede notarse, son los referentes que se encuentran usualmente en la descripción del movimiento que se hace cotidianamente. Ogborn resume las características de este modelo como sigue: “Lo importante de una teoría como ésta es que provee de un marco integrado consistente, más general que un conjunto de reglas acerca de casos particulares, la cual puede explicar las relaciones entre situaciones y respuestas y tomar en cuenta de una manera uniforme las diferentes concepciones de movimiento que los investigadores han caracterizado. Así, con un modelo como ése, hay pocas conexiones obvias entre fuerzas que pueden pensarse que existen en situaciones diferentes; con el modelo podemos comenzar a ver posibles conexiones entre correr y volar o levantar y tirar”²⁶.

Como Ogborn apunta en este mismo trabajo, piensa que el estudio del pensamiento sobre el movimiento es más conveniente tratarlo como modelo mental, por lo que su teoría

²⁵ Jon Ogborn (1985) Understanding students' understandings: An example from dynamics. *International Journal of Science Education* vol. 7 (2) pp. 141 - 150

²⁶ Ídem.

del movimiento de sentido común, radica en un conjunto de enunciados que pueden integrarse en un modelo descriptivo del movimiento a partir de la relación entre los diversos enunciados.

El segundo aspecto importante de este modelo son las reglas de operación (de pensamiento). Un aspecto por ejemplo, es que los sujetos no piensan en los procesos que observan cotidianamente y que dan por evidentes. Así no se detienen a pensar por qué los objetos son sostenidos por una mesa en términos de fuerzas como acción y reacción. Otro ejemplo son las interacciones como la fricción, en donde no se piensa que es un mismo fenómeno si el objeto se desliza por el suelo que si se encuentra en vuelo. Para el sujeto común son fenómenos con características muy diferentes. Estas diversas formas de comprender los fenómenos del movimiento representan diferentes niveles de explicación.

El modelo de Ogborn no hace ninguna suposición especial sobre los aspectos cognoscitivos (como el modelo basado en cómputo) y asume que el sujeto funciona cognitivamente como apunta la teoría piagetiana.

Este modelo presentado por Ogborn, si bien es capaz de describir de manera general lo que los sujetos piensan sobre el movimiento, no proporciona un proceso predecible o en su caso reconstruible sobre las formas de razonamiento por las que los sujetos establecen explicaciones y predicciones que van más allá de la sola identificación de movimientos directamente relacionables con los enunciados de su teoría del sentido común. Tampoco ofrece elementos de explicación para indicar los posibles problemas de orden conceptual que tienen los sujetos para comprender la física newtoniana, ni las diferencias y semejanzas en términos formalizados o estructurados, que permitan establecer cómo pasar de un modelo intuitivo a uno formal (al menos al nivel escolar). Por otro lado, no se establecen reglas claras sobre cómo utilizar los distintos enunciados para hacer inferencias, parece que todo queda subyacente en otra teoría, (en este caso piagetiana) pero que no se relaciona de manera explícita con el modelo propuesto, por lo que no se tiene ningún elemento para establecer parámetros comparativos del nivel de correspondencia con el pensamiento de los sujetos.

En un trabajo posterior Bliss y Ogborn²⁷ presentan la construcción de un modelo que a partir de los elementos considerados en el trabajo anterior describe el proceso de construcción de las nociones de fuerza y movimiento en el desarrollo de niños pequeños. Para ello caracterizan sus acciones como esquemas que pasarán a convertirse en prototipos, esto es, acciones complejas que en su conjunto forman un patrón de comportamiento que los sujetos usan para reconocer, interpretar y hacer predicciones acerca del movimiento. Algunos ejemplos de estos prototipos son: levantar, caminar o correr, saltar, rodar (objetos), flotar, volar, etc. Estos prototipos, pueden combinarse para formar otros y el proceso final es la construcción de lo que denominan elementos primitivos que tienen ya un contenido semántico. Ejemplos de estos elementos primitivos (acción/interpretación) son:

Los objetos cambian de lugar

Las partes cambian junto con el todo

²⁷ Bliss J y Ogborn J (1994) Force and motion from the begining. *Learning and Instruction Vol 4*. pp 7-25

El movimiento es causado por contacto

Con estos elementos construyen cuatro niveles. El nivel I corresponde de 0 a 4 meses de edad, el nivel II de 4 a 9 meses, el nivel III de 9 a 12 meses, el nivel IV de 12 a 18 meses y el nivel V para mayores de 18 meses. A continuación se presenta un modelo para la caída de los objetos.

Acciones primitivas

2a hacer esfuerzo = mover una mano + intencional + resistencia

Esquemas

hacer un esfuerzo para mover un objeto

= acción 2a: hacer esfuerzo

+ esquema 1a: cambiar de lugar un objeto

2b Soporte = sostener algo

2c espacio = arriba, abajo, a lo largo, en frente, detrás

2d fijo = falla al intentar mover un objeto con el esfuerzo

Reglas:

2a esfuerzo causa movimiento

2b objetos sin soporte caen

2c el movimiento solo tiene lugar en espacio sin objetos

2d el piso da soporte a cualquier cosa

2e el piso está fijo

2f las cosas fijas no se pueden mover

Prototipo

2a caída

= la acción primitiva (1a) se mantiene, entonces el objeto va

+ esquema (1b) el objeto se mueve por sí mismo

+ esquema (2b) soporte

+ regla (2b) los objetos sin soporte caen

Como puede apreciarse, el prototipo de la caída está construido con base en reglas y esquemas que son acciones. Este prototipo puede tener ya una representación semántica y por consiguiente referirse en diversas situaciones tanto reales como posibles.

El modelo construido por Bliss y Ogborn, da cuenta de una posible vía para la construcción de las nociones básicas y de sentido común acerca del movimiento y sus causas. Sin embargo, el comentario al modelo previo sobre sus posibilidades para entender y en su caso favorecer las transformaciones conceptuales es aplicable al presente puesto

que tampoco ofrece elemento alguno para comprender procesos de cambio o para relacionarlo con la física newtoniana que le será enseñada en la escuela.

En un trabajo sobre cambio conceptual, Dykstra, Boyle y Monarch, desarrollan un modelo para analizar los razonamientos de los estudiantes sobre tópicos de mecánica²⁸. Basados en la hipótesis de que cuando se aplican las concepciones a problemas específicos se manifiestan sus características conceptuales. El modelo retoma las ideas mostradas por los estudiantes acerca de las fuerzas y el movimiento. Con su modelo, estos autores pueden describir una serie de cambios (que pueden ser descritos como cambios de modelos) en los cuales los estudiantes pasan de las concepciones de *fuerza implica movimiento a hay una fuerza neta si hay aceleración* y de *si no hay fuerza no hay movimiento a no hay fuerza neta si no hay aceleración*. Estos cambios se simulan en un modelo que pasa por cuatro etapas:

Concepciones iniciales
Refinamiento de las concepciones iniciales
Inicio de una concepción newtoniana
Refinamiento de la concepción newtoniana

Cada una de éstas etapas, es caracterizada por un esquema que establece los siguientes pasos: Estado, Proceso, Atributos y Relaciones. Por ejemplo, para el caso del refinamiento de las concepciones iniciales se tiene

Estado = reposo
Proceso = movimiento (velocidad y aceleración)
Atributo = fuerza
Relación =?

y en el caso de una visión inicial newtoniana se tiene

Estado = reposo
Proceso = movimiento (velocidad y aceleración)
Atributo = causa
Relación = fuerza neta

Estos dos esquemas o modelos dan cuenta de dos visiones sobre el movimiento. En el primero el atributo del movimiento está en la fuerza misma, esto es, el movimiento radica en que el objeto lleva una fuerza, mientras que en el segundo modelo, la fuerza es un agente causal y por ello, una fuerza neta produce el movimiento.

El modelo presentado por Dykstra, Boyle y Mocarch, al igual que el de Bliss y Ogborn²⁹ describen adecuadamente las relaciones que los sujetos han construido en términos de estados y procesos. Sin embargo, son representaciones que describen con un

²⁸ Dykstra D., Boyle C. F y Monarch I. A., (1992) Studying Conceptual Change in Learning Physics. *Science Education Vol 76(6)* pp 615-652

²⁹ Bliss y Ogborn Op. cit.

modelo un hecho y no una estructura dinámica, esto es, son modelos estáticos que solo tienen la posibilidad de interpretar el fenómeno analizado y no permiten inferir sobre otras ideas y visiones físicas de los sujetos. En términos de Bliss y Ogborn, no permiten dar cuenta de otras representaciones del sentido común y no permiten relacionar con la física escolar esas ideas de sentido común sino por la descripción de otro posible estado como en el caso de Dykstra et al.

Los problemas apuntados en el párrafo precedente se han intentado resolver por diversos investigadores. Algunos de los trabajos que se describen a continuación son una muestra de esos intentos. Un caso especialmente interesante es el presentado por André Tiberghien³⁰ quien en lugar de plantearse la construcción de un modelo que describa las ideas previas o de sentido común, propone analizar el problema desde el punto de vista de los problemas que tienen los estudiantes para el aprendizaje. Pone especial énfasis en las diferencias entre los conceptos físicos y las posibilidades de aprenderlos o como lo describe, “las dificultades de aprendizaje aparecen como un ‘gap’ entre el significado construido por el aprendiz y ciertos aspectos del conocimiento físico, particularmente de ciertas cantidades físicas”. Esto le lleva a plantearse el problema desde dos enfoques: El aprendizaje de los alumnos y la epistemología de la ciencia.

El aspecto epistemológico lo aborda para tener mayores elementos sobre los procesos de construcción de significados desde el punto de vista de la Física. Para su análisis, Tiberghien adopta la posición de que el elemento central del conocimiento científico lo constituyen las teorías y su dinámica, esto es, una teoría como un proceso que tiene significado en función del momento histórico y de las preguntas y formas de investigación adoptadas. Es una visión de teoría como sistema interpretativo de la realidad y que sufre transformaciones cuando emerge un nuevo paradigma³¹. Concibe a la teoría como la que “contiene el sistema explicatorio y que el significado de interpretaciones y predicciones es construido a través de la teoría misma”. Esta visión de teoría, como puede notarse, está en estrecha relación con los procesos de aprendizaje de los contenidos científicos, dando al sujeto el papel central en la construcción de su conocimiento y por ello, de asignar significados a su interpretación y predicción de la realidad a partir de una visión específica.

Para construir el modelo que correlaciona con el aprendizaje de los estudiantes, Tiberghien distingue tres niveles en la construcción del conocimiento científico:

Teoría
Modelo
Campo Experimental de Referencia.

Por teoría, como ya se apuntó, Tiberghien describe el sistema explicativo e interpretativo y aspectos como paradigmas, principios, leyes y causalidades que

³⁰ Tiberghien A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*. Vol. 4 pp 71-87.

³¹ En este sentido, Tiberghien adopta la posición de Kuhn, acerca de la incomensurabilidad de las teorías y por consiguiente de un proceso de transformación de teorías como evolución del conocimiento científico.

pertenecen al ámbito de la explicación. Por modelo, concibe las relaciones funcionales cuantitativas o cualitativas entre las entidades físicas para representar aspectos de las situaciones reales o materiales y, por campo experimental de referencia, todas aquellas situaciones experimentales que pertenecen al dominio de validación de la construcción teórica; esto es, aspectos como la medición, la experimentación en un esquema que involucre teoría y modelo.

El modelo que construye con estos tres niveles, implica una continua interacción entre ellos, (no son jerárquicos) de manera que en todo momento de la construcción y/o interpretación del conocimiento científico estos tres niveles están en funcionamiento.

Para abordar el problema de la construcción de los conocimientos en los estudiantes, y después de una revisión bibliográfica en la que apunta las dos posiciones principales que se desarrollaron en la época de los ochenta a saber, se encuentran quienes centran todo el proceso en los contenidos y quienes lo hacen en invariantes del conocimiento. Tiberghien concluye que si bien los resultados de la aproximación de invariantes cognoscitivos, específicamente derivados de las ideas de Piaget no han brindado el marco teórico requerido y apunta que “en lugar de llegar a la conclusión de que el conocimiento de los estudiantes es solo local, consideramos que hay una necesidad de una aproximación teórica que tome en cuenta el contenido sin estar estrictamente amarrado a él y consecuentemente que permita la identificación de invariantes”. Para ello, asume que el modelamiento de los procesos del sujeto que aprende puede cumplir esa función y propone varias hipótesis relativas a que el sujeto construye modelos de los hechos materiales de manera semejante al proceso general del conocimiento científico. Así, reconoce también tres niveles, que denominará:

Teoría_t, esto es, teoría del estudiante (el que aprende)

Modelo_m, modelo del estudiante

Campo Experimental_c, campo experimental del estudiante.

Como un ejemplo del uso de este modelo se tiene el proceso de calentamiento de un objeto. En el modelo del estudiante se establecen sus ideas previas, por ejemplo, que el flujo de calor depende de la sustancia. Como campo experimental se cuenta con las experiencias de los sujetos del calentamiento de objetos.

El nivel Modelo_m queda descrito por:

El calor fluye en el metal y este se calienta

El calor no fluye en la madera y esta no se calienta

El metal es un conductor y la madera es aislante (después de que se les ha enseñado en clase)

El nivel Teoría_t queda descrito por

Agente = lo que se calienta

causa = que es calentado
Mediador = calor (el flujo del calor depende de la sustancia)
Paciente = el objeto a distancia
efecto = que se calienta

El esquema anterior describe una relación causa-efecto (nivel explicativo) para la transmisión del calor donde se relacionan los hechos (causa y efecto) con un proceso interpretado bajo una representación propia (los estudiantes sostienen que el flujo del calor depende de la naturaleza del objeto).

El modelo presentado por Tiberghien permite establecer un vínculo entre las concepciones de los sujetos y las de la teoría física, sin embargo, lo hace bajo un proceso de analogía (tal vez demasiado esquemático) que no da pie a interpretar un proceso de transformación de manera clara, aunque ella propone la utilidad de este modelo para el cambio conceptual como se analizará más adelante (capítulo IV). Además, se deja de lado el proceso de construcción del conocimiento desde el enfoque epistemológico con el que inicia su análisis, porque en la especificidad de teoría y modelo no se aprecia el proceso epistemológico involucrado ni cómo el conocimiento se va transformando en ambos esquemas.

Los modelos mentales y cognoscitivos presentados hasta ahora, pretenden describir los razonamientos e interpretaciones de los estudiantes sobre ciertos fenómenos físicos específicos con base en modelos cognoscitivos (predominantemente computacionales), en la descripción del pensamiento común o como en el caso de Tiberghien bajo un enfoque epistemológico del conocimiento científico.

En todos los casos analizados, las construcciones dan cuenta de un solo dominio o tipo de fenómenos físicos; algunos describen el movimiento, otros las fuerzas o bien procesos de conducción térmica. Esta situación no es del todo deseable ya que no permite el desarrollo de modelos de carácter más general, que permitan establecer modelos acerca del funcionamiento conceptual de los sujetos que explique las diversas posibilidades de construcción de modelos y/o representaciones de situaciones físicas. Un intento en esta dirección es presentado por A. diSessa³², quien tomando como base el trabajo inicial sobre los primitivos fenomenológicos y el conocimiento en pedazos³³, intenta un desarrollo general de corte evolutivo.

El trabajo presentado por diSessa tiene como propósito principal desarrollar un modelo que describa cómo se construyen y evolucionan las concepciones físicas de los sujetos. Para ello toma como parámetro la epistemología genética de Piaget, principalmente en lo referente a concebir un desarrollo evolutivo y estructurado que implica una génesis que parte de nociones intuitivas. Su planteamiento parte de las siguientes preguntas generales sobre el conocimiento:

¿Cuáles son los elementos del conocimiento?

³² diSessa Andrea A. (1993) Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*. Vol 10(2 y 3) pp 105-225.

³³ diSessa A. (1983) Op. cit.

¿Cómo se originan?

¿Qué nivel y que clase de sistematicidad existe?

¿Cómo evoluciona el sistema como un todo?

¿Qué se puede decir acerca del mecanismo cognoscitivo subyacente es responsable de la operación normal y evolución del sistema de conocimiento?

Para contestar esas preguntas, diSessa parte de la noción de 'sentido de mecanismo' (*sense of mechanism*) con el que intenta dar cuenta que los sujetos desarrollan la percepción e intuición de mecanismos o procesos que enmarcan su vida cotidiana como sus movimientos y el movimiento de los objetos y sus causas. Estas percepciones iniciales (en cierta medida equiparables a las aproximaciones reflexivas de Piaget³⁴) constituyen un sistema o modelo débilmente organizado y sujeto a diversas constricciones que no permiten una estructura explicativa profunda y tampoco, la resolución de conflictos sobre los fundamentos de ese conocimiento intuitivo, sin embargo, es posible reconocer una esquematización causal basada en términos de agentes, pacientes e intervenciones (una tendencia a la caracterización estática de sistemas dinámicos y una relativamente rica fenomenología de compensaciones y equilibraciones). Ese sistema tiene la capacidad de:

Aproximarse a eventos basados en la generalización sobre cosas que pueden o no ocurrir.

Hacer predicciones y 'postdicciones' esto es predecir hacia adelante y hacia atrás en una escala de tiempo.

Brindar descripciones causales y explicaciones.

Para la construcción de su modelo a partir de las características descritas, diSessa, establece como hipótesis que el desarrollo intuitivo del sentido de mecanismo esta alejado de la visión de los expertos en; profundidad y sistematicidad y, que el aprendizaje de la Física puede ser visto como la construcción de un gradiente entre lo fenomenológico y lo fundamental por la reorganización y jerarquización de la fenomenología existente. Y como apunta, "Esto es una aseveración epistemológica de que el desarrollo del conocimiento científico acerca del mundo físico es posible solo a través de la reorganización del conocimiento intuitivo"³⁵. Este enfoque presenta profundas diferencias con los modelos analizados previamente, puesto que implica la negación de modelos únicos y sistemáticos para representar el conocimiento de los estudiantes al menos como modelos completos y coherentes y, por el contrario, parte de un conocimiento no articulado, en 'pedazos' que es semiestructurado y que tenderá a desarrollarse en un proceso genético.

Para la construcción de este modelo, diSessa propone un conjunto de categorías que constituyen elementos para una teoría o sistema de conocimiento.

³⁴ Piaget Jean. (1969) *El nacimiento de la inteligencia en el niño* Ed. Aguilar. Madrid

³⁵ diSessa (1993) Op. Cit, p. 108

1. *Elementos*. Describen el tamaño y el carácter de las estructuras de conocimiento. Relevantes pero insuficientes como categorías son las ideas, conceptos, modelos, y teorías.
2. *Mecanismo Cognitivo*. Provee de una imagen de la operación del sistema de conocimiento intuitivo. Da alguna base para interpretar la solución de problemas y el razonamiento que usa el conocimiento intuitivo.
3. *Desarrollo*. Comprende la génesis y desarrollo del sistema. Pretende entender cómo los elementos y el sistema propiamente dicho cambia.
4. *Sistematicidad*. Describe el nivel y clase de relaciones de los elementos del sistema. Ello implica descripciones y descomposición en subsistemas que están relativamente integrados entre ellos y relativamente independientes de otros subsistemas.

Los elementos son los *primitivos fenomenológicos*, esto es, las entidades conceptuales básicas que construye el sujeto por su experiencia cotidiana y que son originados por la interpretación superficial de la experiencia con la realidad. Constituyen esquemas no articulados que le permiten al sujeto actuar de manera intuitiva. En cuanto al mecanismo cognoscitivo, propone una especie de red de activaciones entre los elementos primitivos y otros elementos conceptuales bajo dos mecanismos principales, uno que puede definirse como *identificación entre los factores* debido a un contexto (*cuing priority*) y otro de *reforzamiento o inhibición de las relaciones* (*reliability priority*).

El primer mecanismo, actúa de manera inmediata y establece las relaciones posibles, mientras que el de reforzamiento o inhibición es más consciente y describe la retroalimentación que se requiere para reforzar o inhibir las relaciones iniciales establecidas en función de las inferencias y del contexto específico al que se aplican. Además del proceso descrito, los sujetos evolucionan en sus estructuras representacionales, las relaciones que establecen y el nivel jerárquico que puedan tener los primitivos fenomenológicos cambia. Este proceso de *Desarrollo* intenta dar cuenta del paso de un inexperto a un experto en un dominio específico. diSessa lo describe como “El desarrollo de representación física de ingenua a experta puede ocurrir de la siguiente manera. Primero, la larga pero relativamente inestructurada colección de p-prims³⁶ presente en individuos ingenuos, se tienden a usar en la física que se enseña. No estructurado significa que la identificación de relaciones y el reforzamiento o inhibición de éstas ocurre en una pequeña vecindad de la red. La prioridad en las relaciones es local y puede ser no central. Puede en caso de conflicto no saber cuál p-prim usar para dar sentido a mecanismo. Durante el paso hacia ser experto, la prioridad de algunos p-prims puede verse altamente aumentada o reducida y el contexto para la activación puede desplazarse, expandirse o contraerse dependiendo de los nuevos roles de los elementos en el desarrollo de un sistema físico de conocimiento”³⁷. El último aspecto que es necesario considerar en un modelo de esta naturaleza es la manera de funcionamiento para la

³⁶ Se utiliza p-prims´ como abreviación de primitivos fenomenológicos.

³⁷ diSessa (1993) Op.cit. p. 114

construcción de las relaciones cognoscitivas y el desarrollo. Esto está descrito en lo que diSessa llama *Sistematicidad* y que consiste de los siguientes elementos:

Uso mutuo: Esto es el uso de las p-primas en secuencias dinámicas o agrupaciones con lo que esos elementos se utilizan de manera consistente.

Atributos comunes: Esto significa tener elementos de vocabulario que permita la relación entre los elementos de manera significativa.

Coherencia de arriba a abajo: Esto significa que es posible establecer relaciones desde aspectos simbólicos y proposiciones verbales de nivel alto en un sistema explicativo hacia la interpretación de los hechos.

Plausibilidad mutua: Esto establece la posibilidad de construir nuevos elementos a partir de los existentes, esto es de hacer inferencias y razonamientos que lleven a la creación de nuevos primitivos y relaciones que no existían en la base inicial.

Completez: Esto es, que el sistema constituido por los primitivos y sus relaciones sea capaz de describir una porción de la realidad de la manera más completa posible (esto desde luego depende de las expectativas).

Abstracción: En los aspectos más complejos de la red intuitiva diversos fenómenos pueden relacionarse por medio de abstracciones comunes, así es posible contar con un núcleo físico intuitivo.

Con lo apuntado se tiene la base de un modelo en el que diSessa intenta dar cuenta del conocimiento y características de lo que se puede denominar "física del sentido común". Sin embargo, quedan aspectos importantes como la identificación en los sujetos de los primitivos fenomenológicos y la interpretación (con los aspectos teóricos) de la construcción de modelos que los sujetos hacen de la realidad.

El autor reconoce la complejidad de identificar las primitivos fenomenológicos, puesto que no son simplemente las ideas previas o preconceptos de los sujetos (aunque algunos de ellos sean p-primas). Para ello establece un conjunto de características que denomina principios heurísticos. Estos principios heurísticos, se describirán porque algunos de ellos serán retomados para este trabajo, cuando en el siguiente capítulo se establezca la propuesta de los modelos parciales posibles. Los principios heurísticos propuestos por diSessa son:

Principio de obviedad: Se refiere a identificación de fenómenos familiares no problemáticos, esto es para los que las explicaciones comunes son correctas. En general estos elementos constituyen clases abstractas.

Principio de Impenetrabilidad: Se refiere a que los primitivos fenomenológicos deben cumplir con ese hecho de ser elementos primarios y por tanto claramente diferenciados, sin posibilidad de mezclarse o confundirse. Sin embargo este principio no debe tomarse de manera absoluta debido a que el sentido de primitivo puede ser relativo, sobre todo en un proceso que se pretende evolutivo.

Principio de Diversidad: Se refiere a que no se prevé unificación en los primitivos y que por lo contrario, son elementos independientes³⁸

Principio de Cobertura: Se refiere a que la experiencia común generalmente está cubierta por un conjunto de primitivos fenomenológicos. Esto hace que los sujetos estén conformes con sus explicaciones y no perciban deficiencias o contradicciones que les llevan a la construcción de otros modelos.

Principio de un vocabulario fuerte: Debido a que los primitivos fenomenológicos se agrupan en cúmulos que tienen una fuerte capacidad descriptiva y pasan a ser del vocabulario común.

Principio de génesis no problemática: Esto se refiere a que existen eventos comunes o cotidianos para los que algunas p-primas son arquetipos a partir de los cuales es muy probable que se conviertan en abstracciones.

Principio de cuerpo: Se refiere a que algunas p-primas probablemente abstractas en términos internos, especialmente en etapas tempranas del desarrollo. (Por ejemplo tensión o acción muscular como agente de cambio).

Principio de funcionalidad: Este principio emerge de la presuposición de que el sentido de mecanismo y causalidad intuitiva evoluciona en los individuos para interaccionar de manera efectiva con el mundo real.

Principio de continuidad: Da cuenta del principio fundamental del constructivismo de que el nuevo conocimiento se origina del anterior; de manera similar, los primitivos fenomenológicos evolucionan del conocimiento previo de tal manera que éste proporciona buenos indicios para el conocimiento posterior.

Principio de dinamismo: Trata de poner énfasis en que no solo tiene que ver los estados inicial y final en un proceso de evolución del conocimiento sino que es un proceso paulatino. Por ejemplo, las explicaciones alternativas pueden jugar un papel importante en el establecimiento de relaciones entre los elementos (p-primas).

Principio de Invariancia: Significa que un elemento aceptado como correcto podrá ser aplicado en todos los casos posibles en los que el contexto sea semejante.

Principio de evidencia diversa: Este principio intenta ubicar los primitivos fenomenológicos en un contexto en el que diferentes problemas pueden converger hacia un mismo tipo de explicaciones.

Principio de redescipción: Se refiere a que en el proceso de evolución del sistema del conocimiento físico, la argumentación adecuada puede optimar los elementos para mejorar la coherencia.

*Principio de remoción o limpieza de datos*³⁹: Este principio se refiere a utilizar de manera crítica los datos que provienen de las investigaciones sobre las ideas de los

³⁸ Aquí es conveniente recordar que los primeros trabajos de diSessa, se refieren al conocimiento fraccionado. diSessa (1988) Op. cit.

³⁹ En el original dice *Principle of scavenging data*, que trata de dar idea de remoción de escombros o de hollín (Webster Third New International Dictionary. Volume III Encyclopaedia Britannica, INC 1993)

sujetos. Así algunos datos antes de ser encuadrados en la teoría pueden ser elementos útiles para un replanteamiento.

Principio de discrepancia: Se refiere a que cuando las personas no tienen una explicación físicamente aceptable o muestran poco interés por este tema, es un buen momento para conocer las raíces de los primitivos fenomenológicos.

Principio del contenido sobre la forma: Se refiere a que las p-primas no pueden ser removidas por un análisis en favor de procesos generales tales como el razonamiento analógico. De esta forma se explica la resistencia al cambio presentada por las ideas previas.

A continuación se describirá una de las aplicaciones que diSessa desarrolla con este modelo teórico a casos de la mecánica. Lo primero que establece son los elementos que en este caso, son las concepciones básicas - incluyendo ideas previas - que constituyen los cúmulos sobre los cuales los sujetos interpretan y hacen predicciones sobre fenómenos asociados a las fuerzas, el movimiento y el equilibrio. Los elementos que diSessa establece son los siguientes:

Un esquema de razonamiento que describe como primitivo a la manera de la ley de Ohm, que establece que en todo proceso mecánico hay un agente (quien ejecuta la acción), una resistencia (tendencia a no modificar un estado, por ejemplo el reposo) y un resultado, esto es el cambio producido⁴⁰.

La fuerza como agente de movimiento. Este enunciado constituye una de las ideas previas más importantes en la representación del movimiento en los estudiantes y establece que para todo movimiento es necesario una fuerza que lo produzca.

Empuje continuo. Este enunciado establece que para que un movimiento permanezca es necesario un empuje (una fuerza) que actúe continuamente, de lo contrario el movimiento cesará.

Fenómenos de constricción. Establece todo tipo de relación que impide o constriñe el movimiento, por ejemplo, un objeto que se mueve en una trayectoria fija como un péndulo, o un objeto que no cae debido a que está sostenido por algo. Equilibrio dinámico. Establece el equilibrio logrado por fuerzas que se contrarrestan.

Desequilibrio dinámico. Establece el desequilibrio que ocurre cuando alguna fuerza actuante es mayor que otras.

Equilibrio abstracto. Establece situaciones posibles en las cuales el equilibrio se mantiene en condiciones de movimiento o transformaciones en el tiempo.

Estos elementos o p-primas, constituyen un conjunto de presuposiciones básicas que le permiten a los sujetos dar una interpretación y hacer predicciones sobre los procesos

⁴⁰ El nombre de ley de Ohm, obedece a que esta ley que vale en electricidad, establece que la resistencia eléctrica es una oposición al flujo de corriente eléctrica cuando sobre un elemento actúa un potencial eléctrico. En este sentido, la ley de Ohm es una analogía aplicable al comportamiento de otros procesos físicos.

relacionados con el movimiento y sus causas. Como puede apreciarse, son ideas que podrían denominarse de sentido común y que en principio parecen aplicables a todas las situaciones que se presentan en la vida cotidiana, pero que sin embargo, no corresponden a la visión newtoniana de la Física.

Con estos elementos, se plantea el mecanismo de desarrollo que tienen los sujetos cuando con la experiencia o el aprendizaje, van modificando - al menos jerárquicamente - la red de concepciones previas. Esto es, un elemento que en cierto momento es aplicable de manera casi general y que es fundamental para explicar una gran cantidad de fenómenos, puede pasar a otro nivel donde no resulta tan importante y ya no cumple el papel protagónico que tenía conforme el modelo del sujeto evoluciona. diSessa lo describe de la siguiente manera. "Este tema tiene que ver principalmente con la reorganización. Nuevas p-primas son indudablemente generadas para acomodar el desarrollo conceptual natural con la enseñanza de la Física. Lo que es más interesante es la reestructuración del sistema de elementos existentes. Una manera directa de ver los cambios en las prioridades de los elementos, es describir los cambios en términos de funciones de cambio que tienen los elementos. Por ejemplo, algunos p-prims pueden tener roles transitorios, primeramente para inducir el uso de otras, mientras que otras son más fundamentales y son ampliamente aplicables y tratadas como explicativas. El aprendizaje de la Física, yo supongo, requiere de la modificación sistemática del estado intuitivo de las siguientes formas. Uno comienza con un verdadero sistema explicativo: muchos p-prims sirven como esencialmente explicaciones primitivas para varios fenómenos. Gradualmente, los p-prims se congregan y se organizan como códigos distribuidos. Recordando que código distribuido significa el rehuso de los elementos intuitivos de conocimiento como partes de la experiencia, tales como las ideas físicas más firmes o probadas, casos especiales y versiones aproximadas de leyes y principios. La codificación humana de las leyes del movimiento de Newton debe ser asumida como muy compleja, comparada con el conocimiento simple como los p-prims. Las nociones de agente comienzan a construirse como el concepto de fuerza. La elasticidad de la materia se convierte en un concepto más importante que la rigidez, y se reducen los fenómenos constrictores como el bloqueo por otro, más central a la física newtoniana como la fuerza. En adición, las ideas sobre equilibrio se hacen más refinadas con un rol importante pero parcial en la codificación de leyes tales como la conservación de la energía. El cambio fundamental en la estructura es aquél que en lugar de un muy amplio sistema explicativo, sin importar qué p-prims se estén usando, se convierte en parte del complejo; pero constituido de pocos subsistemas, que son codificados en las leyes físicas mismas. En lugar de las p-primas, sólo las leyes físicas se convierten en primitivos explicativos con alto nivel de confiabilidad"⁴¹.

Como un ejemplo específico de este desarrollo se tiene la succión de un líquido por un popote. El sujeto parte de las ideas de que el vacío que se forma en el popote cuando se succiona por él, es el responsable de que el líquido suba, después es el aire rarificado, posteriormente se reconoce la presencia de un agente externo como el peso del aire, más adelante será la diferencia de presiones hasta llegar a explicaciones abstractas sobre elementos de fluido que se mueven bajo leyes específicas que solo son conocidas por los

⁴¹ diSessa (1993) Op. cit. pp142-143

expertos en fluidos. Un físico que no se dedica a ese tema generará explicaciones válidas hasta el nivel de las diferencias de presiones. En este ejemplo se ve cómo se van transformando las ideas para la explicación de un fenómeno y como los conceptos se van vinculando de manera diferente, pasando los primeros a planos en los que, incluso, llegan a ser del todo irrelevantes. Para diSessa no hay desaparición de elementos (incluyendo las ideas previas), hay una reorganización y una reubicación en una red conceptual de las concepciones de los sujetos que pueden aparecer en las explicaciones de otros fenómenos. En este punto debe notarse la diferencia con otros enfoques de cambio conceptual que implican la transformación de las ideas como se verá en el capítulo cuarto.

Para completar el modelo, es necesario comentar sobre el aspecto que diSessa denomina *Sistematicidad*, y el cual indica la utilización sistemática por parte de los sujetos de esquemas representacionales. En el modelo se establecen principalmente dos elementos sistemáticos. El primero es la *predisposición a lo estático*, que implica que los procesos o fenómenos son interpretados por medio de secuencias de estados estacionarios. Por ejemplo, el movimiento es visto como una sucesión de estados pero no como un proceso continuo, aspecto que hace complejo que los estudiantes comprendan los procesos infinitesimales como la velocidad instantánea. El segundo elemento sistemático lo constituyen los *primitivos figurales* que son representaciones geométricas o patrones figurales, con los que juzgan los movimientos posibles sobre la base de formas y patrones visuales de trayectorias, (por ejemplo, la aceptación del movimiento circular sobre ejes de simetría a diferencia de otras trayectorias donde no se tiene un eje de simetría). El trabajo de diSessa aquí expuesto termina con una descripción de los mecanismos cognoscitivos, pero este tema no será abordado por no ser relevante al modelo mismo.

Como podrá notarse, el modelo expuesto, tiene implicaciones importantes para la interpretación de las ideas previas de los estudiantes y las formas comunes de explicar los procesos físicos relativos a la mecánica del movimiento y sus causas. Sin embargo, a pesar de que el trabajo de diSessa hace aportaciones relevantes para el desarrollo posterior de procesos que lleven a comprender la evolución de las concepciones físicas de los sujetos, no permite de manera clara, determinar la función de cierto tipo de ideas previas en la comprensión de eventos físicos. Tampoco contribuye a esclarecer cómo construyen inferencias los estudiantes a partir de sus ideas o primitivos fenomenológicos debido a que, el esquema que propone, solo permite ubicar las concepciones de los estudiantes en categorías de procesos y no de conceptos y sus formas de relacionamiento. También es importante hacer notar, que no hay en su propuesta, la posibilidad de relacionar las teorías físicas con las construcciones de los estudiantes más allá de la referencia a procesos específicos como casos aislados y no a concepciones más generales de la Física aspecto relevante para comprender los procesos de transformación conceptual y de comprensión de teorías científicas y no sólo de sucesos fenomenológicos aislados.

Como analizaremos a continuación, este modelo y los anteriores descritos, no nos proporcionan un modelo con el que se pueda no sólo explicar la comprensión de ciertos fenómenos sino también vincularlos con la Física para establecer los procesos posibles de transformación de un formalismo a la construcción de los estudiantes.

1.4 Los modelos mentales y cognoscitivos en la enseñanza de la ciencia

El desarrollo de los modelos mentales tiene cada vez mayor influencia en los procesos de enseñanza. Esto se debe a la evolución que han tenido y que como se ha mostrado, han pasado de ser modelos muy específicos para describir una situación física, a construcciones más amplias tendientes en cierto modo, a constituirse en teorías de conocimiento al incorporar aspectos epistemológicos, estructurales y cognoscitivos.

Ejemplo de la influencia que los modelos mentales y cognoscitivos comienzan a tener en el ámbito de la enseñanza es el análisis de Glunn y Duit⁴² quienes describen procesos de aprendizaje de las ciencias en términos de la construcción de modelos, de su transformación en modelos más complejos o bien, en el caso de no existir compatibilidad entre los modelos de los estudiantes y los enseñados en clase; por un proceso de acomodación hacia un modelo escolar. Resaltan el papel de los modelos escolares y las implicaciones que tienen para el aprendizaje escolar.

Otro trabajo que hace notar la importancia de los modelos para la investigación y la práctica de la enseñanza de la ciencia es el desarrollado por Greca y Moreira⁴³ quienes resaltan el papel de los modelos mentales como alternativa a los primeros enfoques sobre el cambio conceptual, y hacen notar la importancia de comprender la transformación de los modelos mentales de los sujetos (inarticulados y particulares) hacia los modelos conceptuales de la ciencia (coherentes y generales). Proponiendo que la modelización será un factor importante en el desarrollo futuro de la investigación y la enseñanza de la ciencia.

Cabe aquí señalar que en el ámbito de la enseñanza de la ciencia, se han empleado profusamente las *redes semánticas*⁴⁴ y en especial los *mapas conceptuales*⁴⁵. Ambas técnicas de representación esquemática de las concepciones y relaciones conceptuales de los sujetos en un momento dado, han sido utilizadas para intentar dar cuenta de lo que los sujetos conocen, de las jerarquías entre conceptos que elaboran y de las posibles modificaciones que logran a través de los procesos de enseñanza. También se han utilizado para la planeación educativa y la evaluación. Sin embargo, hay que hacer notar que **no** constituyen modelos cognoscitivos ni mentales, puesto que no dan cuenta de posibles procesos (reales o representados) bajo los cuales se construyen las nociones y relaciones en los sujetos, ni de cómo éstas dan cuenta de la interpretación de los fenómenos que intentan comprender y representar.

Las redes semánticas, por ejemplo, se construyen en función de relaciones entre palabras y pesos asignados (por diversos métodos) a esas relaciones, indicando así,

⁴² Glynn S. M., & Duit R. (1995) *Learning Science Meaningfully: Constructing Conceptual Models* en Glynn & Duit (Eds) *Learning Science in the Schools: Research Reforming Practice*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers N.J.

⁴³ Greca I. M y Moreira M. (1998) Modelos mentales, modelos conceptuales y modelización. *Caderno Catarinense de Ensino de Física Vol 15(2)*

⁴⁴ Anderson J. R., (1990) *Cognitive Psychology and Its Implications*. W.H. Freeman and Co. New York pp 123-133

⁴⁵ Novak, J. D., y Gowin B.D. (1984) *Learning how to learn*. Cambridge University. Cambridge Mas..

cercanía o alejamiento entre nociones o conceptos. Esto desde luego no proporciona ningún indicio sobre los procesos bajo los cuales los sujetos establecen las relaciones ni siquiera sobre los significados de los conceptos. En situación semejante se encuentran los mapas conceptuales, que son más flexibles, en cuanto que no requieren de asignaciones numéricas para ser interpretados, pero que también nos indican de manera estática, cómo en determinado momento, un sujeto interpreta un concepto o conjunto de conceptos en función de las relaciones posibles que puede establecer entre ellos.

1.5 Propuesta para la construcción de modelos para la representación y el aprendizaje de la Física

El panorama presentado pone de relieve que la investigación sobre las representaciones físicas de los sujetos (modelos mentales o modelos conceptuales) se dirige hacia la construcción de modelos generales de interpretación de la construcción del conocimiento que los sujetos elaboran acerca de los fenómenos físicos y la transformación hacia modelos más complejos y cercanos a los que propone la Física. En este sentido, se aproximan también hacia constituirse en modelos para el aprendizaje. El hecho de que los modelos más recientes incorporen aspectos como elementos de la teoría piagetiana, aspectos cognoscitivos y epistemológicos, da cuenta de que se aproximan cada vez más a una representación formalizada. Sin embargo, es importante resaltar que si bien los modelos actuales son más complejos y pretenden un nivel de representación más allá de poder describir situaciones específicas como la aplicación de las fuerzas o la presión atmosférica, no se percibe que se pueda establecer un vínculo entre los modelos de los estudiantes y los modelos científicos de manera que puedan articularse y en su caso proponer un esquema dinámico de transición.

La mayoría de los modelos previamente analizados se centran en describir cómo los sujetos llegan o construyen una representación de un aspecto o un campo de la Física. Esto proporciona una visión centrada en el sujeto y aunque algunos de estos modelos (Ogborn y diSessa) son un intento por describir su desarrollo y evolución en los que se tiene como meta los modelos generados en Física, no se presentan las posibles relaciones y transiciones de los modelos de los sujetos hacia los modelos científicos. Por su parte modelos como el de Tiberghien quien toma como esquema los atributos de una teoría científica y construye un sistema equivalente para los modelos de los estudiantes, presenta una visión estática que no da lugar a procesos de transformación entre los modelos, ni siquiera en el nivel estructural porque éste está ya predeterminado. Ante esta situación y teniendo como finalidad la construcción de representaciones que permitan comprender no solo los modelos que los sujetos comunes o los estudiantes construyen para interpretar los fenómenos físicos sino también las teorías científicas y las relaciones entre ambos modelos, es que se hace necesaria la formulación de modelos que logren esa integración. ¿Por qué deben construirse y ¿qué características deben tener esos modelos?

La primer pregunta tiene respuesta en la enseñanza y el aprendizaje. La finalidad principal de la enseñanza de las ciencias es que los estudiantes comprendan los conceptos científicos de manera que puedan representar y explicar (dependiendo del nivel) los

fenómenos naturales. Esto exige que se conozca la situación conceptual de los estudiantes y que se creen los procesos necesarios para que lograr el acceso a las teorías científicas. Ahora bien, las teorías científicas y los conceptos científicos no son solamente una colección de enunciados. Las teorías tienen una estructura propia que les da articulación y coherencia y en la cual los conceptos están inmersos y no tienen significado sin esa estructura. Así, el aprendizaje de la ciencia implica que los sujetos se aproximen a una estructura semejante para que las representaciones tengan sentido físico. El aprendizaje, en esta concepción, implica pasar de una situación conceptual - estructural determinada, a otra y no sólo la comprensión particularizada de conceptos. Esta transformación no implica de antemano una visión del cambio de una estructura a otra por sustitución, sino por génesis o evolución. Pero esta génesis o evolución no puede solamente entenderse como una reorganización de ideas previas o primitivos fenomenológicos como apunta diSessa (lo cuál no implica que este proceso no se dé y no sea importante), sino también como una evolución estructural que implica la constitución de relaciones y esquema funcionales⁴⁶.

La respuesta a la segunda pregunta está desde luego determinada por la respuesta a la primera porque las características de un modelo propuesto deben dar cuenta de las ideas y estructura de las explicaciones y/o representaciones de los sujetos, de las teorías científicas y de la evolución de la primera a la segunda. En este sentido, un modelo para que cumpla con esas condiciones debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

Partir de las ideas previas y/o de sentido común de los sujetos

Describir en un modelo coherente las representaciones básicas que los sujetos han construido.

Diferenciar entre las diversas ideas previas para poder establecer un sistema jerárquico

Dar cuenta de cierta estructura y formas de inferencia que los sujetos realizan con esas ideas

Ser correspondiente con un modelo semejante de las teorías científicas

Presentar formas reconocibles de transformación o evolución entre los modelos.

Ser semiformalizado para garantizar la estructura y funcionalidad del modelo.

Las características descritas como podrá apreciarse no son en su totalidad cumplidas por los modelos previamente analizados por lo que es necesario construir (no adecuar) un nuevo modelo cognoscitivo. Este modelo deberá tener como bases la representación teórica de la Física, esto es, los aspectos epistemológicos y formales, la representación de las concepciones de los estudiantes, la representación de la Física escolar y dar cuenta de las posibilidades de transición entre las concepciones de los estudiantes y la Física escolar a la Física formal. Un modelo con estas características, permitirá no sólo dar cuenta de las

⁴⁶ Aunque esta última afirmación tiene fundamento en una concepción piagetiana, no implica que deban asumirse las categorías de la epistemología y psicología genética, en el sentido de la construcción de invariantes por medio de procesos de equilibración y acomodación. Aunque algunos de esos invariantes puedan estar en esas estructuras.

formas de representación de los estudiantes, sino también de un proceso de aprendizaje y podrá constituirse en guía de los procesos de enseñanza; lo cual no está presente de manera explícita en los modelos analizados.

El presente trabajo tiene entonces como propósito, elaborar un modelo cognoscitivo que dé solución a las preguntas planteadas de representación y transición o evolución con las características señaladas, de manera que constituya un paso hacia la integración de las representaciones con los procesos de enseñanza y aprendizaje de la Física.

En el siguiente capítulo se expondrá el modelo propuesto que constituye la base de este trabajo. Para ello, se analizará la estructura de las teorías físicas y se desarrollará un modelo semiformalizado a partir de esa estructura. De la misma manera, se analizará si la construcción del modelo propuesto caracteriza de manera satisfactoria la física de la escuela. En capítulo posterior se hará el análisis correspondiente para las representaciones de los estudiantes y la integración de la propuesta. A los modelos de la propuesta se les denomina "**modelos posibles y modelos parciales posibles**".

CAPÍTULO II

MODELOS DE CONJUNTOS PARA LA REPRESENTACION DE LAS IDEAS DE LOS ESTUDIANTES DE FISICA

En el presente capítulo, se hará la construcción y justificación de una propuesta para representar las ideas previas de los estudiantes y sus posibilidades inferenciales en términos de modelos semiformalizados derivados de la aproximación de la lógica de conjuntos. En esta propuesta se caracteriza la estructura de las teorías matemáticas de la Física y de diversas consideraciones epistemológicas sobre los procesos de construcción del conocimiento científico. También se intenta dar solución a los planteamientos realizados en el capítulo I en el cual se revisó la construcción de diversos modelos bajo distintos enfoques y se puntualizó la necesidad de construir nuevos modelos que den cuenta de la estructura de las ideas previas y representaciones de los estudiantes en torno a cierta fenomenología de la Física, de manera que puedan ser relacionados con la estructura y representación de las teorías formales.

En primer lugar se describirán los elementos teóricos y modelos formales de las teorías físicas y su aplicación en dos casos de la Física: la mecánica clásica de partículas (formulación newtoniana) y la estática de fluidos. Estos dos temas serán utilizados como ejemplos para desarrollar las interpretaciones y aplicaciones de los modelos conceptuales propuestos en este trabajo. Posteriormente se hará la propuesta y su aplicación a los mismos campos, comparando con los modelos y estructura establecidos en las teorías matemáticas de la Física y con la finalidad de proponer mecanismos que permitan comprender y sugerir cómo los modelos propuestos pueden representar, no sólo el estado actual de las representaciones físicas de los estudiantes, sino sus posibles modificaciones para favorecer el aprendizaje de los conceptos físicos. Finalmente, se establecerán los criterios y elementos que justifican la propuesta así como una aplicación de la misma al caso de la Física que se enseña escolarmente como primer acercamiento a las representaciones de los estudiantes y al establecimiento del vínculo entre esas concepciones y las de la Física.

2.1 Marco teórico: El enfoque de la teoría de conjuntos sobre la estructura de los modelos

Para desarrollar el análisis de un conjunto de conceptos articulados y organizados como los de las teorías físicas, y dar cuenta de procesos que requieren de explicación en términos de su estructura lógica - como las jerarquías y relaciones entre leyes físicas - y, por consiguiente, de sus posibilidades para hacer inferencias y deducciones que sean válidas al interior del formalismo, es conveniente determinar el tipo de estructura teórica que dicho formalismo presenta. Este análisis estructural, puede hacerse por medio de la teoría de conjuntos en su forma axiomatizada. A esta forma de estructurar una teoría, se le ha denominado la construcción de modelos a partir de la teoría de conjuntos (*model set theoretic approach*).

La propuesta de este trabajo se basa en la posibilidad de llevar a cabo la construcción de un modelo a partir de la teoría de conjuntos, que dé cuenta de las posibilidades que tienen las nociones o conceptos científicos de los estudiantes de articularse y de ser descritos por un modelo que permita distinguir, entre otros, los conceptos generadores o primitivos y las posibilidades inferenciales que éstos tienen. Para ello, se propone seguir la forma en la que se axiomatiza y estructura una teoría física, con la finalidad de tener un parámetro que permita comparar ambos modelos y poder así, conocer las diferencias en términos estructurales e inferenciales que presentan los estudiantes respecto de las teorías físicas. Para tal efecto, se comenzará por determinar lo que caracteriza un **modelo de teoría** en términos del desarrollo de Patrick Suppes sobre la fundamentación del método axiomático¹.

El punto de inicio para una caracterización axiomática de una teoría, es la determinación de los primitivos o nociones primitivas. En general se puede afirmar que estas nociones primitivas, no son entidades conceptuales que puedan obtenerse de otras, por el contrario, constituyen los elementos fundamentales o axiomáticos sobre los que se basa la estructura de la teoría. Estos primitivos dependerán de cierto ámbito fenomenológico. Para el caso de la Física, constituyen la expresión de una noción que los sujetos construyen como abstracciones de la realidad, sin que esté de por medio, definición posible o prueba experimental.

En la Física tales primitivos son los atribuibles a nociones como tiempo, espacio, carga eléctrica, etcétera. En otras ramas como las Matemáticas, estos primitivos constituyen los axiomas de la Geometría o del Álgebra. En todos los casos estos primitivos son aceptados tácitamente por los sujetos. Esta aceptación puede proceder de la evidencia empírica socializada o mejor dicho compartida o bien, de una abstracción inherente a las formas de construcción en los sujetos, de nociones que permiten la interacción de dicho sujeto con la realidad, como podría inferirse de las estructuras de conocimiento propuestas por Piaget y García².

Definir estos primitivos no es un asunto de simple acuerdo, esto puede ser motivo de grandes dificultades en el propio desarrollo de una ciencia como puede inferirse de numerosos casos en la Historia de la Física. Además, la sustitución de estos primitivos puede llevar a cambios en las teorías físicas como se ha mostrado también en la historia³. Como ejemplo de lo anterior se tiene la teoría de la relatividad especial que modifica los primitivos de tiempo y espacio de la mecánica clásica. (Para el caso de la representación de las concepciones de los estudiantes será necesario, como apuntaremos más adelante, el desarrollo de criterios para determinar esos primitivos o conceptos constrictores como les llamaremos).

Una vez que han sido determinados esos primitivos se establecerá con ellos el conjunto de axiomas que son, como apunta Suppes “los enunciados básicos de la teoría, de

¹ Suppes P. (1966). *Introducción a la lógica simbólica*. CECOSA México.

² Piaget J. y García R. (1989). *Hacia una lógica de significaciones*. Gedisa Editorial. México.

En la segunda parte de este libro García establece entre los objetivos de la teoría lógica de Piaget lo siguiente: “mostrar cómo las relaciones y estructuras lógicas juegan el papel fundamental de instrumentos asimiladores que permiten al sujeto aprender y organizar sus objetos de conocimiento...”

³ Un ejemplo de estas transformaciones es la tesis de Thomas Kuhn sobre la estructura de las revoluciones científicas.

los cuales podemos deducir los enunciados que consideramos verdaderos”⁴. Como puede inferirse de la anotación anterior, la sola determinación de un conjunto de axiomas no es, por sí sola, suficiente para la caracterización de una teoría, es necesario, además, contar con un formalismo deductivo diferente para cada campo. Por ejemplo, en Matemáticas puede ser el Álgebra, el formalismo deductivo o bien el Cálculo y en un caso más general la lógica de predicados o formalización tipo estándar. En la Física, sin embargo, el proceso es más complejo, puesto que no basta el formalismo matemático, se requiere de significados para llevar a cabo una interpretación, lo que implica además de las matemáticas, de un formalismo lógico con significado, como ha hecho notar Mario Bunge⁵.

Otro aspecto que es necesario construir para axiomatizar una teoría es contar con al menos un predicado que vincule los primitivos de tal manera que a la vinculación se le pueda asociar un significado. En el caso de la Física se dice que tenga sentido físico, esto es, que permita la interpretación o representación de una fenomenología específica. Este predicado equivale a poder construir afirmaciones del tipo *esto es* o *de esto se deduce que* o bien *esto pertenece a*, etc.

El establecimiento de los predicados que permiten afirmaciones como las mencionadas implica que se pueda contar con un mecanismo de construcción de relaciones. Esto significa que a partir de los axiomas es posible establecer cadenas de inferencias que permitan afirmar, en términos de esa construcción, las condiciones lógicas de verdad o falsedad de una afirmación sobre el dominio o campo de una teoría.

Un ejemplo clásico es la caracterización de una estructura matemática en términos de conjuntos. Una estructura de este tipo, estará determinada por un conjunto, cuyos elementos se rigen por un una serie de reglas que indican la pertenencia o no, de elementos a ese grupo y que, además, permiten establecer relaciones (operaciones) entre ellos, de tal manera que toda relación será una consecuencia lógica de las reglas o axiomas y esta consecuencia será perteneciente a la estructura; lo que se conoce como cerradura.

Por ejemplo, el conjunto no vacío $U = \langle G, *, ^{-1}, e \rangle$ es un grupo si y solo si para toda x, y, z en G , se tiene

- a) $\forall x, y \in U \quad x * y \in G$ (cerradura)
- b) $\forall x, y, z \in U \quad x * (y * z) = (x * y) * z$ (asociatividad)
- c) $\exists e$ tal que $\forall x \in U \quad x * x^{-1} = e$ (elemento inverso)
- d) $\forall x \in U \quad x * e = x$ (elemento neutro)

En esta estructura de grupo podemos ver cómo la determinación de un conjunto G , las operaciones $*$, $^{-1}$, y el elemento $e \in U$, definen un ordenamiento (cuaterna ordenada) que, bajo las reglas establecidas, describen una estructura inferencial a partir de la cual se podrá afirmar o negar si un elemento cualquiera pertenece al grupo U .

⁴ Suppes P. Op. cit. pp. 305

⁵ Bunge M. (1986) Teorías Físicas en Roller J. L. *Estructura y desarrollo de las teorías científicas*. Universidad Nacional Autónoma de México. pp.113-122

2.1.1 Modelo de una teoría

Una vez que se tiene determinada una teoría por su estructura, puede existir una gran cantidad de casos a los que esa teoría corresponde. En el ejemplo de la teoría de grupos, podemos pensar en diversos conjuntos que cumplen con esa estructura. A los conjuntos específicos que cumplen con la estructura se les denomina **modelos**.

Los modelos pueden ser completamente ajenos entre sí, el único requisito es que estén en correspondencia con la estructura de grupo. A continuación se presentan dos ejemplos. Primer ejemplo: Sea el conjunto G formado por los elementos 1 y -1 , y sea $*$ la operación multiplicación, el elemento identidad es $e = 1$ y el elemento inverso $^{-1}$ aplicado a los elementos $\pm 1 = \pm 1^{-1} = \pm 1/1 = \pm 1$.

Entonces el grupo queda definido como $U \langle (1, -1), *, ^{-1}, 1 \rangle$

Es sencillo mostrar que U es un grupo, para ello basta comprobar que las operaciones $1*1$, $1*(-1)$, $(-1)*1$ y $(-1)*(-1)$ cumplen con los axiomas a), b), c) y d). Este ejemplo, constituye un modelo para U , lo cual se demuestra muy fácilmente.

Segundo ejemplo: Sea G un conjunto de funciones $B = (F, P)$ definidas como aplicaciones biyectivas sobre tres elementos $\{x_1, x_2, x_3\}$.

$$F : x_1 \rightarrow x_2; x_2 \rightarrow x_1; x_3 \rightarrow x_3 \text{ y}$$

$$P : x_1 \rightarrow x_2; x_2 \rightarrow x_3; x_3 \rightarrow x_1$$

Entonces se puede probar que $F^2 = e$ y que $P^3 = e$. En este caso el superíndice indica la aplicación de la función por segunda y tercera vez respectivamente.

Finalmente, se puede encontrar que $P^{-1} = P^2$. Esto se consigue fácilmente como sigue:

$$\text{Como } P^3 = 1, \text{ entonces } P^2 = 1/P = P^{-1}$$

Este conjunto de aplicaciones o funciones biyectivas, constituye también un modelo para U .

El formalismo de la teoría de conjuntos aplicado a la determinación estructural de una teoría, tiene significación inmediata o directa en Matemáticas. Los elementos matemáticos en sí, son entidades que no requieren de interpretación, esto es, son elementos que no tienen significado en otro ámbito de representación. En el caso de la Física, la situación es muy diferente puesto que los elementos como variables y conceptos físicos y las operaciones entre ellos, tienen asignado un significado que implica una interpretación sobre los procesos fenomenológicos que describen o explican. Sin embargo, veremos cómo el formalismo matemático de las teorías físicas, permite hacer una interpretación de esas teorías en términos del modelo de conjuntos. Además, no sólo es posible esta aplicación a teorías que tengan una base matemática operatoriamente definida como las teorías físicas, sino también como veremos más adelante, puede ser aplicable a todo formalismo o semiformalismo que pueda ser descrito en términos de primitivos y ciertos elementos

inferenciales. Como ejemplo se puede mencionar a la lógica silogística y el grupo de transformaciones INRC de Piaget⁶.

2.2 El enfoque de la teoría de conjuntos sobre la estructura de los modelos, aplicado a las teorías físicas

El primer paso que debe darse, para hacer la transposición de la teoría de conjuntos sobre las estructuras de los modelos hacia otro campo que no sean las Matemáticas, es lo que designaremos como "**Interpretación de teoría**". Antes de mostrar en términos formales la estructura relativa a la interpretación de una teoría, es conveniente aclarar que cuando las afirmaciones e inferencias, caen dentro del dominio de significados relacionados con procesos empíricos o mejor dicho fenomenológicos, la formulación de una estructura lógica de alguna manera deberá ser compatible con las ideas intuitivas. Por ideas intuitivas (que como se ha visto en el capítulo anterior constituyen el referente que los sujetos construyen para interpretar la realidad a partir de su interacción fenomenológica y que se han estudiado bajo el nombre de preconcepciones o ideas previas) deberá entenderse en el caso de la Física, las nociones fundamentales que son los referentes perceptibles por los sujetos; por ejemplo, movimiento, masa, tiempo, velocidad, etc. Debe aclararse que estas ideas intuitivas no son la percepción misma, esto es, son elaboraciones conceptuales que el sujeto toma como identificables con su observación pero que para que se constituyan en referentes significativos han tenido que pasar por procesos cognoscitivos complejos para asignarles características. Por ejemplo a la velocidad su carácter relativo, o a la masa su aditividad y conservación.

Determinar las ideas intuitivas implica hacer una elección que sea considerada razonable. Como apunta Sneed "nos vemos forzados a tomar una elección de algunas ideas intuitivas, dejando fuera a otras. En este sentido, la interpretación de una reconstrucción lógica es también normativa"⁷. Por reconstrucción lógica, Sneed comprende la formalización en términos de una estructura lógica (donde puede haber deducciones e inducciones).

Cuando se establece una formalización que da cuenta de la estructura de una teoría, es necesario relacionar los enunciados que se hacen a partir de los elementos de la estructura, con lo que representan para el campo propio de aplicación y significado de la teoría. Por ejemplo, cuando en Física se dice que un campo de fuerzas f , se deriva del gradiente de un potencial E , se tiene que $f = -E$. Esta expresión proporciona una forma matemática de relación de dos conceptos físicos, fuerza y potencial, sin embargo, esto no es suficiente y se requiere de un significado para f y E en un campo de aplicación propio. Existen diversos campos fenomenológicos a los que puede aplicarse la expresión del gradiente de potencial, uno puede ser el gravitacional, otro el eléctrico, etc. En este caso

⁶ El grupo INRC propuesto por Inhelder y Piaget es grupo en el sentido matemático porque tiene definidas operaciones que cumplen las reglas establecidas al inicio de este capítulo. Con este grupo los autores establecen la posibilidad de dar cuenta de los razonamientos de los sujetos con las operaciones lógicas básicas en dieciséis posibles transformaciones. Inhelder B. y Piaget J. *De la lógica del niño a la lógica del adolescente*. (1972) Paidós. Buenos Aires.

⁷ Sneed J. D. (1979). *The Logical Structure of Mathematical Physics*. Reidel Publishing Co. Dordrecht pp 4

gravitacional, el potencial E representará la energía potencial gravitacional y f la fuerza de atracción sobre un objeto que puede ser la Luna o una manzana.

Los enunciados que se deriven - en el caso gravitacional sobre el movimiento de los objetos en la cercanía de un campo gravitacional - de la aplicación de una regla o una operación, deben tener significado empírico, esto es, deberá poder decirse si es un enunciado falso o verdadero⁸. Así, podemos decir que a través de un enunciado con significado empírico (falso o verdadero) se ha establecido una **interpretación** del lenguaje formal.

“Formalmente, una interpretación de un lenguaje formal es una función que mapa un conjunto de predicados (oraciones) del lenguaje formal sobre un conjunto de dos objetos $\{V, F\}$ ”⁹ (aquí V significa verdadero y F falso). En otras palabras, puede decirse que cada interpretación de los símbolos no - lógicos (no formales) determina una función del conjunto de predicados del lenguaje formal a un conjunto de afirmaciones empíricas.

Si se designa a una teoría con el símbolo T y un predicado de P , entonces $I(P)$ es una interpretación de P de T . Si otro predicado Q es una consecuencia lógica de P entonces, una interpretación $I(Q)$ será una consecuencia lógica de $I(P)$. Esta propiedad de obtener consecuencias lógicas de las interpretaciones de los predicados a partir de las inferencias lógicas de los predicados dentro de la teoría, garantiza que las consecuencias lógicas derivadas de los axiomas, tendrán una interpretación que podrá ser contrastada empíricamente.

Deben ser mencionados dos aspectos más sobre el formalismo antes de pasar a utilizarlo en una teoría física. Uno será referente a los tipos de términos y de funciones que pertenecen a una estructura teórica y sus aplicaciones y otra, será la diferenciación de los tipos de modelos que pueden pertenecer a una teoría. En cuanto al primer aspecto, diremos que toda función f definida sobre una teoría T , tiene una aplicación $A_f(T)$ y que una función f puede ser teórica o no teórica. Que la función f tenga una aplicación, significa que, a partir de los elementos de la teoría, es posible obtener una consecuencia lógica con significado dado a través de la interpretación. Por otro lado, las funciones f pueden estar constituidas por términos y relaciones que pueden ser teóricos o no, que sean teóricos significa que todos sus elementos son pertenecientes al conjunto de axiomas de la teoría y que no sean teóricos significa que están constituidos por términos que no pertenecen al lenguaje formal, sino que están referidos a términos provenientes exclusivamente de la fenomenología. Otra forma de expresarlo es la siguiente. Una función de base empírica (no teórica) debe poder determinarse sin presuponer la validez de la teoría y por el contrario, la función teórica presupone tal validez.

En relación con el segundo aspecto, baste con ejemplificar cómo se pueden establecer dos tipos de modelos; uno construido solamente con términos no teóricos y otro tanto con términos teóricos como no teóricos. Para el primer caso, podemos ver cómo, en la mecánica se puede describir el movimiento de los objetos con el formalismo matemático sin considerar axiomas teóricos como los relacionados con las leyes de Newton o de la Energía; basta sólo una descripción cinemática. Esta descripción cinemática es un ejemplo donde se

⁸ En este caso falso y verdadero no son en sentido absoluto. Deben interpretarse como correspondientes o no a una aseveración sobre las características de las variables observables de un fenómeno.

⁹ Sneed J.D. Op. cit. pp 6

tienen funciones no teóricas. Para el segundo caso, las funciones deben ser teóricas y sus explicaciones serán referidas siempre a términos teóricos o axiomáticos, como el principio de conservación del momento o la segunda ley de Newton, por citar algunos.

De manera simple se dirá que un modelo de teoría es un **modelo posible** de cuando éste es un modelo para el cual las funciones y predicados específicos son teóricos y, un modelo será **modelo potencial posible** de cuando las funciones y predicados son no teóricos como se han definido previamente.

Sobre un cierto campo fenomenológico, será posible tener modelos posibles y modelos potenciales posibles como aplicaciones e interpretaciones de una teoría. Esto permite contar con niveles explicativos y predictivos que, como veremos más adelante, no sólo nos permiten describir ciertos fenómenos naturales, sino también describir cambios en el desarrollo de una teoría. Con estos modelos se tendrá una visión dinámica del desarrollo de las teorías científicas. Lo anterior abre la posibilidad para interpretar también las concepciones de los estudiantes en torno a ciertos ámbitos fenomenológicos y poder así, establecer una comparación que nos indique los cambios posibles que llevarían a los estudiantes hacia una mejor comprensión de los conceptos científicos.

A continuación se presentará cómo se establece el formalismo de una teoría como la mecánica de partículas y la estática de fluidos (temas que se analizarán en este trabajo), formalismo que constituirá el punto de partida para pasar posteriormente, a una representación semiformalizada de las concepciones de los estudiantes que se abordará en el siguiente capítulo. En este proceso se requerirá aportar, además de los aspectos lógicos de la construcción, de un aspecto metodológico que permita crear las categorías necesarias para la construcción de los modelos representacionales de las concepciones físicas de los estudiantes.

2.2.1 La estructura lógica de la mecánica clásica de partículas en términos de los modelos de conjuntos

Para mostrar la construcción de una estructura lógica en un campo de la Física, como la mecánica de partículas, se seguirá el formalismo desarrollado por J. Sneed,¹⁰ quien formuló esta estructura de manera que puedan obtenerse no solo consecuencias lógicas inmediatas o aplicaciones con ejemplos triviales, sino que también plantea aspectos teóricos de los conceptos como masa, fuerza y su imposibilidad de reducirse a definiciones operacionales.

Se comenzará por definir lo que llamaremos el primer nivel, esto es el nivel más inmediato, referido a términos fenomenológicos o no teóricos, como son los relativos a la cinemática. Entonces se podrá decir que un predicado x es una partícula en cinemática de la siguiente forma:

D(1) *cinemática de partículas.*

es una Partícula Cinemática (PC) si y solo si, existe un conjunto P y un conjunto T tales que:

¹⁰ Sneed J.D. Op. cit

$$= \langle P, T, s \rangle$$

P es un conjunto finito no vacío.

T es un intervalo de números reales.

s es una función de $P \times T$ en el conjunto ordenado de números reales, tal que para todo $p \in P$, $t \in T$ se tiene que $D^2s(p, t)$ existe.

Lo anterior significa que un predicado puede afirmar que el movimiento de una partícula que se describe por las reglas de la cinemática, deberá afirmar primero la existencia de un conjunto de tales partículas. Por ejemplo, si nos referimos a un objeto como una pelota, el conjunto P tendrá una partícula, si es el sistema Tierra - Sol - Luna, tendrá tres partículas y así sucesivamente. También se requiere un intervalo de tiempo definido por el conjunto T , este intervalo estará referido a los números reales positivos. Para poder describir el movimiento, será necesario la definición de una función s , dependiente de p y t , que sea continua, esto es diferenciable. Esta última condición, garantiza que el espacio en el que se define la función s , es continuo y que se podrá caracterizar el movimiento en términos de sus derivadas. Por ejemplo, la primera derivada se denominará velocidad y la segunda aceleración. Debe notarse aquí, que al hacer corresponder los términos de velocidad y aceleración con las características de la función de posición s , se está haciendo una interpretación, esto es, asignando un significado empírico a una función (no teórica en este caso) dentro del lenguaje formal. De hecho los términos "velocidad" y "aceleración", son caracterizados por la percepción del sujeto, pero no constituyen primitivos ni teóricos ni fenomenológicos.

La caracterización cinemática de una partícula constituye un **modelo potencial posible** para una teoría mecánica de partículas. Esto es debido a que, como se muestra en la determinación de conjuntos y funciones, no existe ningún término teórico. Los primitivos utilizados (desplazamiento y tiempo) son exclusivamente fenomenológicos.

El siguiente paso será definir un sistema clásico de partículas. Para ello, deberán introducirse las funciones teóricas que caractericen a cada partícula y sus interacciones. Esto se hará a través de los conceptos de masa y fuerza.

Lo primero será que el predicado sea una partícula cinemática, por lo que se tiene:

D2 sistema clásico de partículas

Si $\langle P, T, s \rangle$ es una cinemática de partículas, entonces existen m y f , tales que

$$= \langle P, T, s, m, f \rangle$$

m es una función de P en los números reales tal que, para todo $p \in P$, $m(p) > 0$

f es una función de $P \times T \times I$, hacia el conjunto de triplete ordenado de números reales tal que para todo $p \in P$ y $t \in T$, entonces $\lim_{i \rightarrow \infty} f(p, t, i)$ es convergente.

Con D2, se ha asignado un número real positivo a cada partícula, esta propiedad sin embargo no indica, como era de esperar, que a diversas partículas pueda asignarse la misma masa. Por otro lado, también se ha determinado una función extensiva dependiente de la partícula y del tiempo y que por ser extensiva, se puede sumar produciendo un efecto único o neto sobre la partícula p , este es el sentido de asegurar que la sumatoria de las fuerzas sea convergente. Un conjunto que satisface las condiciones expuestas constituye un **modelo posible** de un sistema clásico de partículas.

El formalismo expuesto con D1 y D2, sin embargo aún no es suficiente, quedan varios aspectos por determinar. Por ejemplo, la función masa asignada a una partícula ¿qué restricciones debe tener?, ¿es invariante en el tiempo?; la función fuerza ¿puede ser la misma aplicada a partículas diferentes? Preguntas como las precedentes, llevan a definir **constricciones o condiciones de ligadura** a las funciones teóricas (no así a las fenomenológicas). Estas constricciones, dentro del formalismo - en este caso - expresarán intuiciones sobre la naturaleza de la materia y sus interacciones, que no son demostrables en toda situación, pero que sin su aceptación, la teoría no podría tener un significado generalizable, aspecto muy importante para el conocimiento científico.

Estas constricciones son además necesarias dentro del formalismo puesto que al ser aplicado a una partícula o conjunto de partículas, deberá poder determinarse si la aplicación puede llevar a una interpretación única sobre un fenómeno específico. El conjunto de aplicaciones se define como el conjunto de todas las posibles partículas en un tiempo dado, para las cuales, un predicado se cumple dentro del formalismo. En términos del lenguaje lógico una aplicación intencional se define como $Q = \{ \langle P, T_i^j, s_i^j \rangle \}$. En este caso, el superíndice j , indica el intervalo en el cual la partícula está en movimiento.

La restricción será entonces una regla aplicable en toda situación. En el caso de los sistemas clásicos de partículas (SCP), las constricciones son la invarianza de la función masa (lo que llevará a una ley de conservación), la naturaleza de la fuerza aplicable a diversas partículas (que será determinado por la segunda ley de Newton) y el principio de relatividad de Galileo que como apunta Moulines,¹¹ es una restricción que es necesaria introducir, para garantizar que el modelo posible, es aplicable en cualquier marco de referencia inercial, aspecto necesario para que la primera ley de Newton tenga validez en todo sistema. Debido a que el formalismo para definir las constricciones no será utilizado posteriormente, no se describirá aquí. Sin embargo el concepto de constrictor y en especial los de invarianza de la masa y la generalización de las fuerzas, serán elementos muy importantes para el desarrollo posterior en la caracterización del semiformalismo que será propuesto y para su relación con la estructuración de las ideas de los estudiantes.

Además de las constricciones, es necesario introducir lo aquí se denominará "reglas de correspondencia" (no llamadas así por Sneed) y que constituirán las relaciones entre las funciones que permitirán obtener inferencias a partir de los elementos del sistema clásico de partículas. Estas relaciones son las que determinarán el tipo de formalismo que operará para las partículas. En este caso se utilizará siguiendo con el desarrollo de Sneed, las leyes de Newton (podría haberse utilizado el formalismo de Lagrange o el de Hamilton).

¹¹ Moulines U. (1982) *Exploraciones Metacientíficas*. Alianza Editorial. Barcelona

Se decide utilizar las leyes de Newton por ser las más cercanas a las construcciones de los estudiantes, y por ser además, el motivo principal de la enseñanza de la mecánica en la escuela, desde la secundaria hasta la licenciatura. En el caso de la mecánica de Newton, estas reglas de correspondencia constituyen un sistema teórico que permite en conjunto con las constricciones, contar con un sistema de operación y de interpretación de los sistemas físicos en cuanto a la descripción causal de sus trayectorias y su evolución en el tiempo. No es casual, que haya sido el propio Newton quien comprendió esto, al concebir que las reglas que había establecido para el movimiento de los objetos en la superficie terrestre, eran aplicables al movimiento de los planetas. Con esa consideración, Newton dio el paso más importante del siglo XVII, al aplicar su mecánica de partículas al movimiento de los planetas alrededor de Sol.

D3 *Formalismo clásico de la mecánica de partículas*

Si es un sistema clásico de partículas y existen P, T, s, m, f tales que:

$$= \langle P, T, s, m, f \rangle$$

Para toda $p \in P$ y $t \in T$ $m(p)D^2s(p,t) = f(p,t,i)$ (segunda ley de Newton)

$$f(p,t,i) = -f(q,t,i) \quad q \in P \text{ (tercera ley de Newton)}$$

Con la concatenación de D1, D2 y D3, se tiene caracterizado en términos de la mecánica clásica todo sistema de partículas y sus interacciones. En palabras de Sneed "Encuentre un conjunto de partículas $\{p\}$ y un conjunto de intervalos de tiempo $\{T\}$ tal que es posible pensar que el contenido empírico de la mecánica de partículas es aproximadamente este. El movimiento de cualquier conjunto de partículas P durante un intervalo de tiempo T puede ser explicado por las leyes de la mecánica. Es decir cada triplete $\langle P, T, s \rangle$ es una descripción cinemática de un sistema físico cuyo movimiento puede ser explicado por la mecánica clásica de partículas. La mecánica clásica de partículas es aplicada para explicar ese movimiento por medio de la asignación de masas y fuerzas a las partículas P tal que tomadas de conjunto con las posiciones del observador s proporciona un modelo para la mecánica clásica de partículas (MCP)"¹²

2.2.2 *La estructura lógica de la estática de fluidos en términos de los modelos de conjuntos*

Se propone ahora una formalización - no desarrollada previamente - semejante a la desarrollada para la mecánica de partículas, para el otro campo que se analizará en este trabajo, la estática de fluidos; en especial las relaciones entre presión y flotación. El concepto de presión, será en este formalismo equivalente al de fuerza para la dinámica de partículas, puesto que con relación a él, se describirán las interacciones entre fluidos y en el interior de un fluido. En este caso, en lugar del concepto de partícula, utilizaremos el elemento unitario de un fluido al que designaremos por la variable dF . Esta variable tiene

¹² Sneed J.D. Op. cit pp123

atributos semejantes a la idea de partícula en cuanto a que se considera un elemento indivisible, abstracto y que se ubica en el espacio por un conjunto de coordenadas cartesianas y con volumen diferencial dV .

Como se trata de fluidos en condición estática, no será necesario determinar las posiciones en el espacio de cada elemento del fluido. Solo interesará la posición en una sola dirección h que representa la profundidad con respecto de una superficie.

Otras variables de los fluidos que se utilizarán son la densidad ρ - que como la masa será un factor al que se le asigna un número real y como para la masa, también será un elemento constrictor, aunque a diferencia de ésta, no es una variable extensiva - y la presión p que será una función de la profundidad y de la densidad.

Debe hacerse notar en este momento, que a diferencia del formalismo de la mecánica clásica de partículas que tiene como base un modelo potencial posible que representa sólo a los elementos no teóricos o fenomenológicos que constituyen la cinemática, en este caso de la estática de fluidos, los elementos primitivos son elementos teóricos como la densidad y la presión.

Esta diferencia entre los dos campos, plantea una situación de construcción conceptualmente diferente y que tendrá repercusiones en la construcción del concepto de presión no sólo en los estudiantes, sino también en la historia de la Física, en donde el concepto de presión interna aparece en una época tardía hasta que se concibe a un fluido compuesto como aquí se ha descrito, de entidades abstractas como los elementos infinitesimales de fluido, idea propuesta hasta el siglo XVIII por J. Bernoulli¹³.

D1 *Estática de fluidos*

Definamos ahora la estructura de un fluido estático. Diremos que un elemento ω es la caracterización de un fluido cuando

$$\omega = \langle dF, h, \rho, p \rangle$$

h es una función en los números reales tal que $h \geq 0$

ρ es una asignación para cada dF en los números reales tal que $\rho \geq 0$

p es una función del tipo $p(dF, h, \rho)$

En este momento cabe hacer la distinción sobre la naturaleza del fluido. Este puede ser líquido o gas. La diferencia formal entre esos estados de agregación de la materia está en las constricciones impuestas a la densidad. En el caso de los líquidos, la densidad deberá permanecer constante - aspecto que se cumple en buena medida - lo que hará que el fluido sea incompresible, esto es

$$\rho = \text{cte. (fluido incompresible)}$$

¹³ Truesdell C. *Ensayos de Historia de la Mecánica*. Editorial Tecnos Madrid. Truesdell hace notar como hasta que no aparece la idea de presión interna, no se desarrolla el concepto de manera propia a los fluidos y no como un factor externo.

Esta condición no se cumple para los gases, y la densidad, estará en función de otra variable no definida previamente y que es el volumen asociado a dF , que el gas ocupa en condiciones de temperatura y presión dadas. Debido a que en este tratamiento estático no intervienen las condiciones térmicas, sólo se tomará en cuenta la presión y el elemento diferencial de volumen. En condiciones similares a la determinación de un líquido, en el gas la densidad quedará descrita como la función:

$$= (dV, m) \text{ con } dV_i \quad \text{O (fluido compresible)}$$

y

$$p = \text{cte (ley de Boyle)}$$

Ahora se establecerán dos especializaciones relativas a los líquidos (Por especialización entenderemos como apunta Stegmüller¹⁴ un caso específico del conjunto de aplicaciones del conjunto potencia que guarda la misma estructura).

D2 Flotación

Si un objeto definido por su peso $W(m, g)$ es inmerso en un líquido, entonces la condición de flotación es tal que,

$$h/dV \quad p_{\text{in}} \quad W \quad \text{(Principio de Arquímedes)}$$

D3 Condición de cambio de presión

Si un líquido se encuentra confinado en un volumen, entonces para toda fuerza aplicada se cumple que:

$$f(x)dh/dV = p = p_{\text{in}} + \text{cte} \quad \text{(principio de Pascal) para todo } F.$$

A pesar de las diferencias por la especificidad de cada dominio, es posible reconocer una estructura general en la formulación de cada modelo. Esta estructura permitirá plantear una formulación modificada, para poder hacerla transferible a las concepciones e interpretaciones de los estudiantes sobre cierta fenomenología.

La estructura general que se planteará a continuación, está basada en el establecimiento de conjuntos que describen diferentes niveles de interpretación y que tienen su expresión específica en modelos como los que se han desarrollado para la mecánica clásica de partículas y para los fluidos estáticos.

¹⁴ Stegmüller W. (1979) A Combined Approach to the Dynamics of Theories. En Radnitzky & Andersson. *The Structure and Development of Science*. Reidel Publishing Co. Dordrecht. pp 151 - 186

2.3 Estructura general de teoría

La aplicación de la teoría de conjuntos para la caracterización de los modelos de las teorías científicas propuesta por Sneed¹⁵ y adoptada por Stegmüller¹⁶ y Moulines¹⁷ entre otros, parte de la determinación de que en una teoría o más específicamente en un elemento teórico, - que es definido por Sneed como “el aparato que es usado para hacer aserciones empíricas acerca de los elementos del rango de aplicaciones propuestas”¹⁸ - está compuesto por un núcleo y un conjunto de aplicaciones

Este elemento teórico, por consiguiente constará del par ordenado $\langle K, I \rangle$. K es el núcleo de la teoría e I es el conjunto de aplicaciones (que Sneed denomina aplicaciones intencionales). El núcleo está compuesto por una serie de conjuntos potenciales que determinan los elementos fenomenológicos y teórico - conceptuales que definen las interpretaciones de la teoría sobre los hechos. Estos modelos tienen niveles de representación que van desde la fenomenología directa como el caso de la cinemática, hasta las leyes científicas específicas como las que se mostraron en la mecánica clásica de partículas o la estática de fluidos.

El primer nivel y más amplio está determinado por lo que se denomina Modelo Potencial Posible, el segundo nivel está constituido por un conjunto ampliado en el que se incluyen los términos teóricos, esto es, términos que son el resultado de una elaboración conceptual y que se denomina Modelo Posible. En tercer lugar se encuentra un modelo, subconjunto del Modelo Posible que expresa las leyes específicas y que se denomina simplemente Modelo.

2.3.1 El conjunto Modelo Potencial Posible M_{pp} .

Este modelo no vacío, está formado por términos que tienen una referencia inmediata en la fenomenología y en relaciones fenomenológicas tales como las relaciones entre variables no teóricas descritas anteriormente. Un ejemplo en términos de los modelos construidos previamente, es el modelo de la definición D1 que representa la cinemática de partículas. En ese modelo cinemático, todos los términos s y t son continuos y su relación $s(p, t)$ es derivable al menos hasta la segunda derivada y cumple con que todos sus términos son fenomenológicos en el sentido de que no se requiere ninguna suposición teórica para su validez; la posición y el tiempo son variables que se miden y perciben directamente por los sujetos, por lo que su representación tiene un significado en sí mismo, no dependiente de otros términos. Por su parte, las relaciones funcionales sobre $s(p, t)$, quedan validadas por la medición de las posiciones y el tiempo y por la concordancia con la intuición. Un Modelo M_{pp} quedará descrito de la siguiente forma:

¹⁵ Sneed J.D. Op. cit.

¹⁶ Stegmüller W. (1986) Cambio teórico accidental (no substancial) y desplazamiento de teorías. En Rolleri J.L. *Estructura y Desarrollo de las Teorías Científicas*. Universidad Nacional Autónoma de México pp 215 - 250

¹⁷ Moulines U. Op. cit.

¹⁸ Sneed J.D. Problemas filosóficos en la ciencia empírica de la ciencia: un enfoque de teorías. En Rolleri J.L. *Estructura y Desarrollo de las Teorías Científicas*. Universidad Nacional Autónoma de México pp 186

X es un Modelo Potencial Posible cuando

m es un número entero tal que $m > 0$

dado $x \in X$ hay $n_1, \dots, n_m \in M_{pp}$ tal que

$x = \langle n_1, \dots, n_m \rangle$

donde n_1, \dots, n_m son los elementos fenomenológicos

Por elemento fenomenológico debe entenderse, todo aquel que es un observable físico, esto es, una variable que describe un parámetro directamente medible.

2.3.2 El conjunto Modelo Posible M_p

Este conjunto contiene todos los elementos que pueden describir y explicar una situación fenomenológica específica. Este modelo es una extensión de M_{pp} porque además de contener todos los términos fenomenológicos, contiene todos aquellos términos (conceptos) que se han construido para crear un sistema interpretativo de la realidad y que tienen validez (o cobra significado) sólo en la teoría, esto es, no son determinados por primitivos fenomenológicos, aunque pueden partir de ellos. Que un término sea teórico es en cierta medida un aspecto relativo, depende del nivel de la teoría y del campo de aplicación. Tomando como ejemplos los modelos previamente elaborados, la mecánica clásica de partículas, está formulada como M_p cuando se introducen los elementos masa y fuerza y en el caso de la estática de fluidos desde el principio con la inclusión del concepto de presión.

El modelo posible quedará definido entonces como:

X es un Modelo Posible cuando

$X \in M_p$

m y j son números enteros tales que $m > 0$ y $j > 0$

si $x \in X$, existen $n_1, \dots, n_m; t_1, \dots, t_j \in M_p$ tales que:

$x = \langle n_1, \dots, n_m; t_1, \dots, t_j \rangle$

En este modelo además de los elementos fenomenológicos n_1, \dots, n_m de M_{pp} , se tienen los elementos teóricos t_1, \dots, t_j los cuales representan conceptos abstractos, esto es, entidades físicas que se construyen para dar explicaciones causales.

2.3.3 El conjunto Modelo M

Este conjunto es subconjunto de M_p y contiene sólo los elementos teóricos que son leyes físicas, esto es, aquellos constructos y relaciones que definen una ley física. En palabras de Sneed, "M elige el conjunto de los modelos posibles del aparato conceptual entero,

precisamente aquellos que satisfacen ciertas leyes"¹⁹. De esta forma, M puede estar constituido por términos tanto fenomenológicos o no teóricos como teóricos, que satisfacen leyes específicas. Esto constituye lo que Kuhn²⁰ ha denominado "*modelos paradigmáticos*" y que, por ejemplo, serán todos aquellos modelos que describen una situación física particular. Por ejemplo, en el caso de la mecánica clásica de partículas, la caída de un objeto o el movimiento de la partícula en un resorte - masa, etc., y en el caso de los fluidos el equilibrio hidrostático o la presión barométrica en una columna de mercurio.

2.3.4 Condiciones de Ligadura o Constricciones C

Con los elementos de los modelos descritos, se tiene un conjunto de términos que pertenecen a una teoría y que cumplen por lo tanto con ciertas leyes físicas. Sin embargo, no se puede determinar si existen relaciones o identidades entre esos términos. Por ejemplo, ¿deberá considerarse el mismo valor de la masa de una partícula para diversas situaciones? (recuérdese que antes de la relatividad general de Einstein, se consideraba una masa gravitacional y otra inercial, por lo que este problema no es ingenuo), ¿la unión de partículas deberá ser la suma de las masas?, ¿la fuerza es una característica intrínseca de cada partícula o sólo la designación de su interacción con otras? Preguntas como las anteriores requieren de anexar a los modelos condiciones específicas bajo las cuales se asegure que un modelo puede relacionarse con otros en todas las condiciones específicas, esto es, en todas las aplicaciones. Ejemplos de estas condiciones de ligadura o constricciones para la mecánica son, como hemos apuntado, la identidad de la masa para una misma partícula (correspondiente a su conservación) y el principio de relatividad de Galileo, que permite determinar la trayectoria de una partícula desde marcos de referencia distintos y para observadores distintos. Para el caso de la estática de fluidos estas condiciones de ligadura son, la densidad constante para los líquidos y la relación presión volumen para los gases. En un tratamiento más amplio, la ley de Boyle como restricción probablemente no tendría sentido, puesto que debería ser sustituida por relaciones probabilísticas, debido a que en los fluidos, el concepto de partícula pierde individualidad.

Con la adición de las condiciones de ligadura se completan los elementos formales para relacionar los términos teóricos y no teóricos con condiciones específicas, leyes y procesos matemáticos que permiten bajo una lógica de conjuntos, construir interpretaciones. Estas interpretaciones no son arbitrarias, sino que están determinadas por el mismo entorno fenomenológico que está presente en los términos no teóricos. Así la cuaterna formada por los M_{pp} , M_p , M y C, caracterizan lo que Sneed²¹ denomina el núcleo del elemento teórico y que se expresa como:

$$K = \langle M_{pp}, M_p, M, C \rangle$$

¹⁹ Sneed J.D. Op. cit (1986) pp 190

²⁰ Kuhn para dar cuenta del desarrollo que denomina normal para las teorías científicas, esto es, la manera en la que una teoría establecida se desarrolla, tiene su origen en lo que designa como "paradigma", término que intenta dar cuenta de un modelo que determina una clase de construcciones y procesos sobre los que esa teoría se irá conformando. Kuhn T.S. (1962) *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. Fondo de Cultura Económica. México

²¹ Sneed J.D. (1979) Op. cit.

El núcleo teórico, no tiene significado en sí mismo, si no existe un campo de aplicación, esto es un conjunto I, sobre el cual una aplicación de K, puede afirmar o negar una oración con significado fenomenológico. De esta forma el elemento teórico, está formado por el núcleo K y el conjunto I y definido por la dupla:

$$T = \langle K, I \rangle$$

Debe notarse que el conjunto I, es un subconjunto de todas las aplicaciones posibles de K sobre los M_{pp} puesto que éste conjunto incluye todos los términos no teóricos del dominio de T, es decir toda la fenomenología posible relativa a T. Por ello, I será un subconjunto del conjunto potencia de M_{pp} y un elemento de las aplicaciones de K, esto es:

$$I \in P_{ot}(M_{pp}) \text{ y } I \in A(K)$$

Con el elemento teórico T, (teoría sobre dominio específico), se tienen conjuntos modelo y aplicaciones que permiten formalmente, caracterizar una teoría de dominio específico. Desde luego que una descripción detallada requiere además, de incorporar una red de estos elementos teóricos constituida por las especializaciones, esto es, por situaciones o casos específicos. Por ejemplo, una especialización en la mecánica clásica de partículas es el péndulo simple, en el cual hay condiciones como la aproximación para ángulos pequeños y la variación de la fuerza en función del desplazamiento angular. Además de las redes que abarcarían todo el dominio conocido de una teoría, a los elementos teóricos debe pedirse que sean relacionables con otros elementos teóricos y que permitan dentro de su formalismo el desarrollo de las especializaciones (ciencia normal en términos de Kuhn²²) y la transformación de los núcleos teóricos para que sea posible construir nuevas representaciones. Estos aspectos también han sido trabajados por Sneed y Stegmüller y analizados por Kuhn, pero no se considerarán en este trabajo.

2.4 Una propuesta para las representaciones de las ideas de los estudiantes.

2.4.1 Aplicación a la física escolar

La tarea ahora es pasar a un nivel menos formalizado, pero más cercano al pensamiento de los estudiantes. Para ello, se procederá a transformar en los modelos el núcleo del elemento teórico, para que puedan representar conjuntos de afirmaciones sobre aspectos fenomenológicos y teóricos, pero que no se expresan dentro de la estructura axiomática formal. Así, en lugar de que los elementos de los modelos expresen leyes específicas, y términos (teóricos y no teóricos) expresarán oraciones y conceptos relativos a descripciones e interpretaciones. También se modificará la idea de condiciones de ligadura,

²² Como se apuntó, para Kuhn la ciencia normal es aquella que se construye a partir de un nuevo paradigma y que en su desarrollo lleva implícito tanto aspectos estructurales como conceptuales y normativos. Kuhn T.S. Op. cit.

para que sean elementos intrínsecos, esto es, pertenecientes a los modelos y no como condiciones externas a ellos. Esto tiene apoyo en una sugerencia hecha por T.S. Kuhn cuando establece “Y por consiguiente me pregunto sobre la posibilidad de invertir el orden de la introducción. Es decir, ¿no se podrían introducir las aplicaciones y las condiciones de ligadura como nociones primitivas, dejando que la investigación ulterior revelara la medida en que de ellas se seguirán criterios para la identidad de teorías y para la distinción teórico - no teórico?”²³

Esta sugerencia es muy importante porque al construir los modelos a partir de las aplicaciones y las condiciones de ligadura, como elementos primitivos, se abre la posibilidad de utilizar las ideas previas o intuitivas como los elementos básicos o soportes de los modelos que los sujetos construyen para representar y explicar su realidad observable sin tener que determinar construcciones teóricas - que los sujetos por lo general no elaboran - como los axiomas de los modelos formales o matemáticos. Partiendo de los elementos intuitivos o comunes; considerados como equivalentes a los axiomas en la construcción de los modelos, se logra una aproximación más cercana a los procesos de interpretación que pueden derivarse de un pensamiento físico cotidiano. Efectivamente, es común que aspectos como la invariabilidad de la masa, la independencia de observadores en situaciones de simultaneidad, etc., sean asumidos como condiciones incuestionables por la mayoría de los sujetos.

Este aspecto, sin embargo, debe ir más allá que considerar a las condiciones de ligadura formales en primitivos, pues como puede derivarse de los estudios sobre ideas previas, existen otros elementos en el pensamiento de los estudiantes que pueden cumplir con esta función constrictora y que, sin pertenecer al formalismo físico, cumplen una función semejante en la construcción conceptual de los estudiantes. Más adelante analizaremos este aspecto y otros sobre la caracterización de los elementos de los modelos para que puedan ser utilizados en la interpretación de las ideas de los estudiantes. Por ahora replantaremos la teoría de conjuntos sobre los modelos de teoría que se han presentado, con la finalidad de representar con ella la Física que se enseña en la escuela. En el capítulo III, se mostrará su aplicación a las ideas previas de los estudiantes.

2.4.2 De los modelos teóricos a los modelos representacionales

A continuación se plantea una propuesta de transformación del formalismo de los modelos de la física matemática hacia un semiformalismo que permita construir modelos para representar las concepciones de los estudiantes. Esta transformación se hará en dos pasos. Primero las adecuaciones para representar la Física que se enseña escolarmente y posteriormente, las adecuaciones para representar las concepciones físicas de los estudiantes.

Para la formulación de esta propuesta, será necesario además de seguir la sugerencia de Kuhn, modificar los elementos que conforman el núcleo de la teoría y los conjuntos modelo, esto es, los modelos potenciales posibles y los modelos posibles. Este cambio

²³ Kuhn T.S. El cambio de teoría como cambio de estructura: comentarios sobre el formalismo de Sneed. En Roller J.L. Estructura y Desarrollo de las Teorías Científicas. Universidad Nacional Autónoma de México pp 251 - 274

repercutirá en los elementos (teóricos y no teóricos) y su significado, de manera que, conservando la estructura del elemento teórico y su posibilidad de representación de estructuras físicas, se adecuen al conocimiento escolar de la Física y a las construcciones previas de los estudiantes.

2.5 Equivalencia elementos teóricos - conceptos constrictores

El primer paso será tipificar lo que serán los elementos equivalentes a los elementos teóricos y, de manera correspondiente, los equivalentes a los elementos no teóricos. Se ha mostrado que los elementos teóricos en el formalismo de la teoría de conjuntos, son construcciones abstractas que permiten la explicación de aspectos fenomenológicos en términos de relaciones matemáticas y de relaciones de causalidad como se ha mostrado para el caso de la mecánica con el término de fuerza y el de presión para los fluidos. Estos elementos teóricos son inherentes a la teoría y no tienen significado sin ella y, por otro lado, son los que permiten establecer inferencias y predicciones que constituyen los elementos del conjunto de aplicaciones I.

Los elementos equivalentes a los teóricos que se propondrán, no están necesariamente vinculados a un formalismo matemático claro y suficiente, sin embargo deberán determinarse de tal manera que cumplan con la función de regulación (constricción) en la construcción de inferencias para constituir un conjunto de aplicaciones. Estos elementos equivalentes, tampoco deberán perder el carácter abstracto y generador de una estructura para la representación de la realidad. Debido a las características que se acaban de describir, estos elementos correspondientes a los elementos teóricos pueden denominarse **conceptos constrictores**. Antes de describir todas sus características y las reglas que los hace conceptos constrictores, analizaremos qué conceptos de la mecánica clásica como se enseña en la escuela, cumplen con esta función.

2.5.1 El caso de la mecánica clásica: Fuerza y movimiento

En un curso tradicional de mecánica clásica, el primer concepto abstracto que se presenta es el de partícula. Esta se concibe como un elemento puntual sin dimensiones pero con masa. En este caso podemos ver cómo, las condiciones de ligadura o constrictoras de Sneed y Stegmüller, están presentes porque la asociación de una masa a la partícula se asume con propiedades como la extensión o aditividad y sobre todo, en la asociación de una masa específica e intransferible de cada partícula. La sugerencia de Kuhn, de convertir estos elementos de ligadura en primitivos, se ve fortalecida porque el propio concepto de partícula y su masa asociada (la cual es permanente) además de ser la entrada a la mecánica, es cercana a la intuición ya que no se tiene problema en asociar una masa a un objeto aún si éste es abstracto como una partícula. Así, todo objeto real, quedará representado como una partícula y su masa en el centro de masa²⁴. Si bien una partícula no tiene dimensiones, sí tiene ubicación en el espacio y por lo tanto todo movimiento quedará caracterizado por una

²⁴ El centro de masa es el lugar geométrico donde se puede ubicar la masa del objeto para hacer descripciones de su movimiento y de las fuerzas aplicadas. Esta cantidad se define como $C.M = m_r/m$ donde m es la masa total. Esta definición es para un conjunto de partículas.

función de posición y tiempo, esto es $s(s,t)$. Esta relación define dos conceptos cinemáticos; la velocidad (primer derivada de $s(s,t)$) y la aceleración (segunda derivada de $s(s,t)$). Estos conceptos no son constrictores porque determinan sólo las relaciones espacio - temporales de manera independiente de las interacciones entre partículas. Sin embargo, hay un aspecto más fundamental que permite esta descripción espacio - temporal, y es que para toda partícula que describe un movimiento desde un marco de referencia, su posición, velocidad y aceleración, tiene una descripción equivalente (se puede encontrar una transformación) desde otro marco de referencia cuando entre ellos existe un movimiento relativo uniforme. Esto es el principio de relatividad de Galileo y tiene su expresión en la suma de velocidades y la invariancia de la aceleración. En expresión matemática esto es:

$$x = x' + v_R t$$

$$v = v' + v_R$$

$$a = a'$$

$$t = t'$$

Como puede notarse en las transformaciones aparece otra invariancia, el tiempo. El tiempo será el mismo independientemente del observador y su marco de referencia. Esta invariancia es lo que hace a las transformaciones de Galileo otro primitivo y por consiguiente candidato a ser un concepto constrictor.

Hasta el momento, sólo se han analizado aspectos relacionados al movimiento, pero para una dinámica de partículas, falta establecer las condiciones y factores que modifican el estado dinámico de una partícula. Este fue el trabajo de Newton, quien estableció las concepciones teóricas que permitieron dar interpretación a las interacciones y construir un formalismo deductivo con base en concepciones teóricas y relaciones funcionales ligadas a un desarrollo matemático diferencial. Entre las concepciones establecidas en las leyes del movimiento de Newton, podemos caracterizar como primitivos en forma equivalente a los de invarianza de masa y tiempo: a) El enunciado de la primera ley en el que se reconoce que una fuerza será toda aquella interacción que modifica el estado de movimiento o de reposo de una partícula y b) la modificación mutua establecida en la tercera ley, en la que se asegura que no hay interacciones privilegiadas.

En la formulación de Newton, además de las condicionantes para el reconocimiento de una fuerza, es necesario el establecimiento de la relación que determina cuantitativamente la relación entre la fuerza aplicada y el cambio en el movimiento de la partícula, esto es la segunda ley de Newton

$$F = dP/dt$$

donde P es el vector cantidad de movimiento mv de la partícula.

La segunda ley de Newton no establece un primitivo, puesto que no puede considerarse como un resultado intuitivo o deducible de otros primitivos, por el contrario, es el establecimiento de una relación causal en donde evidentemente, ambos lados de la

igualdad son de naturaleza distinta. Esta relación no cumple, en principio, con la idea propuesta para los conceptos constrictores, puesto que la función de la segunda ley es determinar las condiciones de operación entre la fuerza y sus efectos. Más adelante clasificaremos este tipo de relaciones como otro conjunto constituyente de los modelos propuestos.

Hasta el momento, se tienen cuatro elementos que cumplen con las condiciones para considerarse primitivos en la conformación de los equivalentes a los elementos teóricos. Estos son:

- a) La asignación a una partícula de una masa invariante e intransferible
- b) La determinación de la equivalencia en la descripción del movimiento en marcos de referencia distintos que cumplen con las transformaciones de Galileo
- c) La concepción de fuerza como la interacción responsable del cambio de movimiento de una partícula (primera ley)
- d) La fuerza como interacción que no establece acción privilegiada sobre las partículas que interaccionan (tercera ley)

Es claro que estos elementos no se presentan en la enseñanza como se han descrito aquí, sin embargo, están presentes en todos los textos de diversas formas y aplicaciones. Algunos de estos elementos son particularmente complejos, en especial c) y d). El punto c) no es claramente comprendido y es reconocido por los estudiantes como constrictor y d) aunque parece tener una aceptación por parecer un enunciado evidente, es mal entendido y usualmente su aplicación es errónea como muestra de manera abundante la literatura²⁵.

En términos generales, estos cuatro elementos parecen suficientes como los equivalentes a los elementos teóricos, puesto que todas las aplicaciones derivadas de la segunda ley de Newton y de la suma de las fuerzas sobre una partícula como la fuerza neta (principio de superposición), no requieren de suposiciones adicionales, más que aquellas relativas a aspectos particulares o relacionales. Por ejemplo, cuando se considera que para ángulos pequeños las funciones trigonométricas son equivalentes al ángulo mismo esto es, $\sin \theta \approx \theta$ o bien, la eliminación de elementos de segundo orden cuando se desprecian los términos cuadráticos en una serie o en su caso, despreciar valores de un término cuando éstos sean extremadamente pequeños comparados con otro.

Veamos como ejemplo la caída de los cuerpos (no se considerará el rozamiento del aire). El primer aspecto a considerar es que; un objeto se caracteriza por una partícula con masa m , por lo que estará sujeta a la fuerza de atracción gravitacional, así, sobre la partícula se tiene una fuerza dada por la relación

$$F = Gm_{Terra} m / r^2$$

Esta relación es fenomenológica, no derivada de las leyes del movimiento, sino de otras consideraciones, en particular las leyes de Kepler - si bien hay que anotar que su

²⁵ Pfund H. y Duit R. (1994) Bibliography "Students' Alternative Frameworks and Science Education" Institute for Science Education at the University of Kiel. (versión en diskette o red)

deducción se basa en la relación entre la fuerza centrípeta y el movimiento elíptico de los planetas -. Además de haber considerado el elemento a), esta ley de gravitación toma en cuenta que así como la Tierra atrae a una partícula de masa m , ésta atrae a la Tierra, y que los cambios en el estado de movimiento de ambas partículas, son relativos a sus masas, por lo que se hace la suposición de que no se percibe aceleración en la partícula Tierra, esto es, se consideran los elementos c) y d). Otro aspecto implícito es que un observador sobre la Tierra, podrá dar cuenta de los cambios de movimiento de la partícula de masa menor, considerando a la Tierra como un marco de referencia inercial, por lo que se quedan subyacentes los elementos b) y c).

Queda ahora por encontrar una forma operatoria. Esto está dado por la segunda ley de Newton, en la cuál, toda fuerza producirá una aceleración en el objeto, por lo que:

$$F = ma$$

como se tiene invarianza de la masa ante fuerzas de cualquier naturaleza (elemento a)), entonces se garantiza la igualdad de las expresiones

$$ma = Gm_{Tierra}m/r^2$$

Aquí entra una de las primeras consideraciones especiales o funcionales. Se considerará que cualquier objeto cercano a la superficie de la Tierra está a una distancia tan pequeña comparada con el radio ésta, que esta distancia será despreciable, esto es

$$r = R_{Tierra} + h$$

por lo que r^2 será

$$\begin{aligned} 1/r^2 &= 1/(R_{Tierra} + h)^2 \\ &= 1/R_{Tierra}^2 [1 + h/R_{Tierra}]^2 \\ &= (1/R_{Tierra}^2) [1 - 2h/R_{Tierra} + 3(h/R_{Tierra})^2 - \dots] \end{aligned}$$

como h es pequeña, lo será el cociente entre h y el radio de la Tierra, donde h es la altura del objeto a la superficie de la Tierra. Como el cociente $-2h/R_{Tierra}$ y los términos subsiguientes de orden superior son cada vez más pequeños comparados con el primer término, se desprecian por no influir en el valor del radio de la Tierra. Por lo que la expresión final queda:

$$1/r^2 = 1/R_{Tierra}^2$$

En este punto vemos como se introduce una eliminación de los efectos de orden superior.

Entonces se tiene que:

$$ma = Gm_{Tierra}m/R_{Tierra}^2$$

como m es invariante, no tiene ninguna función, por lo que se puede obtener como aceleración de caída

$$a = Gm_{Tierra}/R_{Tierra}^2 = cte$$

A este valor de la aceleración, se le conoce como aceleración de la gravedad g , es decir $a = g$. Esta ecuación constituye una predicción fenomenológica, esto es, que todo cuerpo caerá con la misma aceleración, sin importar su masa. Este enunciado es un término no teórico por lo que pertenece al conjunto de observaciones que pueden efectuarse de forma directa, esto lo caracteriza como un elemento del conjunto de aplicaciones I A(K). Como la relación obtenida es constante, cualquier objeto caerá con aceleración constante, independientemente de su masa. Este resultado es uno de los problemas de comprensión que presentan los estudiantes con mucha frecuencia, debido a que ellos le atribuyen a la masa de los objetos un papel importante en la caída. De hecho, es uno de los preconceptos más conocidos y también, uno de los más complejos de transformar en los estudiantes. Así, a pesar de los cursos sobre mecánica, la mayoría continúa afirmando que los objetos con mayor masa caerán más rápido que los de menor masa

En el ejemplo precedente, podemos notar que es posible definir un conjunto básico o fundamental; el de los conceptos constrictores. Este conjunto de conceptos constrictores relacionado con las reglas o condiciones funcionales específicas, permite la predicción de eventos fenomenológicos. Esta es la esencia del formalismo de Sneed y Stegmüller: **contar con conjuntos que determinen los elementos teóricos que se agrupan en un núcleo y cierto dominio de las aplicaciones para formar un esquema de interpretación y representación de un ámbito fenomenológico.**

En la aplicación, el conjunto formado por los elementos relacionales o funcionales es el siguiente:

- e) La relación entre el movimiento de una partícula y la fuerza aplicada es $F = ma$
- f) La fuerza de interacción entre dos partículas con masas m_1 y m_2 está dada por la ecuación $F = Gm_1m_2/r^2$
- g) Las magnitudes pequeñas y los términos de orden superior que den como resultado un valor muy pequeño pueden despreciarse y tomar solo el valor mayor.

Finalmente, el conjunto de aplicaciones I está restringido al movimiento de caída de los objetos y queda definido por:

- h) Los objetos caen con la misma aceleración constante independientemente de su masa.

Con la estructura propuesta en términos de conceptos constrictores, se ha mostrado como se puede, en términos de conjuntos, presentar la parte de la mecánica clásica que tiene que ver con partículas con los elementos que son relevantes en la enseñanza.

Desde luego, la mecánica tiene otros aspectos, pero son congruentes y algunos derivables del conjunto de conceptos constrictores. Aún en formulaciones matemáticas más complejas los conjuntos definidos preservan sus posibilidades inferenciables y siguen siendo elementos básicos.

2.5.2 El caso de la estática de fluidos

En el caso de la mecánica clásica o newtoniana, se comenzó por determinar los elementos equivalentes a los términos teóricos con la consideración de que, las condiciones de ligadura o constrictoras, se incluyen dentro de los primitivos del núcleo a los que he denominado conceptos constrictores. En los fluidos se seguirá un procedimiento semejante. En este caso en lugar de una partícula, se considera a un elemento unitario de fluido que cumple con dos condiciones, una para líquidos y otra para gases. Para líquidos tenemos que este elemento unitario tiene una densidad específica invariable. Para gases, esta densidad, está relacionada con las variaciones de volumen. La presión será también un primitivo y es el elemento equivalente a la fuerza en la mecánica, por lo que las acciones que el fluido pueda ejercer ó que sobre él se ejerzan, serán debidas al cambio de presión en el elemento unitario de fluido. Además, en los líquidos cualquier cambio de presión será el mismo en todo el líquido en su conjunto, aspecto conocido como principio de Pascal. Así, el conjunto de elementos primitivos o conceptos constrictores será:

- a) Un elemento unitario de fluido es un volumen diferencial que tiene asociada de manera intransferible una densidad (m/V).
- b) En un líquido la densidad es constante y el fluido es incompresible.
- c) En un gas la densidad es variable, pero siempre mayor que cero.
- d) Toda modificación en las condiciones del elemento unitario de fluido es debido al cambio de la presión interna.
- e) En los líquidos, cualquier aumento de presión se transmite en todo el líquido con el mismo valor.

Como en el caso de la mecánica, en los textos y en las clases (en general), no se presentan estos conceptos constrictores como aquí. Son conceptos que se van introduciendo en el tratamiento de los temas a lo largo de una secuencia descriptiva y, desde luego, como propiedades de los fluidos y no como conceptos que los definen, como lo exigiría la descripción formal de las teorías, esto es, la presentación de una teoría en su sentido axiomático. Con este conjunto de primitivos, y ciertas relaciones funcionales, es posible llevar a cabo algunas aplicaciones. Tomemos como ejemplo el caso del ludión.

El ludión es un dispositivo que consiste de un recipiente parcialmente lleno de un líquido con una cámara de aire. Este dispositivo se introduce en un líquido justo en la condición de flotación, esto es, en una condición de equilibrio. Cualquier modificación de la presión interna del líquido, hará que el aire de la cámara del ludión se comprima modificando las condiciones de equilibrio y él dispositivo se hundirá. Ahora bien, en

términos físicos y considerando a los conceptos constrictores, esto se explica de la siguiente manera: todo el proceso puede describirse por medio de los cambios en los elementos diferenciales de volumen de los fluidos en contacto (a), en el ludió hay dos fluidos, un líquido y un gas, el líquido es incompresible y el gas será comprensible debido al aumento de la presión (b) y (c), el equilibrio (condición de flotación) se da porque se cumple con la relación de que la suma de presiones sobre el área del objeto es igual a su peso. Ahora bien, en este punto pueden adoptarse dos relaciones funcionales, una que queda descrita como:

$$A p_i = W$$

donde el peso W del objeto es (haciendo la abstracción de tomar en cuenta sólo los fluidos)

$$W = (\rho_{\text{líquido, gas}})gV$$

Por su parte, la variación de la presión en un líquido que está determinada por la profundidad. Este es un enunciado funcional que queda descrito por la ecuación:

$$p_2 = p_1 + \rho_{\text{líquido}}g h$$

donde h es la profundidad

Esta última relación, determina la presión en función de la profundidad y es una de las ecuaciones básicas de la hidrostática.

En todas direcciones la presión interna del líquido, la suma de las presiones al mismo nivel se cancelan, pero la suma de presiones en el sentido vertical, donde se aplica la ecuación en función de la profundidad, y establece que:

$$p_i = p_2 - p_1 = \rho_{\text{líquido}}g h$$

Tomando la condición de igualdad con el peso en estado de equilibrio (flotación) se tiene:

$$A p_i = \rho_{\text{líquido}}g hA = W$$

donde A es el área donde la presión actúa, por lo tanto

$$\rho_{\text{líquido}}g hA = (\rho_{\text{líquido, gas}})gV$$

Esta relación establece la otra posibilidad anunciada, esto es, que en la flotación (condición de equilibrio), el peso del líquido desplazado será igual al peso del objeto, enunciado conocido como el "Principio de Arquímedes".

Ahora bien, cuando aumenta la presión en el líquido por medio de una fuerza externa (d), entonces, el aumento de presión p ocurre en todo el líquido (e), incluyendo aquel que

está dentro del ludió. El resultado es que al aumentar la presión externa, el gas se comprime. Lo anterior implica que la densidad del ludió cambia al aumentar el nivel del líquido en forma correspondiente a la disminución del volumen de aire ($p = cte$). Como la densidad aumenta (c), la condición de equilibrio se rompe, por lo que el objeto se irá al fondo.

Como en el caso de la mecánica, aquí también se requirió de relaciones específicas que se pueden resumir como:

- f) Cuando la suma de presiones sobre el área de un objeto es igual al peso del mismo el objeto flota.
- g) La presión es función de la profundidad según la relación $p_2 = p_1 + \rho_{\text{líquido}} g h$.
- h) En un gas la relación $p = cte$ (ley de Boyle).

Los elementos fenomenológicos quedarán entonces referidos a la descripción del descenso o ascenso del ludió. Esto se puede expresar como:

- i) Al aumentar la presión en el líquido el ludió desciende.
- j) Al disminuir la presión en el líquido el ludió asciende.

Como puede apreciarse, existe una correspondencia estructural entre los ejemplos para la mecánica newtoniana y la estática de fluidos. Esto indica la posibilidad de caracterizar por medio de los conjuntos utilizados, estas dos ramas de la Física, haciendo la equivalencia entre los términos teóricos con los conceptos constrictores y las reglas funcionales, con lo que se define una estructura para el núcleo teórico, equivalente a la establecida en los modelos de Sneed y Stegmüller.

2.6 Equivalencia elementos no teóricos - Reglas de correspondencia

Queda ahora por definir el papel de las relaciones funcionales que aparecen como elementos necesarios para la obtención de inferencias sobre la fenomenología y la formalización de los conjuntos en los términos equivalentes al formalismo de los modelos de la teoría de conjuntos. Veamos primero qué asignación es posible dar a las relaciones funcionales.

Para la descripción y explicación de los fenómenos es necesario contar con ciertas funciones y/o relaciones que expresen con precisión las variaciones que un aspecto fenomenológico (variable) sufre cuando otro al cual está relacionado también varía. Usualmente esta expresión está dada por las funciones que definen situaciones operacionales que expresan la dependencia de una variable de otras. Además de las funciones es necesario determinar ciertas condiciones específicas. Estas pueden ser lo que en Física se conoce como condiciones iniciales. También pueden ser ciertas consideraciones como, no tomar en cuenta las magnitudes pequeñas porque sus efectos se consideran despreciables por razones teóricas o prácticas o despreciar para simplificar algunas variables.

Las relaciones y funciones y las consideraciones específicas, son elementos que deben aparecer en el núcleo de un elemento teórico, puesto que de no ser así, los conceptos básicos o constrictores no tendrían ninguna posibilidad de ser aplicados a su ámbito fenomenológico.

Denominaré "Reglas de Correspondencia" a estas relaciones y funciones y sus condiciones específicas. Este nombre intenta dar cuenta de que se trata de relaciones y condiciones que son establecidas no sólo para una situación fenomenológica específica, sino también que son correlativos a los conceptos constrictores y que, en conjunto, constituyen los elementos básicos sobre los cuales se pueden construir explicaciones y predicciones sobre un campo fenomenológico, como es el caso de la mecánica clásica de partículas, de la estática de fluidos y en general de cualquier otro campo de la Física.

En el ejemplo precedente sobre la mecánica clásica o newtoniana de partículas que se realizó para representar la Física que se enseña en la escuela, las reglas de correspondencia para la aplicada a la caída de los cuerpos son los incisos:

- e) La relación entre el movimiento de una partícula y la fuerza aplicada es $F = ma$
- f) La fuerza de interacción entre dos partículas con masas m_1 y m_2 está dada por la ecuación $F = Gm_1m_2/r^2$
- g) Las magnitudes pequeñas y los términos de orden superior que den como resultado un valor muy pequeño pueden despreciarse y tomar sólo el valor mayor.

Como puede apreciarse, los dos primeros incisos, presentan funciones matemáticas que expresan la relación entre variables y parámetros. Estas funciones, dan cuenta de las operaciones que determinan magnitudes físicas con las que se pueden explicar o predecir situaciones fenomenológicas específicas, como la caída de un objeto cerca de la superficie terrestre. Por su parte el inciso g) presenta una condición específica que puede aplicarse cuando las condiciones estipuladas se cumplen. Estas condiciones introducen una imposición a las relaciones matemáticas, que contribuyen a simplificar las explicaciones y las posibles dificultades que se presentan en las operaciones matemáticas y que se consideran innecesarias porque no tienen implicaciones importantes en lo que se observa de los fenómenos físicos.

De la misma forma, para el caso de la estática de fluidos se tienen las siguientes reglas de correspondencia son:

- f) los objetos flotan cuando el peso de los mismos es igual a la suma de presiones en el área del objeto
- g) La presión es función de la profundidad según la relación $p_2 = p_1 + gh$
- h) En un gas la relación $p = cte$

Como puede apreciarse, en este caso, también se determinan relaciones y restricciones con las que se efectuará la contrastación cuantitativa de predicciones y explicaciones con la fenomenología observable.

Con los conceptos constrictores (que serán designadas como CC) y las reglas de correspondencia (RC), se tienen dos conjuntos que son equivalentes a los modelos formados por términos teóricos y fenomenológicos que constituyen el núcleo de un elemento teórico.

La equivalencia entre los elementos formales del núcleo y los correspondientes conceptos constrictores y reglas de correspondencia, queda establecida en función, de que ambas construcciones dan cuenta de la misma fenomenología, como se ha mostrado en la mecánica clásica de partículas y en la estática de fluidos. En términos de conjuntos podemos decir que:

$$K = \langle M_{pp}, M_p, M, C \rangle = \langle CC, RC \rangle$$

Aunque en principio es posible establecer cierta pertenencia de los elementos de los primeros conjuntos a los segundos, esto es, de los términos teóricos a los conceptos constrictores y de relaciones funcionales a las reglas de correspondencia, sin embargo, no es posible hacerlo de conjunto a conjunto puesto que los conjuntos CC y RC tienen elementos pertenecientes a todos los conjuntos del formalismo de Sneed.

El conjunto de aplicaciones I, continúa estando formado por todas las aseveraciones posibles sobre procesos fenomenológicos, esto es, hechos empíricos inferidos de las aplicaciones sobre el núcleo. Como el conjunto I no puede ser reducido a los conjuntos CC y RC, es conveniente mantenerlo como un conjunto independiente:

$$I \ A(K)$$

y el elemento teórico será entonces:

$$T = \langle K, I \rangle$$

Con el desarrollo presentado para la física escolar a partir de los conjuntos Conceptos Constrictores y Reglas de Correspondencia, se cuenta con un formalismo cuya interpretación es equivalente a la determinada por los conjuntos modelos potenciales. De esta forma, es posible seguir utilizando el término de **modelo posible** para la estructura propuesta aplicada a la física escolar. Sin embargo, para su aplicación a las ideas de los estudiantes, será conveniente como se discutirá en el siguiente capítulo, definir otro conjunto modelo que se designará como **modelo parcial posible**.

Una vez que se ha mostrado que el camino de definir conjuntos CC y RC que contienen los elementos abstractos y constrictores, así como las funciones y reglas específicas es factible y equivalente al formal y que presenta la posibilidad de ser relacionado de manera directa con las formas de enseñanza - y por consiguiente con la interpretación y representación de los estudiantes -, queda la tarea de precisar los atributos que deben cumplir los enunciados (elementos) para de forma unívoca, pertenecer a los conjuntos CC y RC.

2.7 Conceptos constrictores y reglas de correspondencia: condiciones y criterios que los definen

Una de las principales dificultades en la construcción de conjuntos que sirvan para representar aspectos conceptuales y de construcción conceptual de los sujetos, es establecer los criterios que permitan determinar los elementos de esos conjuntos para que no presenten confusiones o ambigüedades. La dificultad radica en que los conceptos que provienen de las experiencias fenomenológicas comunes no cumplen de manera clara con ningún criterio de demarcación; son por lo general, aplicados en muy diversas situaciones, con significados que cambian en función del contexto.

Esta dificultad ha contribuido a que en las investigaciones sobre las nociones físicas de los estudiantes éstas hayan recibido diversos nombres y significados no reductibles, y que han orientado el desarrollo de diversas interpretaciones sobre lo que las ideas previas implican para la enseñanza y el aprendizaje de la ciencia. Tal es el caso de los esquemas alternativos, preconceptos, teorías de los niños, teorías implícitas, etc. (ver anexo)

El reconocimiento de esta situación, ha llevado a diversos investigadores en este campo como J. Ogborn²⁶ y A. diSessa²⁷ entre otros, a intentar clasificar las ideas previas. Este intento está claramente expuesto en el trabajo de diSessa²⁸, quien propone la construcción de primitivos fenomenológicos (p-primos) como los elementos de la estructura cognoscitiva de los sujetos. Estos elementos son construidos por los sujetos y son utilizados para generar explicaciones sobre ciertos aspectos fenomenológicos (en principio cotidianos). diSessa, plantea lo que denomina principios heurísticos para determinar qué idea de los estudiantes debe ser considerada como primitivo. Algunos de los principios que plantea diSessa serán coincidentes con los que aquí serán propuestos.

Estos principios coincidentes son: principio de cobertura, principio de génesis no problemática y principio de funcionalidad.²⁹

Los elementos que se elijan para formar parte de los conjuntos conceptos constrictores y reglas de correspondencia deben ser mutuamente excluyentes y tener atributos que permita ubicarlos sin confusiones (al menos en su mayoría).

2.7.1 Criterios y condiciones para el conjunto *Conceptos Constrictores*

Definiremos como elemento del conjunto *Conceptos Constrictores* (CC), a aquellas oraciones con significado que cumplan las siguientes condiciones y criterios:

²⁶ Ogborn J. (1985) Op. cit.

²⁷ DiSessa A. (1983) Op. cit.

²⁸ DiSessa propone que toda construcción parte de primitivos fenomenológicos y que éstos para ser ubicados como tales en la estructura conceptual y evolutiva de los sujetos, deben cumplir con ciertos criterios que los determinan como elementos sobre los que se pueden elaborar explicaciones y predicciones. DiSessa A. (1993) Op. cit.

²⁹ DiSessa (1993) Op. cit, pp

Condiciones formales

Un elemento cc es perteneciente al conjunto CC , si existe cc_1, \dots, cc_n tales que

cc_i, i

Si $cc_i \in CC$, $cc_i \in CC$

$\{cc_1, \dots, cc_m\} \in \text{Pot}(CC)$

$t: CC \rightarrow I$ Esto es, todo $cc_i \in CC$ es interpretable bajo t en I

es el conjunto de los números naturales y Pot significa el conjunto potencia.

Criterios

Plausibilidad de significado. Todo concepto o idea deberá tener sentido físico, esto es, debe poderse atribuir significado empírico aunque no sea necesariamente correcto. En general esta condición se cumple cuando los sujetos elaboran una idea para dar cuenta de un fenómeno o proceso físico. Esta idea tiene la pretensión de articular la experiencia con una causa atribuible a un concepto no necesariamente fenomenológico. Por ejemplo, la idea de que el vacío jala o que los objetos adquieren una fuerza interna, etc., son nociones que cumplen con esa característica de plausibilidad.

Construcción abstracta. Para que los primitivos pertenezcan al conjunto de Conceptos Constrictores, deben ser concepciones abstractas, esto es, contener en la oración que los define términos abstractos. Por ejemplo, las ideas de fuerza interna, vacío, energía, etc., son conceptos abstractos (utilizados en forma correcta o no) en el sentido de que no describen un aspecto observacional como el movimiento, el color, la temperatura, etc. Debe notarse que el término abstracto no implica que no esté relacionado de alguna forma con la fenomenología, de hecho el criterio anterior, indica esta relación. (Este criterio es semejante al principio de génesis no problemática de diSessa).

Afirmaciones de carácter general. Los elementos de los conceptos constrictores deben de expresar una concepción de aplicación universal, es decir, deberán ser aplicables a toda situación física en la que, la fenomenología a la que dan cuenta ocurra. Este criterio es importante porque permite incluir a las condiciones de ligadura como se hizo notar en los ejemplos de mecánica y fluidos. Además, esta característica de generalidad indica que la construcción abstracta está más allá de las condiciones específicas fenomenológicas y por consiguiente, que es aplicable a situaciones relacionadas permitiendo así la articulación entre conceptos para formar explicaciones complejas.

Complementariedad. Los conceptos constrictores pueden articularse con otros, incluidos sus negaciones, para construir enunciados complejos que tengan una función explicativa o predictiva. Esto queda expresado en términos formales al asegurar que un subconjunto del conjunto Conceptos Constrictores pertenece al conjunto potencia de CC. Aquí debe recordarse que la negación de un elemento con sentido físico también puede ser utilizado como un elemento del conjunto CC.

No traslapamiento. Significa que diversos elementos no pueden tener el mismo significado. Este es un criterio difícil de cumplir, sin embargo es conveniente tomarlo en cuenta en todo momento, porque la precisión del elemento teórico o modelo, en el caso, de los estudiantes, depende de que los conceptos constrictores funcionen de manera equivalente a los elementos teóricos o bien, a los conceptos constrictores establecidos a partir de la Física escolar. Un ejemplo de la dificultad que puede tener este criterio lo es la diversidad de interpretaciones que tiene el concepto de energía en los estudiantes.

Suficiencia de dominio específico. El conjunto CC debe constituir un conjunto suficiente para dar cuenta de un ámbito fenomenológico específico. Así, para el caso de la mecánica de partículas el conjunto CC debe cubrir los aspectos fundamentales y poder hacer las especializaciones necesarias para cubrir el dominio fenomenológico correspondiente. Como con el criterio anterior, este puede cumplirse para la física, pero no necesariamente para las construcciones que puedan hacerse con las ideas de los estudiantes (este criterio es equivalente al principio de cobertura propuesto por diSessa).

Causalidad. En general, los conceptos constrictores deberán ser establecidos de manera que puedan ser los elementos referentes en cuanto a explicaciones causales. Desde luego, que para el caso de los estudiantes se estará comprendiendo una causalidad directa o "intuitiva". Este es un criterio que complementa la función de los conceptos constrictores de constituir una guía para la realización de inferencias (este criterio es equivalente al principio de funcionalidad de diSessa).

Invariancia. Aún cuando un concepto constrictor no cumpla en su totalidad con el criterio de no traslapamiento, debe cumplir con el de invariancia, esto es, que ante las situaciones fenomenológicas específicas, es decir, su función como elemento explicativo o predictivo es la misma y no cambia en su significado. Este y otros criterios propuestos como se verá más adelante, evitan que cualquier idea previa o preconcepción se constituya en un primitivo estableciendo así, jerarquías y clases entre las ideas previas.

Para ver la operacionalidad de las condiciones y criterios propuestos, podemos utilizar como ejemplo, alguno de los conceptos constrictores que se establecieron para el caso de la mecánica de partículas o de la estática de fluidos. Por ejemplo, si tomamos de la

mecánica el elemento b) *La concepción de fuerza como la interacción responsable del cambio de movimiento de una partícula*, podemos ver que cumple con las condiciones formales porque es un elemento con significado, su negación tiene el sentido de que *una fuerza no es la responsable del cambio de movimiento de una partícula*, que es un elemento del conjunto potencia de CC y que se puede hacer una inferencia hacia una situación específica, como delimitar si un movimiento es debido a una fuerza o no. En cuanto a los criterios la oración tiene significado físico (plausibilidad de significado), no es una idea observable y es abstracta (construcción abstracta), es una afirmación para toda partícula (afirmación de carácter general), puede articularse con otros conceptos generales como el de interacción y específicos como el peso (complementariedad), debido a que es una afirmación para toda partícula, no es identificable su traslapamiento con otro concepto - lo que probablemente no ocurra con las ideas de los estudiantes, baste citar las confusiones con energía o ímpetu y el concepto de fuerza - (No traslapamiento), establece con claridad una relación causa-efecto (causalidad), no depende de otros factores y no están definidas variaciones por condiciones específicas (invariancia). Como puede notarse, con excepción del criterio de suficiencia de dominio específico, que se aplica a todo el conjunto, todos los criterios pueden ser identificados claramente.

2.7.2 Criterios y condiciones para el conjunto Reglas de Correspondencia

Por su parte, los elementos que cumplen con el papel de reglas de correspondencia y que pertenecen al conjunto RC, tienen otra función en el núcleo del elemento teórico (o modelo) y en consecuencia, tienen también otros criterios y condiciones para ser determinados.

En cuanto a las condiciones formales no hay variaciones con respecto de las establecidas para los conceptos constrictores. Estas son:

Condiciones formales

Un elemento cc es perteneciente al conjunto RC, si existe rc_1, \dots, rc_n tales que

rc_i, i

Si $rc_i \in RC, rc_i \in RC$

$\{rc_1, \dots, rc_m\} \in \text{Pot}(RC)$

s: $RC \in I$ Esto es todo $rc_i \in RC$ es interpretable bajo s en I

es el conjunto de los números naturales y Pot significa el conjunto potencia.

A continuación se presentan los criterios que deben cumplir los enunciados para pertenecer al conjunto de las reglas de correspondencia.

Criterios

Relaciones con significado. Este criterio indica que las relaciones posibles que sean establecidas con conceptos y descriptores fenomenológicos deben tener un significado físico inmediato o evidente. Por ejemplo, cuando se dice que la presión aumenta con la profundidad, que en un gas encerrado la presión es constante o bien que el periodo de un péndulo aumenta conforme aumenta la longitud del hilo, se están estableciendo relaciones que no presentan ambigüedad en la identificación de la variables y el tipo de relación.

Relación unívoca. En una descripción física, independientemente del nivel y pertinencia de la misma, es necesario que en cualquier tipo de relación entre variables específicas, la relación quede determinada de forma unívoca, es decir, que no dependa de condiciones externas azarosas. Por consiguiente, este criterio tiene la finalidad de que la relación sea permanente cuando el contexto físico es semejante. También establece que si bien es posible tener dos o más variables relacionadas, un efecto específico deberá de poder asociarse a la variación de cada una de ellas. Este criterio evidentemente implica una simplificación en las explicaciones físicas (debe considerarse que aún cuando se tengan relaciones complejas de varias variables, los tratamientos matemáticos diferenciales, establecen un proceso por el que las variaciones se describen como funciones lineales independientes de variaciones de la función sobre una de las variables, considerando constantes las demás para cada uno de los términos).

Suficiencia. Un aspecto que atañe al conjunto de reglas de correspondencia RC es que el total de los elementos rc, deben constituir un conjunto de relaciones que abarquen lo más posible, el campo fenomenológico al cual están describiendo, de manera independiente a su pertinencia o funcionalidad. Este criterio es necesario porque de no constituir un campo completo, no podrán establecerse vínculos suficientes con la fenomenología específica y por consiguiente, no se podrán establecer esquemas inferenciales.

No traslapamiento. Como en el caso de los elementos cc, los elementos rc deben estar claramente diferenciados, de manera que para una misma relación entre variables no se puedan establecer dos o más significados o posibilidades de interpretación. Esta condición difícil de cumplir para los conceptos constrictores, lo es menos para las reglas de correspondencia, porque en su construcción están implícitas relaciones unívocas o bien situaciones contextuales específicas. Por ejemplo, cuando se establece una relación de variación con la temperatura para el volumen de un gas, etc.

Invariancia. Las reglas de correspondencia deben cumplir, además del criterio de no traslapamiento, con el de invariancia, que implica que ante situaciones

fenomenológicas específicas, la función de la regla de correspondencia, no cambia en la asignación de significado de las predicciones que se efectúen con ella.

Composición de relaciones. Este criterio tiene como finalidad garantizar que las relaciones de tipo funcional dadas por las reglas de correspondencia, puedan estar a su vez, sujetas por otras reglas, es decir, que las relaciones puedan componerse en otras para construir relaciones de relaciones. (En el caso de que las relaciones estén expresadas en forma de función, este criterio asegura que puede hacerse la función de función o composición de funciones). La importancia de este criterio se ejemplifica cuando se utilizan las relaciones específicas como variables. En el caso de las funciones y relaciones matemáticas de procesos físicos, esto se utiliza de forma común con la sustitución y la composición de funciones.

Como se hizo para las condiciones y criterios de los conceptos constrictores, es útil ver como se aplican los correspondientes criterios y condiciones en el caso de las reglas de correspondencia. Para ejemplificar, se utilizará también una regla que apareció en los ejemplos de mecánica; el ejemplo es relación e) *La relación entre el movimiento de una partícula y la fuerza aplicada es $F=ma$* . Esta regla de correspondencia asigna una función claramente definida y su negación implicaría que *la fuerza no es equivalente al producto de la masa por la aceleración*, lo cual puede tener sentido físico. Es una regla de correspondencia que es elemento del subconjunto del conjunto potencia de RC y su aplicación está definida para cualquier partícula con masa, determinando la aceleración de la misma. En cuanto a los criterios, vemos que la ecuación tiene significado preciso, puesto que establece la equivalencia numérica y direccional entre el concepto fuerza y la masa y las condiciones de variación de movimiento de una partícula (relación con significado), como ecuación, está únivocamente determinada para una partícula (relación unívoca), cada elemento de la ecuación está claramente diferenciado y no hay posibilidad de asignar ni valores ni significados de manera ambigua (no traslapamiento), la ecuación no está sujeta a condiciones que impliquen variaciones en la asignación de valores y significados (invariancia), con esta ecuación puede haber sustitución de variables e incluso cambio de variables (composición de la relación). Como en el caso anterior, se aplican con claridad los criterios establecidos, con excepción de la condición de suficiencia que implica el conjunto completo de reglas de correspondencia.

Como podrá apreciarse en los ejemplos sobre la construcción de conceptos constrictores y reglas de correspondencia, para el caso de la Física que se enseña escolarmente (mecánica newtoniana y estática de fluidos), los conjuntos construidos cumplen con los criterios arriba mencionados para los conceptos constrictores y reglas de correspondencia.

2.8 Construcción de inferencias con los conceptos constrictores y las reglas de correspondencia

Una vez determinados los conjuntos del núcleo, es necesario conocer como se pueden hacer aplicaciones que den como resultado afirmaciones acerca de procesos físicos que pertenecen a su dominio, es decir a la fenomenología a la que corresponden.

El primer aspecto es definir cuál es el conjunto I de aplicaciones. En la teoría de conjuntos sobre la estructura de las teorías de Sneed, el conjunto que da cuenta de las aplicaciones es un subconjunto de M_{pp} porque este conjunto se construye con todas los términos fenomenológicos. Pero en la construcción propuesta en este trabajo, tanto CC como RC pueden contener en sus afirmaciones términos fenomenológicos, sin embargo, no necesariamente todos los son. Esto implica que es necesario definir el conjunto I como todas aquellas aseveraciones posibles que pueden inferirse de CC y RC y que tienen como único criterio que cumplir, que sean observables físicos.

Lo anterior no presupone construir un nuevo conjunto, sino incorporar todas las posibles inferencias válidas (no necesariamente correspondientes con lo que predice la teoría física) que pueden hacerse con CC y RC. En términos de la teoría de conjuntos, es posible definir entonces al conjunto I como:

$$I \ A(K)$$

$$A: \text{Dom} (CC,RC) \ I$$

Para estar definida, la aplicación A debe contar con ciertas reglas de operación que deben corresponder al formalismo al que pertenecen. Por ejemplo, la mecánica clásica de partículas y la estática de fluidos fueron descritas por los modelos teóricos y las aplicaciones. Están en función de las leyes especiales y el aparato matemático y lógico subyacente. Esto es también válido para la formulación con los conceptos constrictores y reglas de correspondencia que se aplicaron a la Física escolar, salvo que en ese caso, es conveniente generalizar el proceso para que pueda aplicarse a las ideas de los estudiantes. La concepción bajo la que se determinaron los conceptos constrictores es que sean los elementos guía de los posibles razonamientos e inferencias y, por su parte, las reglas de correspondencia como aquellas relaciones y condiciones de contexto. Esto hace posible establecer que toda operación sea lógica o matemática, deberá estar en función de esos dos conjuntos. Una manera de expresar esto es que queden descritos como una operación cartesiana cuyo resultado estará en el conjunto de las oraciones fenomenológicas, así:

$$A: CC \times RC \ I$$

Donde al producto cartesiano pueden incorporarse diversos operadores.

¿Qué operadores son los mínimos? Una primera respuesta está en una lógica inferencial simple. Esta es en principio, suficiente para llevar a cabo inferencias directas

simples. Así, será suficiente contar con la conjunción (\wedge), la negación (\neg) y la implicación (\Rightarrow).

Desde luego que en determinados momentos deberán utilizarse operaciones matemáticas para efectuar cálculos, pero estas operaciones no alteran ni adicionan razonamientos, a lo inferido sobre cierto comportamiento fenomenológico, elaborados a partir de los conceptos constrictores y las reglas de correspondencia.

Para ejemplificar cómo se pueden establecer inferencias a partir del modelo posible constituido por los conceptos constrictores y las reglas de correspondencia en una aplicación específica, es conveniente retomar un ejemplo previo y transponerlo en términos de esta propuesta. Tomemos el caso de la caída de los cuerpos, tenemos como conjunto CC:

$$CC := \{cc_1, cc_2, cc_3, cc_4\}$$

donde:

cc_1 = La asignación de una masa para una partícula es invariante e intransferible.

cc_2 = La determinación de la equivalencia en la descripción del movimiento en marcos de referencia distintos cumplen con las transformaciones de Galileo

cc_3 = La fuerza es la interacción responsable del cambio de movimiento de una partícula

cc_4 = La fuerza no establece acción privilegiada sobre las partículas que interaccionan

Por su parte el conjunto RC está formado por

$$RC := \{rc_1, rc_2, rc_3\}$$

donde:

rc_1 = La relación entre fuerza y movimiento queda determinada por $F=ma$

rc_2 = La fuerza de interacción entre dos partículas con masas m_1 y m_2 queda determinada por la ecuación $F=Gm_1m_2/r^2$

rc_3 = Las magnitudes pequeñas y los términos de orden superior que den como resultado un valor muy pequeño pueden desprejarse y tomar solo el valor mayor.

La línea de razonamiento será entonces:

$$(cc_1 \wedge cc_3 \wedge cc_4) \wedge (rc_1 \wedge rc_2) \Rightarrow ma = Gm_1m_2/r^2$$

$$\text{como } rc_3 \Rightarrow Gm_1m_2/(R+h)^2 \approx Gm_1m_2/R^2$$

finalmente

$$(cc_1) \times (rc_1 \quad rc_2) \quad a = Gm_1/R^2$$

entonces

CC X RC I

Este resultado es h) *Los objetos independientemente de su masa caen con la misma aceleración en la superficie terrestre* elemento que pertenece a I. Si designamos a este elemento como i_1 , entonces $i_1 \in I$.

Como queda demostrado por la equivalencia de razonamientos seguidos con este ejemplo y el precedente por llegar a los mismos resultados, el semiformalismo propuesto (CC, RC e inferencias bajo un producto cartesiano) constituye un modelo posible, con todos los atributos definidos por Sneed.

A manera de conclusión se puede hacer notar que la propuesta de establecer los Conceptos Constrictores y las Reglas de Correspondencia como el núcleo de un elemento teórico aplicado a la física escolar, presenta resultados que pueden trasladarse al ámbito de las ideas de los estudiantes. Este traslado se hará bajo la designación de modelos parciales posibles por razones que se explicarán en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO III

MODELOS PARCIALES POSIBLES: REPRESENTACIÓN DE LA CONCEPTUALIZACIÓN FÍSICA DE LOS ESTUDIANTES

En el capítulo precedente se desarrollaron los criterios y elementos formales para construir modelos posibles M_p que corresponden a la física escolar para, posteriormente, ser comparados con modelos que se construirán con las ideas de los estudiantes. Estos modelos posibles guardan una serie de características y restricciones que los hace particularmente útiles para poder hacer inferencias sobre fenómenos físicos a partir de conceptos generales que se han denominado conceptos constrictores (CC) y reglas de correspondencia (RC). Sin embargo, como veremos adelante, la construcción del conjunto de conceptos constrictores y el conjunto de reglas de correspondencia con las ideas de los estudiantes, requerirá de establecer elementos que puedan hacerse corresponder con la estructura de la teoría física formal y de la física escolar.

Por física formal, se entenderá la exposición de las teorías físicas en cuanto a principios y leyes fundamentales y su articulación por medio de su formalismo matemático. Esto implica que, se requerirá de un mínimo de expresiones generales y de condiciones que deben cumplir, sin necesidad de tener un referente fenomenológico, esto es, sin tener que expresar en todo momento sus relaciones con fenómenos particulares. Por su parte, por física escolar se comprenderá la exposición de los conceptos físicos vinculados siempre a los referentes fenomenológicos específicos como ocurre en los textos, donde para explicar un concepto y sus relaciones matemáticas, es necesario partir de las experiencias comunes para darles significado y, de la misma forma, las relaciones matemáticas requieren de una correspondencia experimental (real o supuesta) que la exposición formal no requiere.

En el presente capítulo, se expondrán las características que deben cumplir las ideas de los estudiantes para determinar, con ellas, los conceptos constrictores y las reglas de correspondencia que permitan la construcción de modelos en los términos establecidos en el capítulo precedente. Posteriormente se analizarán las ideas previas de los estudiantes en los dos campos de la Física que hemos venido trabajando, a saber la mecánica de partículas y la estática de fluidos. De este análisis se obtendrán los modelos correspondientes que denominaremos "**modelos parciales posibles**". Finalmente se aplicarán los modelos a ciertas situaciones fenomenológicas probando así su capacidad para describir las ideas e inferencias de los estudiantes. En el capítulo IV, se hará una comparación entre los modelos de la física escolar y los de los estudiantes para orientar procesos de transformación conceptual.

3.1 Modelos Parciales Posibles: Estructura

Los modelos construidos a partir de los elementos formales de la mecánica de partículas y de la física escolar que denominamos modelos posibles (M_p) tienen definidos con precisión los conceptos que conforman los términos teóricos y no teóricos para el caso

formal de la mecánica y los conceptos constrictores y reglas de correspondencia para la física escolar. Sin embargo, con las ideas previas de los estudiantes no se puede tener la misma precisión. Las ideas previas de los estudiantes, en general, no presentan una clara significación ni la articulación genérica necesaria para la construcción de modelos formalizados. Son ideas que se establecen para ciertas condiciones específicas y no aplicables en todos los casos. Esta situación queda de manifiesto en la abundante literatura que sobre las ideas previas se ha elaborado, baste mencionar el trabajo de recapitulación de Duit y Pfund¹. Ante este problema surge la pregunta ¿qué tipo de modelos pueden construirse con las ideas previas de los estudiantes? La respuesta está en no esperar modelos con las características formales a los construidos en el capítulo precedente, sino en pensar en modelos que representen sólo aspectos fenomenológicos restringidos, esto es parciales. Estos modelos parciales como ha sido apuntado por Flores y Gallegos², se les puede denominar como **Modelos Parciales Posibles** - que denotaré como M_{pp} para diferenciarlos de los modelos posibles - que representan las construcciones de los estudiantes en cierto ámbito fenomenológico y que tienen la posibilidad de articularse con otros modelos parciales posibles sobre fenómenos relacionados.

Estos modelos parciales posibles, darán cuenta de las posibilidades de representación y de inferenciación que los estudiantes elaboran con sus ideas y, por tanto, permitirán describir en términos de la teoría de modelos de conjuntos, los resultados de las investigaciones sobre ideas previas.

Para la construcción de los modelos parciales posibles es necesario, en primer lugar, definir las características que deben cumplir las ideas de los estudiantes para constituir con ellas los conjuntos conceptos constrictores (CC) y reglas de correspondencia (RC).

Para ser elementos pertenecientes al conjunto CC, las ideas previas de los estudiantes deben cumplir con:

- A. Ser enunciados referidos a una situación física real o posible que pretenda ser elemento explicativo.
- B. Ser consideradas concepciones verdaderas para los estudiantes de manera que constituyan una especie de marco axiomático.
- C. Ser construcciones abstractas no descriptoras de alguna situación fenomenológica. Por ejemplo las suposiciones acerca de los atributos del vacío.³
- D. Las ideas previas que deriven de los aspectos fenomenológicos pero que cumplan con el papel de ser un marco axiomático en términos de las p-primas, propuestas por Di Sessa⁴, pueden también formar parte del conjunto CC.

¹ Pfund H y Duit R. (1994) Op. cit.

² Flores F. y Gallegos L (1993) Consideraciones sobre la estructura de las teorías científicas y la enseñanza de la ciencia. *Perfiles Educativos* 62, pp 24-30

³ Atributos como que "el vacío jala o empuja" que son explicaciones que los estudiantes elaboran sobre ciertos fenómenos observados, son reportados por K. de Berg (1992) Students' thinking in relation to pressure-volume changes of a fixed amount of air: The semiquantitative context. *International Journal of Science Education* 14 pp 295-303

⁴ di Sessa A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition en (Gentener & Stevens Eds). *Mental Models* Lawrence Erlbaum Associates NJ pp 15-34

- E. Una idea previa que se considera como un elemento cc será perteneciente a CC si existen cc_1, \dots, cc_n tales que
- $$cc_i, i$$
- si $cc_i \subset CC$ $cc_i \subset CC$
- $$cc_j, \dots, cc_m \text{ Pot } (CC)$$
- $t: CC \rightarrow I$. Esto es, todo cc_i es interpretable bajo t en I .
- F. Las ideas previas deben cumplir con los criterios de Plausibilidad de significado, Construcción abstracta, Afirmaciones de carácter general, Complementariedad, No traslapamiento, Suficiencia de dominio específico, Causalidad e Invariancia.

Para ser elementos pertenecientes al conjunto RC , se deben cumplir:

- G. Las ideas previas de los estudiantes deben ser enunciados referidos a una situación física real o posible que pretenda ser elemento descriptivo.
- H. Las ideas previas deben definir relaciones específicas entre variables o bien condiciones que deben cumplirse para cierta fenomenología. Por ejemplo, pueden ser expresiones de orden y extensión como el caso de proporcionalidad, relaciones mayor que y menor que o bien, condiciones que determinen cuándo un suceso ocurre y bajo qué condiciones físicas. Por ejemplo, que la *"dirección del movimiento será siempre en la dirección de la fuerza aplicada"*.⁵
- I. Una idea previa que se considera elemento rc será perteneciente a RC si existen rc_1, \dots, rc_n tales que
- $$rc_i, i$$
- si $rc_i \subset CC$ $rc_i \subset CC$
- $$rc_j, \dots, rc_m \text{ Pot } (RC)$$
- $s: RC \rightarrow I$. Esto es, todo rc_i es interpretable bajo s en I .
- J. Las ideas previas deben cumplir con los criterios de: Relación con significado, Relación unívoca, Suficiencia, No traslapamiento, Invariancia y Composición de relaciones.

Como ocurre con el caso de los M_{pp} el núcleo del modelo estará caracterizado por

$$K := \langle CC, RC \rangle$$

y el conjunto de aplicaciones posibles será un subconjunto de las aplicaciones sobre K

⁵ Esta condición ha sido encontrada en los estudiantes por L Viennot (1979) Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education* 1. pp. 205-222

I A(K)

esto es

A: Dom (CC, RC) I

Por último las reglas de operación para la construcción de inferencias serán, como en el caso de los modelos de la física escolar, determinadas por la aplicación A en función de un producto cartesiano, así:

A: CC X RC I

De acuerdo al nivel de elaboración y de explicación o descripción de sus inferencias, estas también pueden estar compuestas por productos cartesianos como

CC X CC I

RC X RC I

En un nivel más elemental será simplemente la consecuencia directa de un elemento de CC o RC, esto es

CC I

RC I

Las operaciones lógicas que pueden realizarse con los elementos de CC y RC se podrán describir con elementos simples como los operadores (conjunción), (negación) y (implicación directa). También podrán utilizarse operaciones matemáticas según hayan sido establecidas en los elementos de RC.

En el caso de la negación, esta puede ser en dos sentidos. Cuando es directamente sobre un elemento de CC o RC como por ejemplo cc_j que indica la negación formal del enunciado que define cc_j o bien en la forma (cc_j) que indica que las condiciones que definen ese elemento no se cumplen.

Por ejemplo, si cc_j es una idea de los estudiantes como “*los objetos más pesados caen más rápido*”, entonces cc_j es la negación “*los objetos más pesados no caen más rápido*” y (cc_j) es “*los objetos menos pesados caen más rápido*”.

Una vez definidas las características que deben cumplir tanto los elementos que serán pertenecientes a CC como a RC, se procederá a un análisis sobre las ideas previas en mecánica de partículas; fuerzas y movimiento y en estática de fluidos. Este análisis se llevará a cabo con la intención de identificar las ideas previas susceptibles de ser consideradas como elementos de CC y RC aplicando los criterios ya establecidos. En primer lugar se hará una revisión y discusión de las ideas previas más significativas reportadas en la bibliografía.

3.2 Ideas previas de los estudiantes en mecánica

El estudio de las ideas previas comienza cuando en 1979 L. Viennot⁶ publicó un estudio sobre las concepciones de los estudiantes universitarios sobre la dinámica elemental. Viennot mostró cómo, a pesar de haber cursado estudios básicos de Física, cuando ciertas circunstancias exigían una interpretación física y no sólo la aplicación de ecuaciones, los estudiantes tenían una representación física diferente a la que supuestamente habían logrado en sus cursos.

Si bien algunos temas de las ideas de mecánica en los estudiantes habían sido analizados previamente, principalmente por Piaget y colaboradores⁷, no se habían centrado en el desarrollo propio de los conceptos y sus diferencias o semejanzas con la física escolar. Piaget en especial, a pesar de haberse encontrado en numerosas ocasiones con las nociones de los estudiantes, las pasa por alto en busca de invariantes que le permitieran construir una estructura general que los englobe. En efecto, Piaget en sus investigaciones para determinar la génesis de las estructuras de pensamiento utiliza, en la mayoría de las veces, procesos físicos como el movimiento, la flotación, la noción de tiempo y desplazamiento, el equilibrio, la reflexión de la luz, la suma de fuerzas, entre otros. Pero a pesar de analizar estos conceptos y procesos físicos y tener en sus registros valiosa información sobre las concepciones de los sujetos, no toma en cuenta la génesis del concepto mismo sino cómo, los sujetos a través de la interacción con esa fenomenología, construyen esquemas generales asociados a procesos lógicos como reversibilidad, invariancia, composición, negación o reciprocidad para construir sus sistemas (y estadios) operacionales. Sin embargo, esto no fue suficiente puesto que esa misma estructura será en gran medida dependiente de las propias nociones como se ha ido mostrando en las investigaciones sobre cambio conceptual o evolución conceptual⁸.

En su trabajo pionero, Viennot analiza varias situaciones sobre la comprensión de las leyes de Newton y su aplicación en diversas situaciones físicas. Es interesante hacer notar que pone especial énfasis en la necesidad de construir esquemas de representaciones y explicaciones al menos en dos sentidos. Uno referido al origen de las ideas previas en los estudiantes y el otro, a la construcción de los propios conocimientos físicos. Estos aspectos aunque señalados de un principio, no se tomaron en cuenta de forma sistemática en la gran cantidad de estudios posteriores sobre las ideas previas hasta que se analizan los problemas de cambio conceptual. Entre las ideas sobre la dinámica encontradas por Viennot podemos destacar:

⁶ Op. cit.

⁷ Piaget y sus colaboradores llevaron a cabo muy extensas investigaciones sobre aspectos como el movimiento, las fuerzas y los vectores, la noción de ímpetu, etc. Algunos de sus publicaciones al respecto son: Inhelder y Piaget (1972) *De la lógica del niño a la lógica del adolescente*; Piaget, Bliss, Chollet-Levret, Dami, Mounoud, Robert, Rossel-Simonet y Vinh-Bang (1975) *La composición de las Fuerzas y el problema de los vectores*. Ediciones Morata Madrid. y, Piaget y García (1982) *Psicogénesis e historia de la ciencia*. Editorial Siglo XXI, México.

⁸ Nuevamente se encuentra en este tema una gran cantidad de estudios baste mencionar algunos de los ya citados M. Chi (1994), A. Tiberghien (1996), A. diSessa (1993).

Los estudiantes suelen atribuir a los objetos entidades físicas como la fuerza y no a sus interacciones.

Las fuerzas y el movimiento están siempre en la misma dirección.

Comprenden la acción y la reacción de la tercera ley de Newton como fuerzas concurrentes y el movimiento, por consiguiente, será en el sentido de la fuerza mayor.

Conciben las fuerzas de interacción como las aplicadas a una masa y que siguen la expresión $F = ma$.

Denomina Fuente de Fuerza, a la noción que expresan los estudiantes como aquella que se proporciona a un objeto y que éste adquiere, y es compatible con la expresión $F = v$.

Conciben la existencia de una fuerza centrífuga de manera independiente a los marcos de referencia y es la responsable de mantener el equilibrio para el movimiento circular.

La fuerza que denominan inercial es expresable como $F = -ma$.

Establece también la condición general $v = 0 \quad F = 0$ y si $v \neq 0 \quad F \neq 0$.

A partir de estas ideas previas algunos autores como McCloskey⁹ establecieron la categoría de "teorías intuitivas" a ese conjunto de ideas previas puesto que ofrecían cierto grado de estructuración. En especial McCloskey, apoyaba sus argumentos en una revisión histórica acerca de las ideas del "ímpetus" expresadas principalmente por Jean Buridan y Nicolás de Cusa hacia fines de la edad media y vigentes hasta la época de Galileo. En su análisis McCloskey encuentra como elementos principales de las ideas de los estudiantes las siguientes:

Los objetos adquieren ímpetus al ser empujados.

El ímpetus se disipa por fuerzas de fricción o con el paso del tiempo.

El ímpetus es la fuerza comunicada a los objetos.

La explicación del movimiento parabólico de los objetos está en función del ímpetus y es congruente con las aseveraciones que se utilizaron hasta Galileo.

En el vacío el ímpetu no se disipa.

Esta idea de que los estudiantes construyen teorías intuitivas, en el sentido de que son entidades coherentes y consistentes (al menos hasta cierto grado), ha sido actualmente puesta en duda por las investigaciones en otros campos de las ideas previas¹⁰. Desde luego que la identificación de las ideas de los estudiantes con las ideas antiguas sobre el ímpetus es adecuada, pero el calificativo de teoría es cuestionable, puesto que bien puede preguntarse ¿es la idea medieval de ímpetus una teoría? Si tomamos como referente que una teoría debe tener un rango lo más amplio posible de aplicación fenomenológica y que como se apuntó en el capítulo anterior, debe contener términos teóricos y fenomenológicos ligados por condiciones específicas (condiciones de ligadura), la idea del ímpetus no deja de verse

⁹ Michael McCloskey (1983) Naive theories of motion en (Gentner & Stevens Eds) *Mental Models* Lawrence Erlbaum Associates pp 299-324

¹⁰ Algunas de estas investigaciones se incluyen en este análisis como se verá más adelante.

restringida. Sin embargo, es posible considerarla como un elemento parcial o constituyente de una teoría más general, pero en la historia de la física esto no ocurrió, puesto que la teoría general desarrollada por Newton, no contempla la idea del ímpetus en la forma en la que se concebía al final de la edad media. Sin embargo, la concepción de las ideas previas como teorías intuitivas, se continúa manifestando bajo el esquema de ideas alternativas.

Otro trabajo representativo de esta concepción fue desarrollado por Clement¹¹ quien compara las ideas de los estudiantes con las que utilizó el propio Galileo mostrando cómo, éste último, no llega a una conclusión definitiva al respecto. Clement, analiza la concepción de los estudiantes de que el movimiento implica una fuerza y reafirma las ideas mostradas por Viennot¹² de que:

El movimiento es en la dirección de la fuerza aplicada.

El movimiento con velocidad constante implica una fuerza constante.

Otro ejemplo de investigación sobre el tema del ímpetus lo encontramos en el trabajo de Fischbein, Stavy & Na-Naim¹³ quienes llevan a cabo una comparación entre las diversas ideas del ímpetus en los estudiantes y las mostradas por diversos personajes en la historia de la física como Marchia y Buridan.

Otros campos de la mecánica como la cinemática también han sido analizados, las ideas sobre los conceptos de velocidad y aceleración fueron estudiados por McDermott¹⁴ quien llevó a cabo un trabajo con estudiantes universitarios en Estados Unidos. Además de mostrar los problemas en cinemática, hace una recapitulación sobre las ideas previas en otros aspectos de la mecánica. Entre los principales resultados que reporta se encuentran:

1. Fuerzas Pasivas. La mayoría de los estudiantes no comprende la acción de una fuerza para mantener una situación de equilibrio, por ejemplo que la fuerza normal es para mantener un objeto en reposo en contra de la fuerza gravitacional.
2. Fuerza Gravitacional. Reporta que para los estudiantes, la fuerza gravitacional es proporcional a la velocidad y que el peso de los objetos determina la velocidad de caída.
3. Velocidad y Aceleración. Encuentra que:

Los estudiantes presentan confusión entre velocidad y posición en un punto determinado cuando los objetos están en movimiento.

Tienen grandes dificultades en interpretar gráficas (s,v,a,t).

¹¹ John Clement (1983) A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students. En (Gentener & Stevens Eds) *Mental Models* Lawrence Erlbaum Associates pp 325-339

¹² Viennot (1979) Op. cit.

¹³ Efraim Fischbein, Ruth Stavy & Hana Ma-Haim (1989) The psychological structure of naive impetus conceptions. *International Journal of Science Education* 11(1) pp 71-81

¹⁴ Lillian McDermott (1984) Research on Conceptual Understanding in Mechanics. *Physics Today* 1984(July) pp 24-32

No logran asociar la velocidad instantánea a un instante particular de tiempo.
No discriminan entre velocidad y cambio de velocidad.
No toman en cuenta los intervalos de tiempo en los que ocurre el cambio de velocidad.
La velocidad es algo intrínseco al objeto y no depende del marco de referencia.
No consideran independencia en movimientos ortogonales.

- 4- Fuerza y movimiento. Este apartado resume las ideas de los estudiantes mostradas previamente.

Permanece la idea del ímpetus.
El movimiento siempre ocurre en la dirección de la fuerza.
La fuerza de gravedad contrarresta la de un objeto lanzado hacia arriba.
El movimiento implica fuerza.
Parece coincidir una visión prenewtoniana y una newtoniana en los estudiantes dependiendo del contexto de la pregunta.
Se presentan confusiones cuando aparecen dos o más fuerzas para determinar los efectos resultantes.

Un inventario de ideas previas fue posteriormente ofrecido por Halloun y Hestenes¹⁵ quienes consideran a las ideas previas como sentido común y al igual que McCloskey¹⁶ y Clement¹⁷, clasifican algunas ideas como prenewtonianas. Hacen notar que el término aristotélico que comenzaba a usarse de manera común para referirse a las ideas previas de los estudiantes no es el más apropiado y que, en todo caso, las ideas de los estudiantes están más cercanas a la de ímpetus de fines de la edad media. Posteriormente Hestenes¹⁸ y colaboradores ofrecerán un inventario adecuado a los profesores de enseñanza media y una prueba (test) de uso libre para que los profesores la apliquen a sus estudiantes. Las ideas previas reportadas por Halloun y Hestenes son:

- 1- Se comparte con Aristóteles que los objetos más pesados caen más rápido y que esto ocurre en presencia de la resistencia de un medio.
- 2- Que de acuerdo con la teoría del ímpetu, cuando se empuja un objeto, éste adquiere una fuerza que lleva consigo hasta que se disipe por la resistencia con el medio en el que se mueve.
- 3- Todo movimiento es causado por una fuerza.

¹⁵ Ibrahim Abou Halloun & David Hestenes (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics* 53(11) pp 1056-1065

¹⁶ McCloskey (1983) Op.cit.

¹⁷ Clement (1983) Op. cit.

¹⁸ David Hestenes, Malcolm Wells & Gregg Swackhamer. (1992) Force Concept Inventory. *The Physics Teacher* 30 pp 141-158

- 4- Los conceptos cinemáticos como con velocidad, rapidez y aceleración son equiparables con el de fuerza.
- 5- Las fuerzas son diferentes de acuerdo a sus aplicaciones.
- 6- La gravedad es una especie de ímpetus que adquieren los objetos al caer.
- 7- No hay gravedad ni movimiento de caída en el vacío, los objetos se quedan estáticos.
- 8- Cuando dos objetos en movimiento coinciden en la posición en un instante, entonces tienen la misma velocidad (aunque sea instantáneamente).
- 9- Cuando un objeto sale de una trayectoria circular, continuará su movimiento con esa trayectoria (una especie de ímpetus circular).
- 10- Un objeto bajo una fuerza constante se mueve con velocidad constante.
- 11- Una fuerza constante no puede acelerar un objeto más allá de cierta velocidad límite.
- 12- El aumento de velocidad es proporcional a la fuerza aplicada.
- 13- La masa es una resistencia al movimiento aún si no está presente la fricción.
- 14- Al principio de una caída libre, no hay fuerza de gravedad, solo aparece cuando el objeto va cayendo.
- 15- La gravedad actúa de manera diferente en situaciones diferentes por ejemplo, en una caída libre y en un plano inclinado.
- 16- En cuanto al movimiento de proyectiles prevalece la idea del ímpetus.
- 17- En cuanto a la tercera ley de Newton, no hay correspondencia entre objetos en interacción y/o aplican todas las fuerzas a un solo objeto.
- 18- La aceleración es debida a una fuerza en aumento.
- 19- La gravedad se concibe como una tendencia a caer.

Como puede apreciarse, existe un gran número de ideas previas que utilizan los estudiantes para representarse las situaciones físicas y que son incompatibles con la Física que se enseña en las escuelas y universidades. Estas ideas previas dieron origen a diversas interpretaciones de las mismas como preconcepciones, ideas erróneas, ideas de sentido común, teorías intuitivas, esquemas alternativos entre otras. Ante tal situación Viennot¹⁹, hace una reflexión sobre estas interpretaciones e inventarios poniendo énfasis en los problemas que originan y mantienen las ideas previas en el pensamiento de los estudiantes. En especial muestra que las ideas previas no deben verse como entidades aisladas (tipo inventario) así como no pueden ser categorizadas por una sola frase como “*el movimiento implica fuerza*” (Clement²⁰). Hace notar por ejemplo, que los conceptos formulados por los estudiantes son complejos, llenos de significados difusos y que, por lo tanto, no son estrictamente concepciones erróneas como se ha hecho ver a los profesores. Muestra también la dependencia de las ideas con el problema físico específico. Entre las preguntas que deja abiertas se encuentran: ¿Qué clase de problemas lleva a los estudiantes a expresar sus preconcepciones?, ¿qué formulación usan los estudiantes cuando sostienen sus

¹⁹ Lorence Viennot. (1985) Analyzing students' reasoning: Tendencies in interpretation. *American Journal of Physics* 53(5) pp 432-436

²⁰ Clement (1983) Op. cit.

preconcepciones? y ¿qué otros aspectos del razonamiento espontáneo están relacionados con sus concepciones y de qué manera?

Preguntas como las anteriores comenzaron a generar otro tipo de investigaciones, unas centradas en los procesos de cambio conceptual, otras sobre el análisis más específico sobre las particularidades de las ideas previas y su contexto cultural y otras más sobre la consistencia de las ideas de los estudiantes y la influencia de los profesores. Como ejemplo de las investigaciones sobre cambio conceptual en las ideas previas se tiene el trabajo de Champagne, Gunstone y Klopfer²¹ quienes analizaron las ideas sobre gravedad, encontrando aspectos ya mencionados como que los objetos más pesados llegan primero al piso, que los objetos más pesados caen más rápido y otros no mencionados como que la atracción gravitacional es mayor cerca de la superficie (desconociendo los estudiantes que esto es cierto para grandes distancias). Sin embargo, buscan también aspectos del pensamiento de carácter general y reportan lo siguiente:

- a) Los estudiantes no aplican las leyes físicas a casos semejantes.
- b) Sus proposiciones son sobre los objetos y no sobre los conceptos y principios.

Aspectos como estos serán tomados en cuenta para investigaciones en solución de problemas y diferencias entre expertos y novatos²²

Peter Hewson²³ ofrece un interesante trabajo en el que además de establecer una clasificación más racional sobre las ideas previas que de cuenta de procesos generales, hace un intento por determinar aspectos que denomina epistemológicos y con los cuales sea posible ofrecer a la explicación y posteriormente a la enseñanza elementos que son necesarios tomar en cuenta para tener una visión que interrelacione las ideas previas con los procesos genéricos que requieren las teorías científicas. La clasificación que propone para las ideas previas es:

- a) Concepciones indiferenciadas, (posición, velocidad, aceleración, fuerza-movimiento, fuerza-cantidad de movimiento-energía).
- b) Aspectos no reconocidos, (inexistencia de tipos pasivos de fuerza, no interacción entre la fuerza y el objeto).
- c) Características del movimiento, (la dirección del movimiento y la fuerza, el ímpetu o persistencia de una causa primera).
- d) Dependencia del contexto, (el tamaño relativo de los factores, diversidad de respuestas dependientes del contexto).

²¹ B. Andrey Champagne, F. Richard Gunstone & E. Leopold Klopfer (1985) Instructional consequences of students' knowledge about physical phenomena. En (Leo, West & Pines Eds) *Cognitive Structure and Conceptual Change* Academic Press. Pp 61-90

²² Michelen Chi, quien también lleva a cabo investigaciones sobre cambio conceptual, muestra en trabajos precedentes sobre expertos y novatos aspectos semejantes a los encontrados por Champagne, Gunstone y Klopfer. (1985) Op. cit.

²³ Peter W. Hewson (1990) La enseñanza de fuerza y movimiento como cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias* 8(2) pp 157-171

En cuanto a su clasificación epistemológica establece:

- a) Falta de consistencia. Principalmente en formas de usar los conceptos y en la construcción de razonamientos (predicciones o explicaciones).
- b) Relación causa - efecto. Parece haber poca claridad sobre este aspecto debido a que los estudiantes no la aplican de manera consistente, dependiendo su utilización del contexto y los objetos involucrados.
- c) Generalizabilidad. La dependencia del contexto impide que se obtengan afirmaciones generalizables.
- d) Asimetría. No se presentan relaciones simétricas entre causa y efecto.

Finalmente hace ver como estos aspectos epistemológicos son determinantes para comprender las teorías como la mecánica y que por consiguiente las ideas de “sentido común” son más inteligibles que las de la Física.

En otras investigaciones sobre ideas previas en mecánica, se han hecho notar aspectos como los siguientes: que no todas las preconcepciones son errores, y que algunas, como el reconocimiento de la reacción ante una fuerza, pueden servir de concepciones “ancla” para la enseñanza²⁴. Esto merece un señalamiento especial porque en ocasiones se tiene la impresión de que todo lo que los estudiantes han construido previamente es equívoco y sin influencia sobre sus futuros desarrollos conceptuales. Desde luego esto no es así, y las ideas previas deben tomarse como parte de un proceso sólidamente elaborado puesto que, de no ser así, no tendría sentido ningún esfuerzo encaminado a su transformación.

También se han buscado relaciones entre las ideas previas y el pensamiento lógico de los estudiantes, mostrando que las ideas previas no implican un uso incorrecto de las inferencias lógicas²⁵. Se ha buscado la consistencia tanto temporal como de aplicación a diversos fenómenos físicos, mostrando que no hay un solo patrón como podría suponerse de las hipótesis sobre las teorías intuitivas²⁶ haciendo notar, también, la dependencia del contexto en la construcción de las ideas previas²⁷. Otros estudios sobre consistencia muestran cómo los posibles logros en el aprendizaje de la mecánica, no son permanentes y que los estudiantes después de cierto tiempo y condiciones y ante cierto tipo de preguntas, regresan a sus ideas previas que se creía superadas.²⁸ Apuntaremos también que se han llevado a cabo investigaciones que muestran cómo los profesores tienen problemas conceptuales con

²⁴ John Clement, David E. Brown Y Alleta Sietsniam. (1989) Not all preconceptions are misconceptions: finding “anchoring” conceptions’ for grounding instruction on students’ intuitions. *International Journal of Science Education* 11 pp 554-565

²⁵ Shulamith G. Eckstein & Michel Shemesh. (1989) Development of children’s ideas on motion: intuition vs logical thinking. *International Journal of Science Education* 11(3) pp 327-336

²⁶ McCloskey (1983) Op. cit.

²⁷ M. Finegold & P. Gonsky. (1991) Students’ concepts of force as applied to related physical systems: A search for consistency. *International Journal of Science Education* 13(1) pp 97-113

²⁸ Igal Galili & Varden Bar. (1992) Motion implies force: where to expect vestiges of the misconceptions?. *International Journal of Science Education* 14(1) pp 63-81

determinados conceptos físicos y las repercusiones que esto tiene en las concepciones de los alumnos²⁹.

Por último mencionaremos que se han llevado a cabo investigaciones sobre ideas previas en estudiantes de posgrado de Física³⁰ en los que se muestra que las ideas previas son permanentes y que los sujetos las utilizan cuando los problemas rebasan el formulismo escolarizado de manera independiente a su grado de escolaridad.

3.3 Ideas previas en estática de fluidos

Para el caso de la estática de fluidos, no se encuentra en la literatura la misma abundancia de estudios que en el caso de mecánica. El número de investigaciones ha sido considerablemente menor y no se cuenta con una visión tan completa. Las ideas previas en este campo han sido investigadas a partir de aspectos muy específicos relacionados con la presión y la flotación y, en la mayoría de los casos, solo proporcionan elementos relevantes, focalizados sobre una sola variable lo que impide una representación de dominio completo como en mecánica.

Entre los estudios más importantes que se han hecho tenemos aquellos que han mostrado cómo:

- a) La flotación depende exclusivamente del peso de los objetos.³¹
- b) El nivel de hundimiento depende de la forma de los objetos.³²
- c) La presencia de una fuerza ascendente es una propiedad de los objetos en el agua.³³
- d) Cuando los objetos están en la superficie no hay fuerza de empuje.³⁴
- e) El aire presenta dos propiedades; una es presionando y la otra jalando a los líquidos.
- f) El aire empuja los objetos para ocupar espacio.³⁵
- g) El vacío ejerce presión; empuja o jala.³⁶

²⁹ Igal Galili. (1993) Weight and gravity: teachers' ambiguity and students' confusion about the concepts. *International Journal of Science Education* 15(2) pp149-162

³⁰ A. Villani y Pacca I. (1990) Conceptos espontáneos sobre colisiones. *Enseñanza de las Ciencias* 8(3) pp 238-243

³¹ Esta idea previa se encuentra en los trabajos siguientes: B. Inhelder y J Piaget (1972) De la lógica del niño a la lógica del adolescente. Ed. Paidós. Buenos Aires; M Hewson (1985) The acquisition of scientific knowledge: Analysis and representation of student conceptions concerning density. *Science Education* 70 pp160-170; D.M.A. von Pfuhl (1980). Notions of physical laws in childhood. *Science Education* 64 pp 59-84

³² von Pfuhl.(1980) Op. cit.

³³ Hewson. (1985) Op. cit.

³⁴ F.M. Barral (1990) ¿Cómo flotan los cuerpos que flotan?. Concepciones de los estudiantes. *Enseñanza de las Ciencias* 8 pp 244-250

³⁵ Esta idea se reporta en Rollnick, M & Rutherford M. (1990). African primary school teachers-what ideas do they hold on air and air pressure? *International Journal of Science Education* 12 pp 101-113 y en Rollnick, M & Rutherford M.(1993). The use of conceptual change model and mixed language strategy for remediating misconceptions on air pressure. *International Journal of Science Education* 15 pp 363-381

³⁶ K.C. De Berg. (1992) Students' thinking in relation to pressure-volume changes of a fixed amount of air: The semiquantitative context. *International Journal of Science Education* 14 pp 295-303.

- h) La presión es una fuerza.³⁷
- i) Los gases ejercen presión sólo cuando se calientan, empujan o están en movimiento.³⁸
- j) La presión actúa hacia abajo y no hacia los lados.³⁹

Como puede notarse, estas ideas previas presentan aspectos aislados de la estática de fluidos insuficientes para construir modelos como los propuestos. Por ello, la principal fuente de ideas previas que se utilizarán para construir los modelos parciales posibles, es un estudio propio diseñado para conocer las ideas previas de los estudiantes del bachillerato relativas a los conceptos de presión y flotación en líquidos y gases⁴⁰.

3.3.1 Descripción del estudio

El estudio del que se toman los datos, tuvo como finalidad, conocer las ideas previas en Física que tienen los estudiantes mexicanos que cursan los bachilleratos de la UNAM. Para ello, se decidió analizar los temas de presión y flotación en gases y líquidos debido a que, como se ha apuntado, había poca información relevante en la literatura. Además, con este estudio se pretendía caracterizar formas de razonamiento y problemas de aprendizaje y enseñanza que se presentan en los bachilleratos como la Escuela Nacional Preparatoria y el Colegio de Ciencias y Humanidades. El estudio se hizo en colaboración entre el Centro de Instrumentos y la Facultad de Psicología, ambos de la UNAM.

La muestra consistió de 314 estudiantes del bachillerato de la UNAM (Escuela Nacional Preparatoria y Colegio de Ciencias y Humanidades). Se seleccionaron al azar grupos escolares del sexto semestre de nueve planteles. Una vez seleccionados y con la colaboración de sus profesores, se determinó el rendimiento de los estudiantes para clasificarlos por alto y bajo rendimiento. También se clasificaron por sexo y por área de estudio. Todos los estudiantes habían cursado al menos una materia de Física.

Para la obtención de las ideas previas se aplicó un cuestionario sobre presión y flotación en líquidos y gases. Este cuestionario se elaboró con base en los referentes encontrados en la literatura (la cual se ha expuesto aquí) y una versión preliminar aplicada a una muestra de estudiantes del nivel medio superior. El cuestionario definitivo fue validado previamente⁴¹ y consistió de catorce preguntas que, de manera balanceada, se referían a

³⁷ Idem.

³⁸ M.G. Seré. (1985) The gaseous state. En *Children Ideas in Science* (Driver, Guesne & Tiberghien Eds). Milton Keynes U.K. Open University Press.

³⁹ Clough. E. & Driver R. (1986) A study of consistency in the use of students' conceptual framework across different task contexts. *Science Education* 70 pp 473-496

⁴⁰ Este estudio se encuentra descrito en forma completa en Flores F. Gallegos L. García B. Covarrubias H., Vega. (1993) Reporte de Investigación *Las ideas de los estudiantes sobre presión y flotación*. Proyecto PAPIME. Centro de Instrumentos UNAM. y en Flores F., Gallegos, L. Covarrubias H., Vega E., Rosas, M., García B., Alvarez, M., Días de León. S. M. Lísarraga P. & Meza. A. (1993) Partially possible models and concept formation, in predegree students' concepts *Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics. Cornell University (electronical only)*

⁴¹ Flores, F. et al,(1993) Op..cit..

situaciones fenoménicas entre gases y líquidos. Las doce primeras preguntas fueron de situaciones específicas (experimentales y situaciones pensadas) en las cuales se podía elegir una opción que además requería de justificación y en otros casos, fueron de respuesta abierta. Las dos últimas preguntas fueron de respuesta directa sobre el concepto de presión y la ley de Arquímedes.

Además del cuestionario, se llevó a cabo una entrevista con una muestra de los estudiantes que contestaron el cuestionario. Esta muestra se seleccionó después de analizar los resultados y escoger alumnos que presentaron, por un lado, concepciones cercanas a las científicas y por el otro muy alejadas. Los resultados de las entrevistas se utilizan aquí, para comprobar la pertinencia de los modelos parciales posibles para representar las ideas y las inferencias de los estudiantes.

Para determinar las ideas previas de los estudiantes, se establecieron con sus respuestas, categorías bajo las cuales, se podían agrupar y sintetizar las concepciones de los estudiantes. Se tomaron en cuenta sólo aquellas categorías cuya frecuencia era mayor a diez. Las categorías se construyeron de manera que expresaran enunciados completos y no son las expresiones literales de los estudiantes. El conjunto de ideas previas determinado por este estudio abarca las reportadas previamente por la literatura y otras, adicionales, que están en función del contexto físico (líquidos y gases) que no habían sido previamente reportadas. Otros aspectos como la dependencia de los resultados del nivel escolar, sexo y preferencia académica también se reportan en el estudio pero no son tomados en cuenta en este trabajo.

Las ideas previas encontradas son las siguientes:

1. El comportamiento de los objetos depende de su sustancia.
2. Si las características de los objetos no cambian, su comportamiento es invariable.
3. La presión es una fuerza.
4. La presión está determinada por variables físicas externas.
5. La presión puede ser atmosférica, gravitacional, debida al aire, etc.
6. La presión actúa en todas direcciones.
7. En el vacío no hay gravedad.
8. En el vacío, los objetos no cambian su peso.
9. El agua ejerce presión sobre los objetos.
10. Un objeto flota dependiendo de su peso.
11. Un objeto flota dependiendo de su geometría de contacto.
12. Un objeto flota dependiendo de su forma.
13. Un objeto flota dependiendo de su volumen.
14. Un objeto flota cuando se satura de líquido.
15. En el vacío, la presión tiende a jalar a los objetos.
16. La presión tiene diferentes magnitudes en cada dirección.
17. El aire atrapado ejerce presión.
18. La fuerza o presión es transmitida por el aire.
19. El aire atrapado tiende a empujar a los objetos.
20. La presión es más grande en objetos más pesados.
21. La presión depende de la altura (o profundidad).

ESTE LIBRO NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

22. La presión en un líquido es ejercida en el fondo.
23. La presión es debida al peso del líquido.
24. Si el objeto es más denso que el líquido entonces no flota.
25. En el agua los objetos pierden peso.
26. En objetos que no flotan, menos agua penetra por sus poros.
27. Flotación es un equilibrio entre el peso de un objeto y la presión del líquido.
28. El líquido más denso queda encima del menos denso.

Una vez que se han determinado ideas previas para los casos de mecánica y estática de fluidos (presión y flotación), el siguiente paso será aplicar los criterios establecidos para la construcción de los conjuntos conceptos constrictores cc y reglas de correspondencia rc para, posteriormente, elaborar los modelos M_{pp} .

3.4 Modelos Parciales Posibles. Una representación para las ideas de los estudiantes

3.4.1 Modelos parciales posibles para el caso de mecánica

El análisis sobre las ideas previas para determinar si pertenecen al conjunto de los conceptos constrictores o al de las reglas de correspondencia, se hará aplicando los criterios definidos previamente (páginas 67-68) a cada una de ellas. Para tal efecto, tomaremos las ideas previas reportadas previamente, en especial, las de Viennot⁴² y Haolloun y Hestenes⁴³ quienes presentan el conjunto más completo.

Idea previa

“Los estudiantes suelen atribuir a los objetos las cantidades físicas como la fuerza y no a sus interacciones”. Esta idea puede reformularse de la siguiente manera: **Las magnitudes físicas son propiedades de los objetos**. Como esta idea previa es una aseveración de carácter general y no una situación de relación de variables o de condiciones específicas, se aplicarán los criterios para CC.

Criterios que satisface (CC):

Esta idea cumple con el criterio (A) de ser un referente para alguna situación física (de hecho este enunciado aplica para cualquier magnitud física). Se asume que cumple con (B) constituyéndose como axioma. Es una idea general abstracta por lo que cumple con (C). Es posible construir su negación: **Las magnitudes físicas no son propiedades de los objetos sino de sus interacciones** la cual tiene sentido físico y por tanto esta idea previa como su negada, son interpretables bajo cualquier operador t , (un operador t , puede ser por ejemplo la suma de diversas magnitudes aplicadas o varios o un mismo objeto) por lo que cumplen con el criterio (E). En

⁴² Vienott (1979 Op. cit.

⁴³ Halloun & Hestenes (1985) Op. cit.

cuanto al criterio (F), cumple con tener sentido físico (Plausibilidad de significado). Es una construcción no determinada en forma directa por la experiencia (Construcción abstracta). Es aplicable a todo objeto físico (Afirmación de carácter general). Es posible articularla con otras ideas para obtener inferencias (Complementariedad). El enunciado es preciso (no traslapamiento). El enunciado puede constituirse en un elemento causal (causalidad) y al parecer, no sufre transformación de significado por las condiciones específicas (invariancia).

Como puede apreciarse, esta idea previa puede designarse como cc_1 .

Idea previa

“Las fuerzas y el movimiento están siempre en la misma dirección”. Este enunciado se puede transformar como **La dirección del movimiento es la dirección de la fuerza aplicada**. En este caso, se presenta una afirmación sobre un proceso relacionado con la experiencia y que determina una relación específica entre la dirección del movimiento y la fuerza, por lo que se aplicarán los criterios para RC.

Criterios que satisface (RC).

Es una idea con significado físico y es un elemento descriptivo y generalizable por lo que cumple con (G). Define una relación específica entre la fuerza aplicada y la dirección del movimiento por lo que cumple con (H). No es un enunciado vacío y su negación **el movimiento no ocurre en la dirección de la fuerza aplicada** tiene sentido físico, por lo que es interpretable bajo algún operador s cumpliendo así el criterio (un operador s puede ser en este caso una rotación al vector de dirección de la fuerza aplicada) (I). En cuanto al criterio (J) cumple con que la relación que establece tiene sentido físico (relación con significado). El enunciado no es dependiente de condiciones específicas y/o azarosas (relación unívoca). No presenta ambigüedades (no traslapamiento). No depende de aspectos como la naturaleza de la fuerza (invariante) y es posible relacionarla con otra idea para determinar otro tipo de relación (composición de relaciones). Nótese que no se aplicó el criterio de suficiencia debido a que éste debe aplicarse al conjunto de elementos.

Esta idea previa puede entonces designarse como rc_1 .

Idea previa

“Comprenden la acción y la reacción de la tercera ley de Newton como fuerzas concurrentes y el movimiento, por consiguiente, será en el sentido de la fuerza mayor”. Esta expresión es compuesta y podemos expresarla en su parte central como **La acción y la reacción actúan sobre el mismo objeto**. En cuanto a la parte referente al sentido del movimiento está contenida ya en el elemento rc_1 . Esta noción o idea previa, indica aspectos que no son obtenibles directamente de la experiencia debido a que la acción y la reacción son conceptos no primitivos introducidos en la escuela, puesto que, para los estudiantes, lo que cuenta es la acción impartida. Esta idea previa tiene los atributos para pertenecer a CC.

Criterios que satisface (CC)

El enunciado tiene significado físico con intención explicativa sobre todo en aspectos relativos a equilibrio (aunque esta concepción es incorrecta) por lo que cumple con (A). Aunque esta idea no es absolutamente propia puesto que está inducida por la información escolar, los estudiantes la aplican de manera consistente una vez formulada por lo que puede considerarse que satisface (B). Es una construcción abstracta puesto no tienen un referencial empírico directo (C). Su negación **la acción y la reacción actúan sobre objetos diferentes** no solo tiene significado físico, sino que es un enunciado correcto de acuerdo a la tercera ley de Newton por lo que también es interpretable bajo algún operador t cumpliendo así con (E). En cuanto al criterio (F), cumple con tener sentido físico (plausibilidad de significado). Como se ha apuntado, es una construcción abstracta. Es aplicable a toda situación donde intervengan fuerzas (afirmación de carácter general). No presenta ambigüedad (no traslapamiento). Puede relacionarse con otros conceptos y/o relaciones (complementariedad). Constituye, sin embargo, una explicación causal para el caso del equilibrio⁴⁴ (causalidad). Esta idea previa no cambia de significado en situaciones diversas (invariancia).

Esta idea previa puede designarse como cc₂.

Idea previa

Viennot⁴⁵ denomina fuente de fuerza a la noción que expresan los estudiantes como aquella que se proporciona a los objetos y que éstos adquieren. Este enunciado puede expresarse en términos del ímpetu como: **Los objetos al ser empujados adquieren fuerza o ímpetu**. Debe notarse aquí que ímpetu y fuerzas son sinónimos en el lenguaje de los estudiantes. Esta idea si bien puede tener alguna referencia en la experiencia, principalmente debida a cuando un objeto en movimiento choca o golpea a una persona es, sin embargo, una construcción abstracta puesto que el golpe es una sensación interpretada como un agente con propiedades como las que se han atribuido a cc₁.

Criterios que satisface (CC)

El enunciado sobre la adquisición del ímpetu cumple con ser un enunciado referido a una situación física (A). Es una concepción básica en el pensamiento de los estudiantes (B). Es una construcción abstracta con intención de ser una explicación causal (C). La negación **los objetos al ser empujados no adquieren fuerza o ímpetu** tiene sentido físico por lo que ambos enunciados son interpretables bajo

⁴⁴ Cabe insistir aquí, que esta interpretación común por parte de los estudiantes de que la tercera ley lleva a condiciones de equilibrio es incorrecta, puesto que la acción se ejerce sobre un cuerpo y la reacción sobre el que produce la acción, de tal manera que no se puede pensar en situación de equilibrio porque no existe suma de fuerzas sobre un mismo objeto.

⁴⁵ Viennot (1979) Op. cit.

algún operador t cumpliendo así con (E). En cuanto a (F), cumple con tener significado claro (plausibilidad de significado) y con ser una representación abstracta (construcción abstracta). La afirmación es válida para todo objeto que es empujado (afirmación de carácter general). Es articulable con otras concepciones en este caso con cc_1 (complementariedad). Constituye un argumento causal para la continuidad del movimiento (causalidad) y no sufre modificación de significado por otras circunstancias⁴⁶ (invariancia)

Esta idea previa la designaremos como cc_3

Idea previa

“Conciben la idea de una fuerza centrífuga de manera independiente a los marcos de referencia y su función es mantener el movimiento circular”. Este enunciado puede expresarse como **la fuerza centrífuga aparece en todo movimiento circular**. Esta idea parece tener origen en la experiencia cotidiana cuando una persona da vuelta en algún objeto en movimiento o cuando hace girar un objeto mediante una cuerda. La persona siente que, si no hubiera un medio de sostén - una pared o la cuerda - el objeto o persona se movería en dirección radial. Esto desde luego no es así y parece constituir una especie de primitivo fenomenológico en el sentido de diSessa⁴⁷. Por ello aunque en principio establece una relación, tiene la función de una explicación causal por lo que se considerará para ser elemento de CC.

Criterios que satisface (CC)

Esta idea tiene significado sin ambigüedad, por lo que cumple con (A). Es considerada como una situación verdadera puesto que no se presentan casos donde la fuerza centrífuga no aparezca en un movimiento circular⁴⁸ (B). Como se ha apuntado, puede ser considerada como un primitivo fenomenológico por lo que cumple con (D). La negación **en todo movimiento circular no aparece una fuerza centrífuga** presenta ciertas dificultades, puesto que no quedaría claro su significado físico a menos que se tome en cuenta que se está en un marco de referencia inercial en el cual, efectivamente, no se consideran las fuerzas centrífugas. Tomando en cuenta esta observación se aceptaría la negación como elemento de CC. Con la consideración precedente es posible utilizar un operador t para el cual esta idea

⁴⁶ Por ejemplo en la explicación del movimiento parabólico, la caída del objeto y su trayectoria son explicadas por los estudiantes (y también en la antigüedad) como la disminución del ímpetus adquirido debido a la fricción con el aire. Lo cual no implica variación sobre la concepción del ímpetus o fuerza adquirida.

⁴⁷ Recordemos que los primitivos fenomenológicos o p-prims' de diSessa, son abstracciones que los sujetos elaboraran a partir de sus vivencias quedando como elementos axiomáticas en la descripción y explicación de la realidad observable. diSessa (1983) Op.cit.

⁴⁸ Cabe mencionar aquí que esta idea de la fuerza centrífuga, aparece en numerosos textos de enseñanza básica y de divulgación de manera incorrecta. La fuerza centrífuga debe tomarse en cuenta sólo en marcos no inerciales donde se requiere la presencia de fuerzas ficticias que se aplican al observador que se encuentra en movimiento en dicho marco no inercial como es el caso de un marco en movimiento circular.

previa sea interpretable en términos fenomenológicos por lo que se cumple con (E). El enunciado tiene significado claramente interpretable (plausibilidad de significado). No cumple con ser construcción abstracta en sentido estricto, pero sí bajo la forma de primitivo fenomenológico, es una afirmación para todo movimiento circular (afirmación de carácter general). Es articulable con otras ideas de fuerza y movimiento (complementariedad). No se confunde con otro tipo de movimientos (no traslapamiento). Para la condición de preservación de movimiento circular es un argumento necesario (causalidad) y finalmente, su significado y en este caso aplicación, no cambia de acuerdo a las circunstancias físicas (invariancia). Si bien como puede apreciarse que no cumple de manera precisa con todas las características impuestas por (F), cumple con la mayoría y juega un papel importante en el movimiento circular por lo que puede considerarse como elemento concepto constrictor.

Esta idea previa se designa como cc₄.

Idea previa

“La velocidad de un objeto es directamente proporcional a la fuerza aplicada”, de este enunciado se deriva la relación $F \propto v$ que expresa una relación unívoca. También se pueden asociar a la expresión que, si el objeto tiene velocidad cero, entonces no hay fuerza aplicada (si $v = 0 \quad F = 0$) y a la condición necesaria de que, si un objeto tiene cierta velocidad, entonces necesariamente está presente una fuerza (si $v \neq 0 \quad F \neq 0$). Estas relaciones, de manera clara, deben ser consideradas para pertenecer al conjunto de reglas de correspondencia.

Criterios que satisface (RC)

El enunciado y sus representaciones en términos de velocidad y fuerza son descriptores de una situación física de manera clara por lo que cumple con (G). Las relaciones entre variables quedan claramente definidas y, además, son operables de manera directa (H). La negación **la velocidad de un objeto no es directamente proporcional a la fuerza aplicada** tiene sentido físico claro, por lo cual, ambos enunciados son posibles de interpretación bajo algún operador s por lo que cumplen con (I). En cuanto a (J), la relación unívoca presenta significado claro (relación con significado). El enunciado cumple con ser relación unívoca y no presenta confusión al aplicarse a las situaciones físicas (no traslapamiento). Es una afirmación general que no cambia de significado (invariancia) y es susceptible de establecer otras relaciones (composición de relaciones).

Esta idea previa se designa como rc₂

Idea previa

“El ímpetu se disipa por fuerzas de fricción”. Esta idea previa manifiesta una condición física sobre la disipación del “ímpetu” por lo que se considera para el conjunto RC.

Criterios que satisface (RC)

El enunciado tiene significado físico claro (G). Establece la condición necesaria para que el “ímpetu” disminuya o llegue a ser cero (H). La negación **el ímpetu no se disipa por fuerzas de fricción** no es carente de significado físico por lo que ambos enunciados son interpretables bajo un operador s por lo que cumple con (I). La condición que plantea este enunciado, tiene significado físico (relación con significado). Presenta una condición necesaria - aunque no suficiente - por lo que cumple con ser una relación unívoca que podemos expresar como $I - F_f v_{final} v_{inicial}$ (I es el ímpetu, F_f la fuerza de fricción y v_{final} y $v_{inicial}$ las velocidades final e inicial), no presenta posibilidad de confusión con otras causas para la disminución del “ímpetu” (no traslapamiento). Es invariante y puede relacionarse con otros elementos de RC.

Designaremos esta idea previa como rc_3

Idea previa

“En el vacío, el ímpetu no se disipa”. Este enunciado no es derivable de la experiencia, puesto que no es común que se tenga relación con procesos que ocurren en el vacío. Este enunciado proviene de atributos sobre el vacío que los estudiantes le asignan como se ha visto en las ideas previas sobre presión. Por tanto, se aplicarán los criterios relativos a CC.

Criterios que satisface (CC)

El enunciado se refiere a una situación física posible por lo que cumple con (A). Es una concepción que los estudiantes expresan en diversos ámbitos fenomenológicos, por lo que se puede considerar que tiene carácter de verdad (B). Es una construcción abstracta porque no tiene referentes fenomenológicos directos (C). La negación del enunciado **en el vacío el ímpetu se disipa**, tiene sentido físico posible por lo que ambos enunciados son interpretables bajo un operador t cumpliendo así con (E). En cuanto al criterio (F) cumple con tener significado posible (plausibilidad de significado), con ser una construcción abstracta, con ser una afirmación de carácter general, no se confunde con otro posible enunciado relativo al vacío y el “ímpetu” (no traslapamiento). Puede fungir como un a explicación causal (causalidad) y no sufre modificaciones con los cambios de las fuerzas o de la naturaleza de los objetos (invariancia).

Esta idea previa se designa como cc_5

Idea previa

En cuanto a los problemas que se presentan con la velocidad y la aceleración, las ideas previas no son lo suficientemente precisas para determinar un enunciado, por ello, tomaremos de las ambigüedades entre velocidad y aceleración reportadas por McDermott⁴⁹ como el que los estudiantes no discriminan entre velocidad y aceleración, entre cambio de velocidad y aceleración. De las confusiones espaciales y temporales (ver páginas 105 y 106), tomaremos la formulación establecida en un trabajo previo⁵⁰ que resume estas confusiones bajo el siguiente enunciado. **El cambio de velocidad es la aceleración ($v = a$)**. Este enunciado establece una relación entre dos variables físicas por lo que se considera para pertenecer a RC.

Criterios que satisface (RC)

El enunciado es referido a una situación de movimiento (G). Define una relación específica entre variables (H). La negación **el cambio de velocidad no es la aceleración** tiene sentido físico - de hecho correcto - por lo que ambos enunciados son interpretables bajo un operador s con lo que se cumple (I). En cuanto a (J), cumple con ser una relación con significado, también cumple con ser una relación unívoca, no se confunde con otra relación (con excepción del caso de la aceleración como la velocidad máxima que adquiere un objeto). Es invariante y puede relacionarse - en este caso en forma matemática - con otras reglas de correspondencia.

Esta idea previa se designa como rc₄.

Idea previa

“No se considera independencia en movimientos ortogonales”. Este enunciado puede precisarse de la siguiente forma: **las coordenadas de velocidad y aceleración de los objetos en movimiento no son independientes en ningún caso**. Con este enunciado se expresa una condición que debe cumplirse para el movimiento por lo que será considerado para pertenecer a RC.

Criterios que satisface (RC)

El enunciado se refiere a una situación física real o posible (G). Define condiciones, en este caso, espaciales en las que la velocidad y la aceleración no tienen coordenadas linealmente dependientes⁵¹ por lo que cumple con ser una condición específica (H). El enunciado negado **las coordenadas de velocidad y aceleración**

⁴⁹ McDermott (1984) Op. cit.

⁵⁰ Flores F., Gallegos L., Vega., y Servín D. (1991) Razonamiento y cambio conceptual. C. Ladera (ed) *Proceedings. II Interamerican Conference on Physics Education*. Caracas.

⁵¹ Se define la independencia lineal cuando un vector puede expresarse en términos de vectores unitarios ortogonales para los cuales el producto punto entre ellos es cero, esta característica de independencia lineal implica que lo que ocurre como movimiento en una dirección es independiente del movimiento de otra dirección siempre y cuando sean ortogonales.

de los objetos en movimiento pueden ser independientes en algún caso tiene sentido físico - de hecho correcto para ejes ortogonales - por lo que ambos enunciados son interpretables bajo algún operador s con lo que se cumple (I). El enunciado también cumple con ser una condición con significado físico, (relación con significado), es una condición suficiente (relación unívoca). No presenta interpretaciones diversas en marcos de referencia distintos (no traslapamiento). No cambia con rotaciones o transformaciones de los marcos de referencia (invariancia) y determina funciones y relaciones con otras variables - como ejemplo la dependencia lineal de las velocidades - (composición de relaciones).

Esta regla de correspondencia es rc_5 .

Idea previa

“Todo movimiento es causado por una fuerza”. Este enunciado, expresa claramente la función causal de la fuerza y es por tanto considerado para CC.

Criterios que satisface (CC)

Es un enunciado referido a toda posible situación de movimiento por lo que satisface (A). Es una expresión que cumple la función de ser causa primera del movimiento por lo que es verdadera en toda situación (B). Es un primitivo fenomenológico porque está asociado con la experiencia cotidiana de poner objetos en movimiento (D). Para que tenga sentido físico la negación, debe expresarse como **no todo movimiento es causado por una fuerza** - de hecho esto da origen a la primera ley de Newton⁵² - por lo que ambos enunciados son interpretables bajo algún operador t cumpliéndose así con (E). En cuanto a (F) claramente tiene un significado físico (plausibilidad de significado), es un enunciado abstracto aunque derivable de un primitivo fenomenológico, es una afirmación de carácter general puesto que se aplica a todo movimiento. Por ser una relación causal puede articular otros aspectos del movimiento (complementariedad), no presenta traslapamiento con otra posible causa de movimiento, es una relación causal y no presenta modificaciones bajo otras condiciones para explicar el estado de movimiento (invariancia).

Esta idea previa se designa como cc_6 .

Idea previa

“No hay gravedad ni movimiento de caída en el vacío, los objetos se quedan estáticos”. Este enunciado puede formularse de la siguiente manera: **en el vacío no hay gravedad**⁵³. Esta idea previa no es extraída de la experiencia cotidiana, aunque

⁵² El enunciado en su forma negada, está de acuerdo con la Primera ley de Newton que establece que la permanencia del estado de movimiento con velocidad constante en un marco de referencia inercial, se debe a la ausencia de fuerzas.

⁵³ La formulación "en el vacío no hay gravedad" es suficiente puesto que la gravedad es considerada como una fuerza y, como hemos visto de ideas previas anteriores, si no hay fuerza no hay ningún tipo de movimiento con lo que se deduce de manera directa el resto del enunciado original.

actualmente debe considerarse la influencia de programas de televisión sobre el espacio exterior. Sin embargo, hay indicios de que estas ideas están presentes antes de que se observaran este tipo de programas de televisión, sobre todo por considerar al vacío como la ausencia de propiedades y procesos físicos, si bien la situación actual, tiende a reforzar esta creencia. Se considera para el conjunto CC.

Criterios que satisface (CC)

El enunciado se refiere a una situación física posible por lo que cumple con (A). Es una afirmación general y por consiguiente verdadera (B). Es una construcción abstracta que no se deriva de la experiencia fenomenológica directa (C). La negación **en el vacío hay gravedad**, no solo tiene sentido físico sino que es verdadera para un vacío hecho en la Tierra y en general en cualquier cuerpo celeste, así como para el espacio entre cuerpos celestes, por lo cual es interpretable bajo algún operador t cumpliendo así con (E). Cumple en general con (F) puesto que satisface que tiene significado posible, es una construcción abstracta, es una afirmación de carácter general, es articulable con cualquier situación de movimiento en el vacío (complementariedad), no presenta variación de significado ni traslapamiento con otras situaciones físicas, puede ser una explicación causal para posibles estados de movimiento y no presenta variaciones debidas a otros efectos físicos (invariancia).

Esta idea previa se designa entonces como cc₇

Idea previa

“Si dos movimientos coinciden espacialmente en un instante entonces tienen la misma velocidad”. Esta idea es una interpretación de situaciones fenoménicas y establece una condición para la igualdad de velocidades. Por ello se clasificará como elemento perteneciente a RC.

Criterios que satisface (RC)

El enunciado se refiere a la condición - en este caso espacial - que se debe cumplir para que se afirme la igualdad de velocidades de dos objetos por lo que cumple con (G). La condición que establece de coincidencia espacial es clara, así como la consecuencia derivada de la condición por lo que satisface (H). La negación puede establecerse **como la coincidencia espacial de dos objetos no implica igualdad de velocidades**; tiene sentido físico por lo que ambos enunciados son interpretables bajo algún operador s con lo que se cumple (I). Cumple con los criterios para (J) de establecer una relación con significado, la relación derivada de la condición es unívoca, no se traslapa con otras condiciones para asegurar la igualdad de velocidades, permanece invariante y la condición puede acoplarse con otras para generar otras relaciones (composición de relaciones).

Esta idea previa se designa como rc₆.

Idea previa

“Cuando un objeto sale de una trayectoria circular, continuará con esta trayectoria”. Esta idea asegura la continuidad de un tipo de movimiento, pero no está ligada a la experiencia puesto que esa trayectoria no ha sido nunca observada; es inferida. Sin embargo no se toma en cuenta para pertenecer al conjunto CC, porque establece la condición física para una trayectoria específica y no tiene consecuencias sobre posibles explicaciones causales y sólo es pertinente para descripciones.

Criterios que satisface (RC)

Es un enunciado referido a una situación condicionada por la forma geométrica (G). Define de manera específica la trayectoria de un objeto, dando continuidad al movimiento circular (H). La negación puede enunciarse como **al salir de una trayectoria circular, un objeto no continuará con esa trayectoria**, por lo que ambos enunciados tienen significado por algún operador *s* con lo que se cumple (I). Por lo que respecta a los criterios de (J), tenemos que la condición define una trayectoria como una condición necesaria estableciendo así, una relación con significado, es descriptora de una situación física posible por lo que define una relación unívoca, no hay traslapamiento con otras condiciones para una trayectoria circular - por ejemplo una piedra atada a un cable -, la relación establecida por la condición es invariante y la inferencia de la trayectoria puede relacionarse con otros aspectos sobre trayectorias circulares como velocidades y aceleraciones sin ser modificada (composición de relaciones).

Esta idea previa se designa como rc₇.

Idea previa

“Las fuerzas de interacción son aplicadas a una masa y siguen la expresión $F=ma$ ”⁵⁴. Esta expresión define una relación entre las fuerzas y otros parámetros como la masa y la aceleración. Esta expresión es correcta siempre y cuando quede claro que son las fuerzas de interacción porque, como sabemos, es la relación definida en la segunda ley de Newton. Esta relación pertenece al conjunto RC.

Criterios que satisface (RC)

El enunciado se refiere a una relación física en la que se analiza el movimiento de los objetos a partir de una fuerza aplicada (G). Es específica y operacional (H). La negación puede enunciarse como **en las fuerzas de interacción $F \neq ma$** , lo cual tendría sentido físico⁵⁵ con lo que se cumple (I). En cuanto a (J), tenemos que la condición define una relación cuantitativa entre la fuerza y la aceleración para un objeto de masa *m* estableciendo una relación con significado, es descriptora de una

⁵⁴ Viennot (1979) Op. cit.

⁵⁵ De hecho esta negación es una forma de expresar lo que los estudiantes han establecido en otra regla de correspondencia en la que expresan que la velocidad (y no la aceleración) es proporcional a la fuerza aplicada.

situación física posible por lo que define una relación unívoca, no hay traslapamiento con otras condiciones para una fuerza aplicada⁵⁶, la relación establecida por la condición es invariante y desde luego, puede operarse de manera que se aplique a la suma de varias fuerzas (composición de relaciones).

Esta idea previa se designa como rc_8

Es importante además de las ideas presentadas, incluir una regla de correspondencia que indique como varias fuerzas pueden aplicarse a un objeto. Si bien no se tiene una idea previa claramente enunciada al respecto, se puede inferir que la suma de fuerzas es una operación que la mayoría de los estudiantes puede aplicar, por ello, se tomará como una regla de correspondencia adicional. Así, se puede establecer como regla de correspondencia lo siguiente: **Las fuerzas se suman si se encuentran en una misma dirección, y se restan si están en dirección opuesta.** La necesidad de introducir esta regla de correspondencia es debida a que, si no se cuenta con una forma operatoria sobre las fuerzas (concepto central no solo para la Física sino también para los estudiantes), no sería posible describir como los estudiantes llevan a cabo estas operaciones, puesto que la simple operación algebraica de sumar y restar fuerzas no sería suficiente si no se establecen, como se indica en esta regla, las condiciones de direccionalidad para que la suma se pueda llevar a cabo.

Esta regla se designa como rc_9

Como puede notarse, no todas las ideas previas descritas en el análisis bibliográfico precedente aparecen como elementos de los conjuntos CC y RC. Una idea previa que no cumple con los criterios es “son equiparables los conceptos cinemáticos (velocidad, rapidez y aceleración) con la fuerza⁵⁷” porque no cumple con los criterios de precisión de relaciones y por consiguiente de no traslapamiento e invariancia, así como los criterios formales.

Otras ideas previas que no aparecen como elementos de los conjuntos CC y RC y que podrían cumplir con los criterios establecidos, no se tomaron en cuenta porque no constituyen enunciados básicos, esto es, no formarían un conjunto axiomático mínimo y serán deducidos a partir de los elementos ya establecidos como se mostrará más adelante.

3.4.2 Modelos parciales posibles de los estudiantes en Mecánica: Fuerzas y movimiento

Con la aplicación de los criterios a las ideas previas de los alumnos para determinar los elementos que deben pertenecer a CC y RC, se pueden formar los conjuntos que constituyen el núcleo K de los modelos parciales posibles. Para el caso de las ideas previas en mecánica se tiene entonces que el conjunto de conceptos constrictores es:

$$CC := \{cc_1, cc_2, cc_3, cc_4, cc_5, cc_6, cc_7\}$$

⁵⁶ Sin embargo hay que hacer notar que esta operación no es clara cuando no se defina con precisión fuerza de interacción, por ejemplo, en otro tipo de fuerzas a las que los estudiantes no interpreten como interacción

⁵⁷ Halloun y Hestenes (1985) Op. cit.

donde

- cc₁ = Las magnitudes físicas son propiedades de los objetos.
- cc₂ = La acción y la reacción actúan sobre el mismo objeto.
- cc₃ = Los objetos al ser empujados adquieren fuerza o ímpetu.
- cc₄ = La fuerza centrífuga aparece en todo movimiento circular.
- cc₅ = En el vacío el ímpetu no se disipa.
- cc₆ = Todo movimiento es causado por una fuerza.
- cc₇ = En el vacío no hay gravedad.

Por su parte el conjunto de reglas de correspondencia RC es:

$$RC := \{rc_1, rc_2, rc_3, rc_4, rc_5, rc_6, rc_7, rc_8, rc_9\}$$

donde

- rc₁ = La dirección del movimiento es la de la fuerza aplicada.
- rc₂ = La velocidad de un objeto es directamente proporcional a la fuerza aplicada.
- rc₃ = El ímpetu se disipa por fuerzas de fricción.
- rc₄ = El cambio de velocidad es la aceleración ($v = a$).
- rc₅ = Las coordenadas de velocidad y aceleración de los objetos en movimiento no son independientes en ningún caso.
- rc₆ = Si dos movimientos coinciden espacialmente en un instante entonces tienen la misma velocidad.
- rc₇ = Cuando un objeto sale de una trayectoria circular, continuará con esta trayectoria.
- rc₈ = Las fuerzas de interacción aplicadas a una masa siguen la expresión $F = ma$.
- rc₉ = Las fuerzas se suman si se encuentran en una misma dirección, y se restan si están en dirección opuesta.

Con estos elementos queda entonces definido el Modelo Parcial Posible sobre mecánica en cuanto a fuerzas y movimiento que designaremos como M_{ppM} (modelo parcial posible de mecánica).

Queda ahora por mostrar cómo con los conceptos constrictores y las reglas de correspondencia seleccionadas, es posible hacer inferencias sobre otras ideas y/o elaboraciones de los estudiantes acerca de procesos relativos a las fuerzas y el movimiento. El primer paso será mostrar que algunas de las ideas previas encontradas en la literatura son deducibles a partir de M_{ppM} .

Por ejemplo, la idea previa “el movimiento con velocidad constante implica una fuerza constante”, puede ser deducida de la operación:

$$CC \times RC: = cc_6 \times rc_2 \quad f_1$$

esto es:

Todo movimiento es causado por una fuerza (cc_6); la velocidad de un objeto es directamente proporcional a la fuerza aplicada (rc_2) una fuerza constante produce un movimiento con velocidad constante (f_1)

Donde f_1 es “una fuerza constante produce un movimiento con velocidad constante” que es equivalente a que el movimiento con velocidad constante implica una fuerza constante.

En este caso el elemento f_1 I siendo I A(K), como previamente se ha establecido.

Otro ejemplo lo podemos tomar de las ideas previas reportadas por McDermott⁵⁸ en donde los estudiantes establecen que “la fuerza gravitacional es proporcional a la velocidad y que por lo tanto que la velocidad de caída es determinada por el peso del objeto”. Este enunciado puede interpretarse como sigue: si se toma como peso la fuerza de atracción gravitacional sobre un objeto, entonces se pueden aplicar los mismos elementos que en el ejemplo anterior, esto es:

$$CC \times RC: = cc_6 \times rc_2 \quad f_2$$

Todo movimiento es causado por una fuerza (cc_6); la velocidad de un objeto es directamente proporcional a la fuerza aplicada (rc_2) la fuerza gravitacional sobre un objeto (peso) produce un movimiento con velocidad proporcional al peso. En este caso, $f_2 = el \text{ peso produce una velocidad de caída proporcional a su valor.}$

Otra idea previa que aparece con frecuencia es que, al lanzar un objeto hacia arriba, la fuerza de gravedad contrarresta al ímpetu proporcionado al ser lanzado. Esto puede interpretarse con el modelo M_{ppM} como sigue:

Los objetos al ser empujados (lanzados) adquieren una fuerza o ímpetu; las fuerzas en sentido opuesto se restan entonces, la fuerza de gravedad contrarresta el ímpetu del objeto lanzado. Esto en símbolos es:

$$cc_3 \times rc_9 \quad f_3 \text{ donde } f_3 \text{ es “la fuerza de gravedad contrarresta el ímpetu”}.$$

Veamos otros ejemplos de ideas previas que pueden deducirse.

1. *Idea previa* “la velocidad es algo intrínseco al objeto y no depende del marco de referencia”. Esta idea previa es una inferencia directa del concepto constrictor $cc_1 \quad f_4$, esto es, las magnitudes físicas son propiedades de los objetos, entonces la velocidad es algo intrínseco al objeto y no depende del observador (marcos de referencia).

⁵⁸ McDermott (1985) Op. cit.

2. *Idea previa* “la aceleración es debida a una fuerza en aumento”. Esta idea previa puede inferirse a partir de un concepto constrictor y dos reglas de correspondencia. La inferencia es:

$$cc_6 \text{ X } (rc_2 \text{ } rc_4) \text{ } f_5$$

Estos símbolos se traducen como:

Todo movimiento es causado por una fuerza (cc_6); la velocidad es directamente proporcional a la fuerza (rc_2) y la aceleración es el cambio de velocidad (rc_4), entonces si la fuerza cambia constantemente, la velocidad cambia constantemente y el objeto se acelera (f_5).

Para mostrar el funcionamiento del modelo con ideas de los estudiantes, tomaremos ahora ejemplos extraídos de citas textuales de los razonamientos de los estudiantes que aparecen en algunos de los trabajos consultados.

El siguiente diálogo aparece en el trabajo de Fischbein, Stavy & Ma-Naim⁵⁹.

Sujeto: Después de ser empujada por el resorte, la caja continúa su movimiento y se detendrá gradualmente.

Inv: ¿Por qué la caja continúa su movimiento?

Sujeto: Porque el resorte la ha empujado y le ha dado un ímpetu

Inv: ¿Qué es ímpetu?

Sujeto: Ímpetu... el objeto puede continuar su movimiento porque no hay fuerza que lo empuje. Yo mismo no entiendo que es

Inv: Y si no hay fricción

Sujeto: La distancia será muy larga, pero la caja finalmente se detendrá.

Este razonamiento puede ser expresado en términos de M_{ppM} como sigue:

$$(cc_6 \text{ } cc_3) \text{ X } rc_3 \text{ } f_6 \text{ } \text{obs.}$$

que se traduce como:

Todo movimiento es causado por una fuerza (cc_6) y un objeto (la caja) al ser empujado adquiere ímpetu (cc_3); el ímpetu no se disipa con la fricción (rc_3), entonces, el objeto (caja) continúa su movimiento (f_6) pero finalmente se detendrá (observacional).

Como puede notarse, se puede construir la inferencia del estudiante más un factor observacional que es que, para él, todos los objetos finalmente se detienen por sí mismos.

⁵⁹ Fischbein, Stavy & Ma-Naim (1989) Op. cit.

Esta última idea no aparece como concepto constrictor o regla de correspondencia porque es particular de este alumno.

Veamos otro argumento proporcionado por los mismos autores y sobre el mismo problema.

Inv: ¿Qué le sucede a la caja después de que ha sido empujada por el resorte?

Sujeto: Depende de su masa

Inv: Supongamos que no hay fricción

Sujeto: Si no hay fricción, continuará su movimiento hasta que una fuerza lo detenga

En términos del modelo esto es:

$cc_3 \text{ X } (rc_9 \text{ } rc_3) \text{ } f_7$

Los objetos (la caja) al ser empujados adquieren fuerza o ímpetu (cc_3); la fuerzas se restan si son opuestas (rc_9) y el ímpetu se disipa por la fricción (rc_3) si no hay fricción, el objeto no se detiene a menos que una fuerza lo detenga (f_7)

Tomemos ahora algunos ejemplos de Halloun & Hestenes⁶⁰ sobre diversos problemas.

Sujeto: No hay fuerza cuando se sostiene algo con la mano, no hay fuerza sobre la bola... esto es diferente. La bola quiere caer, pero la tabla sólo la sostiene...

Este razonamiento no es directo, pero puede expresarse como:

$(cc_6) \text{ X } rc_1 \text{ } f_8$

Donde la negación antes del paréntesis se interpreta como que no se cumple la condición para cc_6 , esto es, si no hay movimiento no hay fuerza⁶¹ que es directamente la conclusión de que un objeto sostenido no tiene movimiento y, por lo tanto, no se ejerce fuerza para que permanezca en ese estado, esto es no se mueve en la dirección vertical.

Otro ejemplo sencillo es el siguiente:

Sujeto: Puesto que ellos se juntan (dos móviles)... ellos se juntan durante cierto tiempo, no importando cuan pequeño sea... durante ese periodo ellos tienen la misma posición; ellos tienen la misma velocidad, de otra manera ¿cómo podrían juntarse?

Esta es una inferencia directa de una regla de correspondencia, esto es

⁶⁰ Halloun & Hestenes (1985) Op. cit.

⁶¹ Nótese que la negación antes del paréntesis, no es la negación de la oración, indica que no se cumplen las condiciones del enunciado.

rc₆ f₉

En cuanto al movimiento en dos dimensiones (objeto lanzado horizontalmente, el estudiante selecciona una gráfica incorrecta) se tiene el siguiente ejemplo:

Estudiante: "La pelota sale primero en línea recta debido a la fuerza que lo empuja... Esta fuerza es constante... Oh no, esto no puede ser porque comienza a ser más lento (a lo largo de la horizontal). La fuerza entonces debe decrecer hasta aquí (cuando comienza a curvarse), porque la gravedad actúa hacia abajo sobre ella... desde aquí (la parte vertical de la trayectoria) no hay más fuerza... solo la gravedad lo jala hacia abajo"

Este razonamiento tiene varias partes y puede simbolizarse como sigue:

- a) cc₆ (cc₃ X rc₁) f₁₀ (se mueve en línea recta)
- b) rc₂ X rc₄ f₁₁ (la fuerza no es constante)
- c) rc₃ X rc₅ f₁₂ la gravedad actúa cuando el empuje cesa

En términos de oraciones se puede expresar como:

- a) todo movimiento es causado por una fuerza (cc₆) y al ser empujados adquieren un ímpetu (cc₃); la dirección del movimiento es en la dirección de la fuerza (rc₁), entonces, el objeto se moverá en la línea recta (dirección en la que es empujado) (f₁₀)
- b) la velocidad de un objeto es proporcional a la fuerza aplicada (rc₂); el objeto no tiene una velocidad constante (rc₄), entonces su fuerza no es constante (f₁₁).
- c) el ímpetu se disipa por fricción (rc₃); la velocidad horizontal decrece y se mueve hacia abajo - no independencia de velocidades y aceleraciones - (rc₅) entonces, la gravedad actúa produciendo el movimiento hacia abajo hasta que el empuje (ímpetu) cesa (f₁₂).

En este ejemplo podemos ver un razonamiento más complejo que requiere una construcción por partes. Cada conclusión queda en términos de un observable fenomenológico, es decir una aplicación sobre el núcleo A(K), que es deducible de los elementos del núcleo y aunque, es parte necesaria del razonamiento, no es, sin embargo, indispensable que se introduzcan en las premisas de la inferencia y el razonamiento puede hacerse de forma directa como se muestra a continuación:

(cc₆ cc₃)X (rc₁ rc₂ rc₄ rc₃ rc₅) f₁₀ f₁₁ f₁₂

Por último se mostrará un caso que analizan McCloskey⁶² y Clement⁶³ sobre un diálogo de Galileo que aparece en De Motuo. El texto es el siguiente:

“El cuerpo se mueve hacia arriba, porque la una fuerza impresa es más grande que la resistencia del peso. Pero la fuerza, como se ha mostrado, es continuamente debilitada; y que finalmente disminuye hasta que no sobrepasa el peso del cuerpo y no empuja al cuerpo más allá de ese punto... Como la fuerza impresa continúa decreciendo el peso del cuerpo comienza a ser predominante y consecuentemente, el cuerpo comienza a caer... Esto es lo que yo considero la causa verdadera de la aceleración del movimiento”

Como puede apreciarse en el texto de Galileo aparecen ideas que son coincidentes con las expresadas por los estudiantes y el razonamiento de la caída de un cuerpo cuando ha sido lanzado hacia arriba, puede ser descrito en términos del modelo M_{ppM} como sigue: $(cc_6 \text{ } cc_3) X (rc_9 \text{ } rc_1 \text{ } rc_4) f_{13}$ (la fuerza impresa va disminuyendo y el objeto se acelera hacia abajo)

Esto en oraciones se puede expresar de la siguiente forma:

Todo movimiento es causado por una fuerza (cc_6) y un objeto empujado adquiere una fuerza o ímpetu (cc_3); las fuerzas en direcciones opuestas se restan (peso e ímpetu o fuerza impresa) (rc_9) y la dirección del movimiento es la de la fuerza resultante (rc_1) y el objeto el aumento de velocidad es la aceleración (rc_4), entonces el objeto se mueve hacia abajo en forma acelerada con velocidad que cambia (f_{13}).

Como podrá apreciarse de los ejemplos mostrados, a partir del núcleo K, se ha podido deducir un conjunto I de descripciones fenomenológicas que los sujetos explican en función de sus concepciones previas. Estas construcciones $A(K)$ junto con K proveen de un modelo para interpretar los procesos mecánicos en términos de los elementos conceptuales e inferenciales de los estudiantes.

Lo anterior muestra que este modelo parcial posible es un modelo que los estudiantes usan como un proceso alternativo a la descripción formal, pero que, sin embargo, no presenta el nivel de generalidad y suficiencia requerido que sí tiene el modelo escolar y el formal de la mecánica. Esto abre dos posibilidades importantes. Por un lado, la de inferir posibles interpretaciones de los estudiantes ante acciones de enseñanza propuestas y por el otro, la de analizar como veremos en el capítulo siguiente, los procesos de cambio conceptual para pasar de los modelos parciales posibles a los modelos potenciales posibles.

Es importante señalar que el modelo construido para representar las concepciones y posibilidades de inferencia de los estudiantes en el caso de las fuerzas y el movimiento, no es completo, que aún hay muchas situaciones que no han sido cubiertas - como son los casos del trabajo y la energía mecánica y el movimiento de los cuerpos rígidos - y que podrían ampliarse con otras investigaciones sobre ideas previas en otros campos. Pero, en todo caso,

⁶² McCloskey (1983) Op.cit.

⁶³ Clement (1983) Op. cit.

el núcleo no sufriría más que adiciones tanto en los conceptos constrictores como en las reglas de correspondencia. Esto hace especialmente fructífero este semi - formalismo, porque le permiten ampliarse sin perder su estructura ni sus elementos anteriores. De estas forma pueden como apuntan Stegmüller⁶⁴ y Moulines⁶⁵ construirse redes de modelos que abarquen una amplia fenomenología.

3.4.3 Modelos Parciales Posibles de los estudiantes sobre presión y flotación

Ahora se analiza el caso de los fluidos. Del conjunto de ideas previas mostrado previamente (páginas 114 y 115) es posible ver que las ideas de la presión y la flotación en líquidos, tienen elementos diferentes que las ideas de presión y flotación en gases, por ello, se propone construir dos modelos parciales posibles uno para gases M_{ppG} y otro para líquidos M_{ppL} , como ha sido mostrado por Flores y Gallegos⁶⁶.

Como se procedió para el caso de las ideas previas en mecánica, se analizará cada una de las ideas previas para presión y flotación en cada modelo.

3.4.3.1 Modelo parcial posible sobre presión y flotación en gases. (M_{ppG})

Idea previa

“El comportamiento de los objetos depende de su sustancia”. Esta idea previa expresa una condición general para las sustancias, no es derivable directamente de una situación fenomenológica, por lo que se considera para ser un concepto constrictor.

Criterios que satisface (CC)

Esta idea es aplicable a toda situación física por lo que cumple con (A). Es una concepción que tiene una función axiomática por lo que cumple con (B). Es una idea general y abstracta puesto que no tiene ningún referente fenomenológico inmediato (C). Su negación **no todo el comportamiento de los objetos depende de su sustancia**, tiene significado físico y por tanto es interpretable por algún operador t cumpliendo entonces con (E). En cuanto a los elementos de (F) cumple con presentar plausibilidad de significado, con ser una construcción abstracta, ser una afirmación de carácter general, ser posible de relacionar con otras ideas para obtener una inferencia (complementariedad), no presentar traslapamiento por ser preciso, poder cumplir con ser un elemento base para algunas explicaciones (causalidad) y no cambiar su significado por condiciones específicas como el tipo de sustancia (invariancia).

⁶⁴ W. Stegmüller (1979) Op.cit.

⁶⁵ U, Moulines (198) Op. cit.

⁶⁶ Flores F & Gallegos L (1998) Partial Possible Models: An Approach to Interpret Students' Physical Representation. *Science Education* 82. Pp 15-29

Entonces esta idea previa puede designarse como cc_1 .

Idea previa

“Si las características del objeto no cambian, su comportamiento es invariable”. Esta idea presenta la creencia que las transformaciones de todo tipo en el comportamiento de los fluidos podrán cambiar solo si la sustancia sufre transformaciones. Esta idea puede tener bases en algunas observaciones como mezclas o reacciones químicas. Sin embargo, no parece reconocer que existen otros tipos de cambios en los que las sustancias no se modifican, pero que sus manifestaciones pueden ser muy diferentes, por ejemplo, los cambios de fase o estado. Esta idea si bien pudiera tener un origen fenomenológico, no establece una relación específica sino general y en cierto sentido abstracta, por lo que se considerará para ser elemento de CC.

Criterios que satisface (CC)

Esta idea es aplicable a toda situación física por lo que cumple con (A). Es una concepción que tiene una función axiomática por lo que cumple con (B). Es una idea general pero no abstracta por lo que no cumple en su totalidad con (C). Su negación **si las características del objeto cambian, su comportamiento es variable**, tiene significado físico y por tanto es interpretable por algún operador t cumpliendo entonces con (E). En cuanto a los elementos de (F) cumple con plausibilidad de significado, no cumple con ser una construcción abstracta, es una afirmación de carácter general, es posible de relacionar con otras ideas para obtener una inferencia (complementariedad), el enunciado puede presentar traslapamiento por no ser preciso, puede cumplir con ser un elemento base para algunas explicaciones (causalidad) y no cambia su significado por condiciones específicas como el tipo de sustancia (invariancia).

Como puede apreciarse, esta idea cumple con la mayoría de los criterios con excepción de que tiene un referente fenomenológico y por tanto no es una abstracción en el sentido de ser correspondiente con un elemento axiomático, sin embargo, cumple con esa función al no ser un elemento meramente descriptivo y relacional, por tanto, puede (con las reservas del caso) ser considerado como elemento de CC, y se le asigna el símbolo cc_2 .

Idea previa

“La presión es una fuerza”. Esta afirmación es de carácter universal e identifica la acción fuerza con un concepto que es variable de estado (no elemento de acción), y es equivalente a la idea de que en los fluidos exista una especie de ímpetu interno que se manifiesta sobre otros objetos como un contenedor o cualquier otro objeto. Por ello, es clasificable como CC

Criterios que satisface (CC)

Esta idea es aplicable a toda situación física por lo que cumple con (A). Es una concepción que tiene una función axiomática por lo que cumple con (B). Es una idea general y abstracta que asocia al fluido una propiedad interna adquirida o no (C). Su negación **la presión no es una fuerza**, no sólo tiene significado físico, sino que es un enunciado correcto siempre y cuando, se cuente con una concepción clara del concepto de presión. Este enunciado es interpretable por algún operador t cumpliendo entonces con (E). En cuanto a los elementos de (F) cumple con plausibilidad de significado, con ser una construcción abstracta, con ser una afirmación de carácter general, es posible de relacionar con otras ideas para obtener una inferencia (complementariedad), el enunciado no presenta traslapamiento por ser preciso, cumple con ser un elemento base para todas las explicaciones, que requieran de precisar la acción que lleva de un estado a otro a un fluido por lo que es un elemento causal, no cambia su significado por condiciones específicas como el tipo de fuerza (invariancia).

Esta idea previa cumple con todos los criterios y se designa como cc₃.

Idea previa

“La presión actúa en todas direcciones”. Esta idea previa es muy semejante a un primitivo fenomenológico en términos de diSessa⁶⁷ por ser un enunciado que se intuye de la experiencia, pero que no es una experiencia en sí misma, esto es, el sujeto no puede reconocer la presión en todas direcciones más que en casos específicos ligados a sensaciones pero no a observaciones definitorias. Por ello se le considera para ser elemento de CC.

Criterios que satisface (CC)

Esta idea es aplicable a toda situación física por lo que cumple con (A). Es una concepción que tiene una función axiomática por lo que cumple con (B). Es una idea general y aunque no pueda considerarse abstracta en sentido restringido, puesto que tiene algún referente fenomenológico, si bien ligado a las sensaciones (c). Su negación **la presión no actúa en todas direcciones**, tiene significado físico y por tanto es interpretable por algún operador t por lo que cumple con (E). En cuanto a los elementos de (F) cumple con plausibilidad de significado, no cumple con ser una construcción abstracta, es una afirmación de carácter general, es posible de relacionar con otras ideas para obtener una inferencia (complementariedad), el enunciado no presenta traslapamiento puesto que es preciso, puede cumplir con ser un elemento base para algunas explicaciones (causalidad) y no cambia su significado por condiciones específicas (invariancia).

Esta idea previa se designa como cc₃.

Idea previa

⁶⁷ diSessa (1993) Op. cit.

“En el vacío no hay gravedad”. Esta idea fue analizada en el caso de la mecánica y por tanto no se repetirán aquí los criterios que cumple (véase las páginas 87-88)

En este modelo se designa como cc₄.

Idea previa

“En el vacío un objeto no cambia su peso”. Este enunciado que en presencia de un campo gravitacional es correcta, no es sin embargo, derivable de la experiencia, es una construcción abstracta. Posiblemente elaborada a partir de una idea más general sobre la conservación de la masa y, aún así, esta generalización es incorrecta puesto que masa y peso son entidades físicas diferentes. Por su naturaleza abstracta y general, se considera para ser elemento de CC.

Criterios que satisface (CC)

Esta idea es aplicable a toda situación física por tanto cumple con (A). Es una concepción que tiene una función axiomática así que cumple con (B). Es una idea general y abstracta puesto que no tiene ningún referente fenomenológico (C). Su negación **en el vacío los objetos cambian su peso**, es plausible de tener significado físico, por lo que es interpretable por algún operador t cumpliendo entonces con (E). En cuanto a los elementos de (F) cumple con plausibilidad de significado, con ser una construcción abstracta, que es una afirmación de carácter general, es posible de relacionar con otras ideas para obtener una inferencia (complementariedad), el enunciado no presenta traslapamiento, puede cumplir con ser un elemento causal y no cambia su significado por condiciones específicas (invariancia).

Esta idea previa se designa como cc₅.

Idea previa

“En el vacío, la presión tiende a jalar a los objetos”. Este enunciado es en apariencia una idea abstracta, sin embargo, está referida a una experiencia común que es succionar líquidos con un popote, experiencia en la que los estudiantes interpretan la succión como hacer vacío. Por ello es una condición que establece una acción y se considera entonces para ser elemento de RC.

Criterios que satisface (RC)

El enunciado es descriptor de una situación física de manera clara (G). La condición para la acción de la presión esta claramente definidas (H). La negación **en el vacío la presión no jala a los objetos** tiene sentido físico, de hecho, en el vacío no hay presión puesto que esta es una variable de estado de los fluidos, por lo cual ambos enunciados son posibles de interpretación bajo algún operador s y cumplen con (I). En cuanto a (J), la relación presenta significado claro (relación con significado), cumple con ser relación unívoca, no presenta confusión al aplicarse a las situaciones físicas (no traslapamiento), es una afirmación general que no cambia de significado

(invariancia) y es susceptible de establecer otras relaciones (composición de relaciones).

Esta idea previa se designa como rc_1 .

Idea previa

“La presión tiene diferente magnitud en cada dirección”. Este enunciado que en principio podría parecer equivalente al de la presión actúa en todas direcciones por lo que respecta a su carácter de poder ser clasificado como CC, no está, sin embargo, definiendo como en el caso anterior la acción, sino el establecimiento de una magnitud de la presión, por lo que es más una regla de correspondencia que un concepto constrictor.

Criterios que satisface (RC)

El enunciado establece una situación de asignación de magnitud para determinada condición física aunque no de manera operativa, sin embargo, cumple con (G). La condición queda definida (H). La negación **la presión tiene la misma magnitud en cada dirección** tiene sentido físico claro y correcto por lo cual, ambos enunciados son posibles de interpretación bajo algún operador s por lo que cumplen con (I). Por lo que respecta a (J), la relación unívoca presenta significado claro (relacionamiento con significado), cumple con ser relación unívoca, no presenta confusión al aplicarse a las situaciones físicas (no traslapamiento), es una afirmación general que no cambia de significado (invariancia) y es susceptible de establecer otras relaciones (composición de relaciones).

Este enunciado se designa como rc_2 .

Idea previa

“El aire atrapado ejerce presión”. Esta idea expresa una condición para que la presión se manifieste por tanto, es una regla de correspondencia.

Criterios que satisface (RC)

Esta idea expresa una condición para una situación física por lo que cumple con (G). La condición queda claramente definida por lo que satisface (H). La negación **el aire atrapado no ejerce presión** tiene sentido físico posible, por lo cual ambos enunciados son susceptibles de interpretación bajo algún operador s por lo que cumplen con (I). En cuanto a (J), la condición a presenta significado claro (relacionamiento con significado), cumple con ser relación unívoca, no presenta confusión al aplicarse a las situaciones físicas (no traslapamiento), es una afirmación general que no cambia de significado (invariancia) y es susceptible de establecer otras relaciones (composición de relaciones).

Esta idea previa se designa como rc_3 .

Idea previa

“La fuerza o presión es transmitida por el aire”. Este enunciado establece un medio para la transmisión de la presión, por lo que puede definir una condición si bien no necesaria, sí suficiente por lo que se considera para pertenecer a RC

Criterios que satisface (RC)

La condición se refiere a una situación física en la que se manifiesta la transmisión de presión por lo que es una condición para un proceso físico cumpliendo así con (G). Es específica pero no operacional (H). La negación puede enunciarse **la fuerza o presión no se transmite en el aire** lo cual no corresponde a la realidad, pero es plausible en el sentido de que no considera a la presión como un ente que pasa de un lugar a otro con lo que se cumple (I). En cuanto a (J), tenemos que la condición define una condición para un proceso, es descriptora de una situación física posible por lo que define una relación unívoca, no hay traslapamiento con otras condiciones para la fuerza o presión que se transmite, la relación establecida por la condición es invariante y puede componerse con otras relaciones.

Esta idea previa se designa como rc₄.

Idea previa

“El aire presiona a los objetos hacia arriba” Esta idea previa establece una dirección privilegiada para la presión en los gases, indicando que solo ejercen presión (que debería sustituirse por empuje) hacia arriba. Esta idea, con mucha probabilidad, está determinada por observaciones cotidianas en las cuales objetos ligeros como los globos suben.

Criterios que satisface (RC)

El enunciado se refiere a una situación de movimiento debido a la presencia de un agente (presión o fuerza) por lo que cumple con (G). Define una dirección específica por lo que satisface (H). La negación **el aire no presiona a los objetos hacia arriba** tiene sentido físico - de hecho correcto - si se considera que la presión se ejerce en todas direcciones⁶⁸ por lo que ambos enunciados son interpretables bajo un operador *s* con lo que se cumple (I). En cuanto a (J), cumple con ser una relación con significado, ser una relación unívoca, no se confunde con otra relación, es invariante y puede relacionarse con otras reglas de correspondencia.

Esta idea previa se designa entonces como rc₅.

⁶⁸ Hay que hacer notar que si bien la presión se ejerce en todas direcciones, existe una diferencia de presión en un objeto sumergido en un fluido - gas o líquido - debido a su profundidad y que esta diferencia de presión en la dirección vertical genera un empuje ascendente que si el objeto es ligero lo hará subir. Por ello aunque la expresión de los estudiantes es físicamente incorrecta tiene sentido cuando se toma en cuenta que, a lo que se refieren, no es a la presión sino a la fuerza de empuje.

Idea previa

“El aire atrapado tiende a empujar a los objetos”. Esta idea previa es equivalente a la clasificada como rc_3 , por lo que satisface de la misma forma los criterios para pertenecer a RC (véase página 148)

Esta idea previa se clasifica entonces como rc_6 .

Idea previa

“La presión sobre los objetos es más grande en objetos pesados”. Esta es una relación de comparación entre magnitudes que no tiene fundamento claro en la experiencia, pero es el resultado de una inferencia directa. No es una noción abstracta por lo que se tomará como elemento del conjunto RC.

Criterios que satisface (RC)

La condición se refiere a una situación física en la que se manifiesta la dependencia de una característica como la presión, de otra variable de un objeto como el peso, por medio de una relación "mayor que" por lo que cumple con (G). Es un enunciado específico pero no operacional (H). La negación puede enunciarse **la presión sobre los objetos es la misma en objetos pesados** lo cual se puede considerar una idea correcta en el sentido de que la presión de un objeto dentro de un fluido no depende del peso de ese objeto, por lo tanto, se considera interpretable por algún operador s con lo que cumple con (I). Por lo que respecta a (J), tenemos que la expresión define una condición para un proceso, es descriptora de una situación física posible y define una relación unívoca, no hay traslapamiento con otras condiciones acerca de la presión sobre los objetos, la relación establecida por la condición es invariante y puede componerse con otras relaciones.

Este enunciado se designa como rc_7 .

Con los elementos clasificados para CC y RC se tienen entonces los conjuntos que forman el núcleo K para el modelo parcial posible para los gases. Así:

$$CC := \{cc_1, cc_2, cc_3, cc_4, cc_5, cc_6\}$$

donde

cc_1 = El comportamiento de los objetos depende de su sustancia.

cc_2 = Si las características del objeto no cambian, su comportamiento es invariable.

cc_3 = La presión es una fuerza.

cc_4 = La presión actúa en todas direcciones.

cc_5 = En el vacío no hay gravedad.

cc_6 = En el vacío el peso de los objetos no cambia.

Por su parte el conjunto RC es:

$$RC := \{rc_1, rc_2, rc_3, rc_4, rc_5, rc_6, rc_7\}$$

donde

rc_1 = En el vacío la presión jala a los objetos.

rc_2 = La presión tiene diferente magnitud en cada dirección.

rc_3 = El aire atrapado ejerce presión.

rc_4 = La fuerza o presión se transmite en el aire.

rc_5 = El aire presiona a los objetos hacia arriba.

rc_6 = El aire atrapado empuja a los objetos.

rc_7 = La presión sobre los objetos es más grande en objetos pesados.

En este modelo parcial posible para los gases M_{ppG} puede notarse que la experiencia de los sujetos es muy limitada porque las reglas de correspondencia son referidas a pocos procesos ligados a la vida cotidiana.

Ahora se mostrará con expresiones extraídas de las respuestas que elaboraron los estudiantes en las justificaciones y en las preguntas abiertas del estudio citado de Flores et al⁶⁹.

El primer ejemplo es la respuesta que muchos estudiantes dieron a la pregunta “*Cómo es que un dardo se mantiene unido a un vidrio*”. Principalmente se obtuvieron dos respuestas (1) “*el aire atrapado mantiene unido el dardo al vidrio*” que podemos designar como f_1 y (2) “*el vacío mantiene unido el dardo al vidrio*” que llamaremos f_2 . Para el primer caso consideraremos que la respuesta puede construirse como:

$$cc_3 \times rc_3 \quad f_1$$

En oraciones esto expresa como: La presión es una fuerza (cc_3); el aire atrapado jala (rc_3), entonces, el dardo se queda unido al vidrio.

Para el caso dos se tiene

$$cc_3 \times rc_1 \quad f_2$$

En enunciados se expresa como: La presión es una fuerza (cc_3); el vacío jala los objetos (rc_1), entonces el dardo se mantiene unido al vidrio.

En este modelo, los elementos para describir y explicar la flotación son muy escasos y por tanto sus posibilidades inferenciales también, por ello, se encuentran sólo inferencias directas en las que participa un elemento, sea concepto constrictor o regla de correspondencia, esto podemos simbolizarlo como $CC \quad f$ o $RC \quad f$. Por ejemplo ante la

⁶⁹ Flores et al (1993) Op. cit.

pregunta ¿qué ocurre con un globo (de paredes inelásticas) inflado con helio en el vacío, sube, baja o se queda estático? Se obtuvieron respuestas como:

“en el vacío el globo de helio no tiene peso y permanece estático”

que puede expresarse simplemente como

cc₅ f₃

en el vacío no hay gravedad, los objetos no pesan (cc₅), entonces, se queda estacionario (f₃)

Otra respuesta es:

“en ausencia de aire no hay presión ejercida sobre el globo que lo haga subir y entonces permanece estático”

Como en el caso anterior, no hay suficientes argumentos y la inferencia se obtiene de manera directa de una regla de correspondencia hacia el enunciado fenomenológico. Esto se expresa como:

(rc₅) f₄

En este caso, la negación implica que no se cumple la condición por lo que se puede expresar como; no hay aire, entonces el objeto no es empujado hacia arriba ((rc₅)), entonces, permanece estático (f₄).

3.4.3.2 Modelo parcial posible de los estudiantes sobre presión y flotación en líquidos. (M_{ppL})

Como en el caso anterior, en este modelo se toman en cuenta aquellas ideas previas que tienen que ver con características generales de la materia o con la naturaleza de la presión. Por ello se incluyen los siguientes conceptos constrictores del modelo para gases

cc₁ = El comportamiento de los objetos depende de su sustancia.

cc₂ = Si las características del objeto no cambian, su comportamiento es invariable.

cc₃ = La presión es una fuerza.

cc₄ = La presión actúa en todas direcciones.

Adicionalmente se tienen como conceptos constrictores las siguientes ideas previas.

Idea previa

“ El agua presiona los objetos”. Esta idea previa es una generalización de una sensación en el sentido de los primitivos fenomenológicos que se han analizado y,

aunque tiene un referente en la experiencia, es una generalización que funge como axioma por lo que se considera para ser elemento de CC.

Criterios que satisface (CC)

Esta idea es aplicable a toda situación física por tanto cumple con (A). Es una concepción que tiene una función axiomática por tanto cumple con (B). Es una idea general pero que tiene un referente fenomenológico (D). Su negación **el agua no presiona los objetos**, es plausible de tener significado físico, por ejemplo algunos estudiantes establecen que en la superficie no hay empuje,⁷⁰ por lo que es interpretable por algún operador t cumpliendo entonces con (E). En cuanto a los elementos de (F) cumple con plausibilidad de significado, con ser una construcción abstracta, es una afirmación de carácter general, es posible de relacionar con otras ideas para obtener una inferencia (complementariedad), el enunciado no presenta traslapamiento, puede cumplir con ser un elemento causal y no cambia su significado por condiciones específicas (invariancia).

A continuación se presentan las ideas previas que satisfacen los criterios para pertenecer al conjunto RC. Se comienza como en el caso de los conceptos constrictores, por tomar en cuenta los elementos que pueden ser comunes en el modelo parcial de los gases y en el de los líquidos, encontrando que la idea previa “en el vacío tiende a jalar a los objetos” es compartida debido a que con ella se relacionan procesos como la succión de líquidos. Esta idea previa se designará entonces como rc_1 para el modelo M_{ppL} .

Idea previa

“La presión depende de la altura (o profundidad)”. Este enunciado, expresa cómo varía la presión en función de la altura o la profundidad dentro de un fluido, esta relación es de carácter general y por tanto elemento para RC.

Criterios que satisface (RC)

La condición se refiere a una situación física en la que se manifiesta la dependencia de una característica como la presión, de otra variable, en este caso, la profundidad (o altura) por lo que cumple con (G). Es específica y puede hacerse operacional (H). La negación puede enunciarse como, **la presión no depende de la altura (o profundidad)** lo cual no se puede interpretar como una idea correcta, pero es plausible de ser interpretada por algún operador s con lo que cumple con (I). Por lo que respecta a (J), tenemos que define una condición para un proceso, es descriptora de una situación física posible y define una relación unívoca, no hay traslapamiento con otras condiciones para la fuerza o presión sobre los objetos, la relación establecida por la condición es invariante y puede componerse con otras relaciones.

Esta idea se designa como rc_2 .

⁷⁰ Barral (1990) op. cit.

Idea previa

“La presión es debida al peso del líquido”. En esta idea previa se establece una relación correcta en la que la presión se puede determinar en alguna región dada del fluido por el peso del líquido que se encuentra sobre esa región. Es una idea extraída de la experiencia cotidiana en la cual, los sujetos han percibido el peso de los líquidos.

Criterios que satisface (RC)

La condición se refiere a una situación física en la que se manifiesta la dependencia de una característica como la presión de otra variable; el peso del fluido. Esta condición está determinada por una relación de proporcionalidad directa así, cumple con (G). Es específica pero no operacional (H). La negación es, **la presión es independiente del peso del fluido** la cual no se puede interpretar como una idea correcta, pero es plausible si la presión fuese una variable intensiva como la temperatura por lo que es interpretable por un operador s con lo que cumple con (I). Por lo que respecta a (J), tenemos que la condición define una condición general, es descriptora de una situación física posible y define una relación unívoca, no hay traslapamiento con otras condiciones para la presión sobre los objetos, la relación establecida por la condición es invariante y puede componerse con otras relaciones.

Esta idea previa se designa como rc_3 .

Idea previa

“En el agua los objetos pierden peso”. Esta idea previa proviene de la experiencia que tienen muchos sujetos de sentir como en el agua los objetos pesan menos. Desde luego eso no implica que los objetos pierdan peso, sino que, sobre el objeto actúa tanto el peso como la fuerza de flotación.

Criterios que satisface (RC)

La condición se refiere a una situación física en la que se manifiesta la aparente pérdida de peso de un objeto en un fluido, esta idea cumple con (G). Es específica pero no operacional (H). La negación puede enunciarse como: **el peso de los objetos es independiente de que se encuentren en el agua**, el enunciado en esta forma negada es una idea correcta y por lo tanto, interpretable por algún operador s con lo que cumple con (I). Por lo que respecta a (J), tenemos que la condición define una relación entre un medio y los objetos, es descriptora de una situación física bajo la interpretación de los estudiantes y define una relación unívoca, no hay traslapamiento con otras condiciones, la relación establecida por la condición es invariante y puede componerse con otras relaciones.

Este enunciado se designa como rc_4 .

Idea previa

“**Un objeto flota en función de su peso**”. Esta idea es producto de la experiencia cotidiana en la que objetos ligeros flotan en el agua, sin embargo no es la única condición y usualmente los sujetos no toman esto en cuenta.

Criterios que satisface (RC)

Esta idea previa establece una relación entre flotación y peso claramente definida cumpliendo así con (G). Es específica y puede hacerse operacional (H). La negación puede enunciarse como: **la flotación es independiente del peso** lo cual no se puede interpretar como una idea correcta, sin embargo, puede considerarse plausible y por lo tanto interpretable por algún operador s con lo que cumple con (I). Por lo que respecta a (J), define una condición para un proceso, es descriptora de una situación física posible y define una relación unívoca, no hay traslapamiento, la relación establecida por la condición es invariante y puede componerse con otras relaciones.

Esta idea previa se designa como rc_5 .

Las siguientes ideas previas son equivalentes a rc_5 , los criterios que satisfacen lo hacen bajo los mismos argumentos y por ello solo se enunciarán.

rc_6 = Los objetos flotan en función de la geometría de contacto (con el líquido).

rc_7 = Los objetos flotan en función de su volumen.

rc_8 = Los objetos flotan en función de su forma.

Idea previa

“**Un objeto flota cuando se satura del líquido**”. Esta idea previa parece indicar que los objetos porosos requieren, para flotar, de saturarse del mismo líquido para que se igualen las densidades, lo cual no ocurre en realidad. Esto hace poco claro el origen de esta concepción de los estudiantes, sin embargo, no es una representación abstracta y establece una condición específica por lo que se tomará en cuenta para pertenecer a RC y no a CC.

Criterios que satisface (RC)

La condición se refiere a una situación física en la que parece que esta subyacente la idea de igualdad de densidad para que la flotación ocurra, es una situación inteligible por lo que considera que satisface (G). Es específica pero no operacional (H). La negación es, **los objetos no flotan cuando se saturan de líquido** lo cual es una situación plausible y por tanto interpretable por algún operador s con lo que cumple con (I). Por lo que respecta a (J), tenemos que define una condición para el proceso de flotación ocurra, es descriptora de una situación física posible y define una relación unívoca, no hay traslapamiento con otras condiciones para la flotación de los objetos, la relación establecida por la condición es invariante y puede componerse con otras relaciones.

Esta idea previa se designa como rc_9 .

Idea previa

“ **En los objetos que no flotan menos líquido penetra por sus poros**”. Esta idea previa es recíproca de la anterior cc_9 y satisface bajo los mismos juicios los criterios para RC, por lo que no se harán explícitos.

Esta idea previa se clasifica como rc_{10} .

Idea previa

“**La flotación es un equilibrio entre el peso de un objeto y la presión del líquido**”. Este enunciado ofrece una relación muy clara que puede ponerse en términos operables. Si se considera que para los estudiantes la presión es una fuerza, sería una condición verdadera para que la flotación ocurra por lo que constituye un elemento importante en la concepción de los estudiantes con el cual, a pesar de partir de otras ideas previas, pueden elaborar conclusiones que describen satisfactoriamente la flotación en líquidos.

Criterios que satisface (RC)

La condición se refiere a una situación física en la que se manifiesta la relación de equilibrio entre dos fuerzas (considerando la idea de los estudiantes que la presión es una fuerza) como condición necesaria para que un objeto permanezca en reposo, es claro que esta idea cumple con (G). Es específica y se puede expresar en términos operacionales como: Un objeto flota sí $F_{\text{peso}} = p_{\text{líquido}}$ ⁷¹ por lo que cumple completamente con (H). La negación puede enunciarse como: **la flotación ocurre cuando no hay equilibrio entre el peso y la presión del líquido** lo cual es falso pero interpretable físicamente por un operador s con lo que cumple con (I). En cuanto a (J), tenemos que define una condición para un proceso, es descriptora de una situación física posible y define una relación unívoca, no hay traslapamiento con otras condiciones para la fuerza o presión sobre los objetos que flotan y su peso, la relación establecida por la condición es invariante y puede componerse con otras relaciones.

Esta idea previa se designa como rc_{11} .

El modelo parcial posible para los líquidos M_{ppL} queda entonces determinado por los conjuntos:

$$CC := \{cc_1, cc_2, cc_3, cc_4, cc_5\}$$

donde

⁷¹ Aunque esa relación puede presentarse en forma de una ecuación, debe notarse que es incorrecta, puesto que la fuerza y la presión son entidades físicas con diferentes unidades y no son equiparables a menos que se introduzca una constante.

- cc₁ = El comportamiento de los objetos depende de su sustancia.
- cc₂ = Si las características del objeto no cambian, su comportamiento es invariable.
- cc₃ = La presión es una fuerza.
- cc₄ = La presión actúa en todas direcciones.
- cc₅ = El agua presiona a los objetos.

El conjunto de reglas de correspondencia es

$$RC := \{rc_1, rc_2, rc_3, rc_4, rc_5, rc_6, rc_7, rc_8, rc_9, rc_{10}, rc_{11}\}$$

donde

- rc₁ = En el vacío la presión jala a los objetos.
- rc₂ = La presión varía con la altura (o profundidad).
- rc₃ = La presión es debida al peso del líquido.
- rc₄ = En el agua los objetos pierden peso.
- rc₅ = Un objeto flota en función de su peso.
- rc₆ = Un objeto flota en función de su geometría de contacto.
- rc₇ = Un objeto flota en función de su volumen.
- rc₈ = Un objeto flota en función de su forma.
- rc₉ = Un objeto flota cuando se satura de líquido.
- rc₁₀ = En los objetos que no flotan, menos líquido penetra por sus poros.
- rc₁₁ = La flotación es un equilibrio entre el peso del objeto y la presión del líquido.

Un primer aspecto que es conveniente observar es cómo el conjunto CC de este modelo para los líquidos, con excepción de un elemento, es igual que el modelo para los gases. Esto nos indica que la idea de presión y sus manifestaciones son ideas generales en los estudiantes y que el contexto (gases o líquidos) no es un factor determinante. Por el contrario, para los conjuntos RC, sus elementos son muy diferentes por lo que las diferencias de contexto resultan importantes. Esto puede explicarse debido a que los sujetos han tenido más experiencias en líquidos que en gases.

Veamos ahora algunos ejemplos de la aplicación del modelo M_{ppL} a explicaciones que dan los estudiantes ante preguntas de flotación en líquidos. Las explicaciones y los problemas como en el caso anterior, son tomados de la investigación citada con alumnos del bachillerato de la UNAM.

En un reactivo del cuestionario se pregunta a los estudiantes que expliquen por qué en un contenedor cilíndrico que tiene perforaciones a diferentes profundidades, la velocidad de salida de chorros de agua por los orificios es mayor cuando la profundidad de los mismos es mayor. Los estudiantes responden con argumentos como el siguiente:

"... la rapidez de salida de los chorros es debida a la diferencia de presión del líquido a diferentes alturas, entonces en el orificio más bajo, el agua sale con mayor rapidez que en el más alto"

En términos del modelo, este argumento puede ser expresado como:

$$(cc_5 \text{ } cc_3) \times rc_2 \text{ } f_5$$

En enunciados se expresa como: La presión es una fuerza (cc_5) y el agua presiona a los objetos (cc_3); la presión depende de la profundidad (rc_2), entonces, a mayor profundidad mayor la fuerza y mayor la velocidad de salida de los chorros de agua.

Otra respuesta típica es:

“... la presión del agua en el fondo debida a su peso hace que el agua salga más fuerte (rápido) en el orificio inferior”

Este enunciado se puede expresar como.

$$cc_3 \times (rc_2 \text{ } rc_3) \text{ } f_6$$

La presión es una fuerza (cc_3); la presión depende del peso del líquido (rc_2) y de la profundidad (rc_3), entonces en el orificio más bajo sale con mayor fuerza (rapidez) (f_6)

También se presentan inferencias más simples como las mostradas con los gases, baste con mostrar un ejemplo. Ante la pregunta del cuestionario *“Por qué un cilindro de madera que se sumerge lentamente cesa de hundirse hasta cierto nivel”*, la mayoría de los estudiantes responde:

“ porque la estructura de la madera es porosa y cuando los poros se llenan de agua ya no se hunde mas”

Esta inferencia puede expresarse simplemente como:

$$rc_9 \text{ } f_7$$

Esto es, los objetos flotan cuando se saturan de líquido (rc_9) entonces, la madera que es porosa no se hunde cuando se satura de agua (f_7)

3.5 Aplicación de los modelos resultados de entrevistas

Se analizarán, por último, los resultados de las entrevistas de la investigación sobre presión y flotación con alumnos del bachillerato de la UNAM⁷², para poner a prueba la capacidad de los modelos parciales posibles en gases y fluidos, de interpretar razonamientos que los estudiantes llevaron a cabo al ser cuestionados sobre dos situaciones físicas distintas,

⁷² Flores et al (1993). Op. cit.

que no fueron extraídas directamente del cuestionario sobre el que se identificaron las ideas previas.

La primer entrevista es sobre las relaciones entre presión atmosférica, aire atrapado y presión en un líquido. La segunda, es sobre flotación en especial la relación entre la presión y el control sobre un objeto que se hunde o flota.

Primera experiencia, "El tubo en U". Se le proporciona al estudiante un tubo lleno con líquido coloreado que se encuentra hasta cierto nivel. Cuando el tubo se inclina y se tapa uno de sus extremos, el desnivel provocado por la inclinación se mantiene independientemente de cual extremo del tubo en U es el que se haya tapado. Esto se debe al equilibrio entre la presión atmosférica y la presión en el interior del tubo en su parte cerrada.

En la entrevista, primero se le pregunta al estudiante como podría hacer para que el líquido quede desnivelado y como se había logrado. El siguiente paso fue cuestionarlos sobre una posible explicación al hecho de que tapando el tubo por un extremo, el desnivel queda estático. Se toman como ejemplo dos de las respuestas que más se presentaron.

Estudiante 1- *"... el aire ocupa un volumen y ejerce presión, esto no permite que el líquido se mueva..."*

Este argumento puede ser expresado con los elementos de M_{ppG} de la siguiente forma:

$cc_3 \times rc_3 \quad f_8$

En enunciados se puede expresar de la siguiente forma: la presión es una fuerza (cc_3); el aire atrapado ejerce presión entonces, esa fuerza mantiene el líquido en desnivel (f_8).

Estudiante 2- *"... se hizo un vacío así que el aire debe entrar para que empuje al líquido del otro lado... el aire debe entrar y ocupar un espacio y entonces salir del otro lado"*

Este argumento se expresa como:

$(rc_3) \times rc_1 \quad f_9$

Debe notarse que la negación entre paréntesis indica que las condiciones para rc_3 no se cumplen. Por lo que al no haber aire atrapado (rc_3) del modelo de gases), el vacío es el que jala al líquido (rc_1) y entonces, el líquido mantiene su desnivel (f_9).

Con este ejemplo puede notarse cómo argumentos diferentes para una misma situación física, son comunes entre las interpretaciones de los estudiantes, y son descritos por los mismos elementos del modelo correspondiente.

Segunda experiencia "Buzo Cartesiano". El buzo cartesiano es un dispositivo que puede subir o bajar en un líquido. Usualmente es un gotero parcialmente lleno de agua. Cuando se introduce en el líquido flota, el recipiente se sella y al ejercer una fuerza sobre el

recipiente aumenta la presión interna con lo que sube en nivel del agua dentro del gotero y, entonces, el gotero desciende y, al dejar de ejercer la fuerza, la presión interna disminuye, y el agua dentro del gotero regresa a su nivel original y por consiguiente el gotero sube.

El entrevistado se somete a dos situaciones. La primera en una botella de paredes flexibles en la que basta oprimir la botella para obtener que el buzo ascienda o descienda. La segunda es una botella rígida y para lograr que el buzo ascienda o descienda basta con empujar y aflojar el tapón con el que se sella la botella. En ambas situaciones se introduce una pregunta por el investigador en la que se le propone una explicación alternativa sobre la direccionalidad en la que actúa la presión para ver si el alumno entrevistado reconoce contradicciones y es congruente con sus explicaciones. En la entrevista, primero se les preguntaba por la descripción del dispositivo que tenían enfrente y después sobre cómo podrían hacer que el gotero descendiera y ascendiera. Una vez que lograban hacerlo (no siempre se les ocurría y había que inducirles a hacerlo) se les pedía la explicación de por qué ocurría el proceso que observaban. Cuando habían establecido su explicación, se les preguntaba si el proceso era el mismo en la botella flexible que en la rígida y finalmente se introducía la idea contradictoria. A continuación se mostrarán dos ejemplos de las respuestas.

Estudiante *"... cuando presionamos la botella se obtiene... más agua en el gotero... entonces se hace más pesado y el gotero se va al fondo"*

Entrevistador *"Es el mismo proceso en la botella rígida"*

Estudiante *" sí, es el mismo proceso"*

El investigador introduce entonces la hipótesis sobre la direccionalidad de la presión y el estudiante contesta.

Estudiante *"no, no es así, la presión actúa en todas direcciones"*.

Como puede notarse en este caso, hay consistencia en el uso de sus ideas previas como se deduce de la idea de que, el agua ejerce presión y que la flotación es función del peso de los objetos. Sin embargo, no se presenta una relación de equilibrio entre fuerzas para la flotación. La argumentación de este estudiante puede ser expresada por los elementos de M_{ppL} de la siguiente forma:

$(cc_5 \quad cc_4) X (rc_5 \quad rc_{11}) f_{10}$

Que puede expresarse así: El agua presiona los objetos - presiona al gotero y se introduce más agua - (cc_5); porque la presión actúa en todas direcciones (cc_4); los objetos flotan según su peso (rc_5) y si no hay equilibrio (el gotero pesa más) entre ese peso y la presión (rc_{11}) entonces se hunde (f_{10}).

Otro estudiante ofrece la siguiente respuesta.

Estudiante. *“Yo creo que la presión que ejerce el agua lleva a que entre más agua en el gotero y esto hace que se vaya al fondo porque es más pesado”*

Entrevistador *“Ocurre lo mismo con la botella rígida”*

Estudiante *“Sí”*

Sin embargo cuando se introduce la hipótesis sobre la direccionalidad de la presión el estudiante responde:

Estudiante *“... pienso que el otro estudiante tenía razón... la presión se ejerce por arriba y entonces el gotero se hunde”*

El argumento de este estudiante es similar al del anterior por lo que puede representarse por los mismos elementos de M_{ppL} y proceso de inferencia.

$(cc_5 \quad cc_4) X (rc_5 \quad rc_{11}) f_{10}$

Sin embargo, este alumno no sostiene el concepto constrictor cc_4 sobre la direccionalidad de la presión de manera que, su argumento anterior se hace nulo y acepta una hipótesis alternativa negando su descripción fenomenológica. Con ello vemos como la introducción de otro elemento explicativo, en este caso la negación de cc_4 , no parece incomodar al estudiante con la contradicción de su argumento, hecho que ha sido observado y reportado por muchos investigadores⁷³.

Como puede apreciarse de ambas experiencias, los modelos parciales posibles ofrecen una manera consistente de construcción de las inferencias y explicaciones que elaboran los estudiantes con sus ideas previas. Los conjuntos de aplicaciones intencionales I que son obtenidos de aplicaciones sobre K, dan un conjunto de aseveraciones fenomenológicas que constituyen las explicaciones comunes que se encuentran en los estudiantes de diversos niveles escolares. Lo anterior muestra la suficiencia de la estructura propuesta para los modelos parciales posibles así como para los criterios desarrollados para determinar cuándo una idea previa puede ser un concepto constrictor o una regla de correspondencia y cuándo no.

Una vez mostrado como es posible construir modelos parciales posibles de las representaciones físicas de los estudiantes, queda la pregunta sobre las posibles relaciones entre estos modelos parciales posibles y los modelos posibles construidos para representar

⁷³ Resulta ilustrativo mencionar que Inhelder y Piaget, quienes fueron de los primeros en utilizar actividades sobre flotación (en el libro *De la lógica del niño a la lógica del adolescente*) para analizar la formación de estructuras, encontraron que si bien las primeras afirmaciones de los sujetos coinciden con las ideas previas, después de ciertas manipulaciones y sobre todo, de la realización de acciones controladas en las que utilizan sus operaciones formales, en el sentido de inhabilitar ciertas variables, llegan a la relación de densidades por resolución de contradicciones. Sin embargo, las investigaciones posteriores sobre ideas previas, han mostrado que aún en el caso de que esas contradicciones hayan sido resueltas por el uso de la lógica combinatoria, no son construcciones, en el sentido de la formación de conceptos, permanentes y que, por lo tanto, los sujetos regresan a sus nociones iniciales después de cierto tiempo o bien, al aplicarlas a otras situaciones o contextos semejantes.

la Física que se enseña en la escuela. La importancia de estas relaciones - que no son sólo el aspecto estructural puesto que éste de entrada nos provee de una forma de relación - radica en que su conocimiento permitiría, en principio, sugerir posibles mecanismos de transformación de un tipo de modelo a otro y así, inducir un proceso de cambio conceptual o al menos indicar caminos posibles para el mismo en términos de transformación de elementos de CC y RC primero y después de formas de inferencia y estructura de los modelos. Esto será el tema del siguiente capítulo.

Capítulo IV

LOS MODELOS PARCIALES POSIBLES Y EL CAMBIO CONCEPTUAL

4.1 Cambio conceptual su naturaleza y sus implicaciones en el aprendizaje de la Física

A partir del conocimiento de las ideas previas y sus implicaciones en el aprendizaje de los conceptos científicos, los investigadores en este campo se dieron a la tarea de encontrar algún mecanismo que permitiera dar cuenta de cómo lograr que esas ideas previas, que manifiestan alta resistencia al cambio por los medios tradicionales de enseñanza, se modificaran. Algunos intentos retomaron aspectos de la psicología genética y desarrollaron esquemas y procesos de aprendizaje. Por ejemplo el aprendizaje generativo de M. Wittrock¹, y otros desarrollaron procesos sobre la psicología cognoscitiva como D. Ausubel, Novak y Hanesian² (1978) y Novak³ (1985).

Sin embargo, estos modelos de carácter general, no dan cuenta de los procesos específicos sobre la transformación de las nociones o ideas previas de los sujetos. Ante esta situación comenzaron a desarrollarse modelos bajo la noción de cambio conceptual, esto es, transformar la noción de aprendizaje. Aún aquella relativa a procesos de construcción del conocimiento como la estructuración y la de significación por la de cambio. Una de las primeras preguntas a las que se intentó dar respuesta es ¿qué es lo que debe cambiar?

Las primeras respuestas fueron simples. Por ejemplo, cambio de las ideas previas. Como veremos más adelante, esta idea de cambio resulta insuficiente, y actualmente, el cambio conceptual implica también el cambio de estructuras, de significados y de representaciones.

La idea de cambio conceptual está asociada a la de constructivismo, y por ello, en la mayoría de las propuestas de cambio conceptual, se parte de la idea de que es el sujeto, con su acción cognoscitiva, el que llevará a cabo esa transformación conceptual. Sin embargo, que el cambio conceptual se asuma como una expresión constructivista, no resuelve el problema de qué es y cómo se logra ese cambio. Entre las preguntas que es necesario plantear para desarrollar un modelo de cambio conceptual se encuentran las siguientes:

¹ M. C. Wittrock. (1994) Generative Science Teaching. En P.J. Fensham; R.F. Gunstone y R.T. White. *The Content of Science: A constructivist approach to its teaching and learning*, The Falmer Press. London pp 29-38.

² D. P. Ausubel.; Novak J.D.; Hanesian, H. (1978) *Educational Psychology. A Cognitive View*. Holt, Rinehart y Winston. New York.

³ J. D. Novak (1985) Metalearning and metaknowledge strategies to help students learn how to learn. En West & Pines (eds) *Cognitive Structure and Conceptual Change*. Academic Press. Orlando. pp180-210

- ¿Cuáles son las formas bajo las cuales se puede llevar a cabo ese cambio conceptual?
- ¿Cómo se reconoce cuando el cambio conceptual se ha dado?
- ¿Qué implica en términos cognoscitivos el cambio conceptual?
- ¿Cómo puede promoverse el cambio conceptual en la enseñanza?

A continuación y como se ha venido haciendo en este trabajo, se dará un panorama sobre el desarrollo de algunas de las aportaciones que mayor impacto han tenido en la investigación educativa sobre la enseñanza de las ciencias.

4.2 El cambio conceptual en la enseñanza de la Física

Entre los primeros trabajos sobre cambio conceptual, se encuentran aquellos que conciben que el cambio de conceptos debe ocurrir de manera biunívoca, esto es, el cambio de uno a uno. De esta manera, si las ideas previas de los estudiantes están asociadas a un concepto, por ejemplo el de fuerza, entonces se deberá proceder a transformar ese concepto. Los trabajos que sustentan estas concepciones, son partícipes de una idea de ciencia que implica que los conocimientos científicos son conceptos aislados y que tienen significación por sí mismos, esto es, que son autocontenidos. Un ejemplo de esta concepción y de las implicaciones que tiene en la conceptualización de cambio conceptual es el trabajo de F. Reif⁴ quien establece que el problema de las ideas previas debe ser analizado y resuelto en términos de lo que denomina “conocimiento subsidiario”, esto es, el conocimiento que está asociado a los conceptos. Por ejemplo, el concepto de velocidad, implica la existencia de una relación entre variables, un marco de referencia, así como de considerar un tiempo y espacio específicos y una partícula objeto. Entonces, la determinación precisa de las características de los conceptos, del conocimiento subsidiario y su utilización sistemática en la enseñanza, deberá tener como consecuencia el cambio de las ideas previas de los estudiantes. Reif propone tres aspectos que deben llevarse a cabo en el proceso de enseñanza y en el de aprendizaje. Estos son: Especificación, Representación (*instantiation*) y Prevención de Errores.

En la Especificación se establecen aspectos como la descripción general, la descripción informal, la especificación procedural o procedimental, las condiciones de aplicabilidad, la expresión simbólica, los valores posibles, las variables básicas independientes y sus propiedades relevantes. Estos factores deben ser analizados y comprendidos en el proceso de enseñanza. Por lo que respecta a la Representación, ésta se concibe con un sentido de incorporación o aplicabilidad. Por ello, aspectos relativos a esta categoría son los valores de las variables independientes, sus propiedades y las representaciones simbólicas. En cuanto a la Prevención de Errores este autor propone

⁴ F. Reif (1985) Acquiring an effective understanding of scientific concepts En West & Pines (eds) *Cognitive Structure and Conceptual Change*. Academic Press. Orlando. pp133-151

como subcategorías o elementos, los errores en la especificación de los conceptos, de los valores y en la especificación de las variables independientes.

Como puede notarse, este trabajo da cuenta de una concepción tradicional de la enseñanza, donde las ideas previas son consideradas como errores conceptuales y por consiguiente, su transformación estará en función de un cuidadoso y sistemático análisis de las características de los conceptos y sus aplicaciones. Es significativo que Reif da especial importancia a las variables independientes, esto es, a centrar los procesos de aprendizaje en la comprensión que las variables independientes tienen para conocer el funcionamiento de los modelos matemáticos y procesos experimentales. Esto no es extraño a quienes provienen de un área científica, puesto que las variables, por ejemplo físicas, son los elementos descriptores de los fenómenos y los conceptos en general, son contruidos para dar cuenta de sus relaciones. Sin embargo, también para quienes han enseñado una disciplina científica es claro que la sola exposición de las variables, sus relaciones y sus posibles valores, no son elementos suficientes para garantizar la comprensión de los conceptos científicos más allá de la operacionalización.

Sin duda uno de los trabajos sobre cambio conceptual que mayor influencia ha tenido en el desarrollo de las investigaciones y las aplicaciones didácticas en este tema es el de Strike y Posner. A partir de una crítica epistemológica sobre el empirismo y las formas tradicionales de enseñanza a él asociadas, estos autores establecen un marco conceptual sobre el cual comprender lo que significa el cambio conceptual. En este marco toman dos elementos principales; ambos ligados al constructivismo. Un elemento es epistemológico y otro psicológico.

Por lo que respecta a la visión epistemológica, adoptan el planteamiento de Kuhn sobre la estructura de las revoluciones científicas en especial el proceso de cambio a partir del reconocimiento de anomalías para pasar de procesos de inteligibilidad y racionalidad, a la definición de un nuevo programa de investigación. Este esquema epistemológico lo comparan con lo que ocurre en los sujetos y generan un mecanismo para dar cuenta de ese cambio posible.

En cuanto al aspecto psicológico, toman en consideración dos categorías de la psicología genética que son la acomodación y la asimilación. La acomodación será el proceso bajo el cual; los elementos de cambio se conformarán en la estructura cognoscitiva de los sujetos modificándola para adecuarse a las nuevas interpretaciones posibles y el proceso de asimilación un paso previo que implica la incorporación de los nuevos elementos conceptuales a esas estructuras.

Para ubicar el cambio conceptual, elaboran un marco o contexto que denominan ecología conceptual. Esta ecología conceptual, está formada por diversos elementos con los cuales los sujetos interpretan su realidad. Así, no se piensa que cada concepto es un concepto aislado, sino que un concepto sólo cobra significado dentro de ese nicho ecológico en el que se ubica, se relaciona y forma parte sustancial del pensamiento del sujeto.

Las condiciones para el cambio conceptual que proponen Strike y Posner son correspondientes con las propuestas por Kuhn para el éxito de los paradigmas. Estas son:

Debe presentarse insatisfacción con las concepciones existentes.

Una nueva concepción debe ser mínimamente entendida.

Una nueva concepción debe parecer plausible.

Una nueva concepción debe ser fructífera.

Estas condiciones operan dentro del "nicho ecológico", como lo denominan Strike y Posner, en el que están todos los elementos con los que los sujetos cuentan para interpretar y dar significado a los observables y a las abstracciones. Los elementos que constituyen esa ecología conceptual son:

Anomalías. Se refieren a las fallas detectadas debido a que las ideas y los conocimientos de los sujetos son insuficientes para explicar ciertas situaciones problemáticas.

Analogías y metáforas. Son los elementos que sirven para sugerir nuevas ideas y hacer entendibles otras.

Ejemplos e imágenes. Son esquemas prototípicos, experiencias imaginadas e imágenes que sirven como modelos.

Experiencia pasada. Son principalmente, conocimientos relacionados que el sujeto ha construido previamente.

Compromisos epistemológicos. Se refiere a aspectos como ideales explicativos y concepciones generales acerca del conocimiento.

Creencias metafísicas y conceptos. Se refiere por ejemplo a creencias metafísicas sobre la ciencia o a concepciones metafísicas de la ciencia.

Otros conocimientos. Principalmente conocimientos de otras áreas.

Cada una de las acciones que el sujeto pueda realizar en términos de resolver una anomalía con las condiciones que éstos autores plantean, repercute en algunos o todos los elementos que constituyen el nicho ecológico.

Para que ocurra la transformación de los elementos en un nicho ecológico y el sujeto logre un cambio conceptual, es necesario un proceso de acomodación. La acomodación es un proceso que puede ser de largo plazo y que lleva, necesariamente, a la modificación de las representaciones del sujeto. Esta acomodación tiene que ver con aspectos de razonamiento y semánticos, esto es, con la transformación de significados. La acomodación se logra cuando se modifican los elementos del nicho ecológico de tal manera que los conceptos que sustituyen a los previos, cobran significado y se reorganizan en el nicho, de manera que formarán parte de él.

Como puede apreciarse, la propuesta de Strike y Posner, implica la transformación de todo el sistema cognoscitivo de los sujetos y no solo la sustitución o cambio de un concepto específico. Esto tiene importantes consecuencias tanto para la investigación como para la enseñanza. Para la investigación porque propone que en el análisis del cambio conceptual deben tomarse en cuenta los aspectos epistemológicos, cognoscitivos, de representación, de lenguaje, etc., y para la enseñanza, porque plantea que los cambios

conceptuales se lograrán sólo si, en las propuestas didácticas se incluyen aspectos integrales y no sólo los relativos a los contenidos específicos.

A partir de consideraciones como las propuestas por Strike y Posner, el cambio conceptual cobró otra dimensión, paso de ser sólo la transformación y en muchos casos sustitución de un concepto por otro, a ser considerado como un proceso complejo en el cual los conceptos no son más que una parte de un ámbito conceptual y de representación en el que el sujeto da significado a lo observable y es capaz de establecer predicciones y explicaciones causales.

El hecho de enfatizar el papel importante que tienen los procesos epistemológicos, ha llevado a diversos investigadores en este campo, como veremos enseguida, a plantear una revisión de las categorías con las cuales se interpreta el aprendizaje de la ciencia y se concibe el proceso de construcción del conocimiento científico y también ha implicado la revaloración de la historia de la ciencia como un proceso de cambio conceptual y no como descripción de sucesos, teniendo como consecuencia, que la historia de la ciencia es de gran importancia heurística para comprender los problemas que tienen los sujetos en el aprendizaje de los conocimientos científicos mostrando paralelismos y divergencias. Desde luego que aquí el término "paralelismos" no debe entenderse en sentido estricto.

Analizaremos ahora dos trabajos que parten de posiciones diferentes en cuanto concepción epistemológica, pero que han tenido importantes repercusiones. El primero de ellos, de Michelene Chi⁵ parte de una visión que privilegia el aspecto cognoscitivista y de una concepción estándar de ciencia, esto es, aquella en la que en las teorías científicas los conceptos son estructuras organizadas en redes jerárquicas de distinta naturaleza ontológica. Su desarrollo se deriva del análisis entre expertos y novatos e intenta proponer un modelo de cambio conceptual en función de clases organizadas en redes jerárquicas que denomina categorías ontológicas. El segundo de Nancy Nersessian⁶ tiene como fundamento el razonamiento analógico e imaginativo aplicado a la historia de los conceptos físicos.

El punto de partida de M. Chi es concebir el cambio conceptual como el cambio de significado de un concepto. Pero, al reconocer que el término significado no es ubicuo, es decir, es dependiente del sujeto, propone para su análisis ubicarlo dentro de un status categorial, esto es, clasificarlo dentro de cierta categoría. De esta forma sustituye el problema del cambio de significado por el del cambio de categoría. Este cambio de significado a categoría, no es algo superficial como pudiera parecer a primera vista, puesto que las categorías, que son sistemas clasificatorios, son conjuntos que pueden definirse con precisión y que, por lo tanto, son operables lógicamente y semánticamente. Por otro lado, un cambio de clasificación implica reconocer que el sujeto tiene de inicio alguna. Este

⁵ M. T.H. Chi. (1992) Conceptual Change within and across Ontological Categories: Examples from Learning and Discovery in Science. en R. Giere (Ed.) *Cognitive Models of Science*. Minnesota Studies in the Philosophy of Science Volume XV. University of Minnesota Press. pp 129-186.

⁶ N. J. Nersessian (1992) How Do Scientist Think? Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science. En Giere (Ed.) *Cognitive Models of Science*. Minnesota Studies in the Philosophy of Science Volume XV. University of Minnesota Press. pp 3-44

reconocimiento toma en cuenta que los sujetos tienen previamente, esquemas clasificatorios para sus concepciones y por lo tanto, toma en cuenta a las ideas previas.

M. Chi comienza por determinar que todo tipo de concepto y de conocimiento puede clasificarse en tres grandes categorías ontológicas (categorías de naturaleza distinta) que son: **Materia, Eventos y Abstracciones**. En la categoría de Materia, se clasifican los objetos por todas sus propiedades físicas, por ejemplo el movimiento de un objeto, su forma o las leyes físicas a las que está sujeto.⁷ La categoría de los Eventos, se refiere a procesos y acciones que pueden ser naturales o de los sujetos, que presentan relaciones causales, intencionalidad y que, en general, pueden ser descritos en función de su desarrollo, esto es, son dependientes del tiempo. Por su parte la categoría de las Abstracciones, se refiere a todos aquellos conceptos que no se pueden ubicar espacio-temporalmente y que dan cuenta, principalmente, de estados y construcciones mentales que no tiene ningún referente fenomenológico. Ejemplos de elementos de esta categoría son las ideas referentes a cuestiones emocionales o imaginativas.

Cada una de esas categorías se ramifica en un árbol de subcategorías en las cuales los conceptos pueden estar bien o mal ubicados. Dependiendo de su ubicación, esta autora distingue dos tipos de cambio conceptual. a) El cambio conceptual dentro de una categoría (que denomina simplemente como cambio conceptual) y b) el cambio conceptual entre categorías (que denomina cambio conceptual radical). Cada uno de estos tipos de cambio conceptual tiene particularidades que deberán cumplirse para que el cambio conceptual ocurra y como puede preverse, las dificultades de que ese cambio conceptual ocurra, serán mayores para el cambio conceptual radical.

El cambio conceptual no radical, se describe como un cambio dentro de la misma categoría, esto es, una reasignación en el árbol formado por las subcategorías. Este cambio implica entonces que un concepto que inicialmente se ubicaba en una subcategoría *a*, pasará a la subcategoría *b*. Este cambio, sin embargo, no implica que se trate de un proceso trivial o que no requiera de un esfuerzo cognoscitivo. Por el contrario, puede requerir de nueva información y de establecer nuevas relaciones. Un ejemplo que se describe en el trabajo referido⁸ es el de cambiar la concepción de que las ballenas son peces por la de que son mamíferos. Este cambio que para los estudiantes pequeños puede parecer complejo (tanto por características psicológicas como conceptuales), para estudiantes de mayor edad no lo es porque pueden reconocer en la ballena, las atribuciones de los mamíferos. En este ejemplo puede notarse como un concepto pasa dentro de la misma red de la categoría ontológica de Materia, de un lugar a otro.

El cambio conceptual radical que implica el cambio de una categoría ontológica a otra, es mucho más complejo y no lleva asociado un mecanismo cognoscitivo (por ejemplo, diferenciación, generalización, etc.) y por tanto, se concibe como un elemento nuevo puesto que no es una reasignación de significado ni de ubicación en la red jerárquica, sino

⁷ Es importante hacer notar que en la definición que Chi hace de esta categoría, queda de manifiesto su concepción de ciencia, que implica que los conocimientos son verdades comprobables y que rigen el comportamiento de los objetos. Esto tiene implicaciones en la concepción de cambio conceptual y sobre todo en los procesos asociados al cambio conceptual bajo una noción de aprendizaje no constructivista.

⁸ Chi (1992) Op. cit. p 136

una nueva concepción de un proceso o concepto con condiciones y características propias, esto es, un proceso de construcción conceptual.

M. Chi, justifica las dificultades del aprendizaje de los conceptos científicos debido a que, en la mayoría de los casos, se requiere de un cambio conceptual radical. Por ejemplo, hace notar que los sujetos asocian conceptos físicos como el calor o la energía, a la categoría de Materia, siendo que pertenecen a la de Eventos; más específicamente a eventos que están regulados por un proceso o constricción (*constraint-base-events*). El cambio conceptual radical si bien, no se logra por procesos cognoscitivos (en el sentido mencionado), sí requiere que ocurra lo siguiente:

Aprender las propiedades de la nueva categoría ontológica por medio de procesos adquiridos.

Aprender el significado de los conceptos individuales en esa categoría ontológica por medio de procesos adquiridos.

Reasignar un concepto a su nueva categoría ontológica (esto implica tres posibles procesos)

1. Abandonar el significado original del concepto y reemplazarlo por el nuevo de manera activa
2. Permitir que coexistan ambos significados y acceder a ellos dependiendo del contexto
3. Reemplazar automáticamente por la coherencia y fuerza del nuevo significado

Como puede notarse, en esta teoría, el cambio conceptual radical, requiere de un proceso de aprendizaje y no está implícito en él, es decir, el aprendizaje es un proceso externo al cambio conceptual. Ese aprendizaje, que es concebido como obtención de información y su significado, es necesario para que sea incorporado a alguna de las categorías o en su caso, coexista con otro significado en la misma categoría. Este es un planteamiento radicalmente diferente al de Strike y Posner, quienes ven en el cambio conceptual el proceso mismo de aprendizaje.

Otra de las aproximaciones al análisis del cambio conceptual que ha tenido importantes repercusiones es la del N. Nersessian⁹ quien incorpora como método de análisis tres elementos principales. El análisis filosófico, el histórico y el cognoscitivo. Propone reunir dos campos principales, el análisis estructural fino de los procesos teóricos y experimentales que llevaron a cabo los científicos con los métodos de análisis de las ciencias cognoscitivas. A este proceso se le ha denominado como Análisis Histórico - Cognoscitivo y puede describirse como "El método combina el estudio de casos de las prácticas científicas con las herramientas y teorías de las ciencias cognoscitivas para crear

⁹ Nersessian (1992) Op. cit.

una nueva teoría abarcadora de cómo las estructuras conceptuales son construidas y cambiadas”¹⁰.

Como fundamento filosófico, Nersessian establece que es posible encontrar cómo las habilidades cognoscitivas y las limitaciones constrictivas científicas se emplean en la teorización, lo cual no puede ser determinado a priori, mostrando así, una preferencia hacia las aproximaciones epistemológicas que se alejan de la visión conductista de las teorías psicológicas. Por otra parte, sigue una concepción dinámica de la construcción de las teorías científicas pero enmarcándola en procesos como la **justificación** y el **descubrimiento**. Por justificación Nersessian comprende los procesos causales y relacionales que llevan a considerar que un cierto conocimiento cumple con las condiciones que exige la teoría científica, mientras que, por descubrimiento, intenta describir un proceso más intuitivo, donde el sujeto percibe, de alguna manera, una relación o hecho que tendrá especial relevancia en la formulación de nuevas ideas e interpretaciones.

Nersessian muestra como el debate filosófico sobre la dinámica de las teorías científicas entendidas como revoluciones, llega con el problema de la incomensurabilidad de las teorías, hasta cierto nivel de discusión estéril. Por ello, afirma que el problema de la incomensurabilidad es reemplazado por el de criterios para la justificación de una teoría sobre otra, es decir, de la competencia entre teorías. Sin embargo, el problema como apunta esta autora, sigue latente cuando se intenta comprenderlo desde un punto de vista cognoscitivo. “Es el problema de comprender cómo los científicos combinan sus habilidades cognoscitivas con las fuentes conceptuales disponibles para ellos como miembros de la comunidad científica y de un amplio contexto social para crear y comunicar nuevas representaciones científicas de un dominio”¹¹.

La propuesta de Nersessian es la de analizar el proceso de justificación y creatividad, atendiendo a las consideraciones histórico - cognoscitivas de un personaje científico. Para ello, analiza dos casos: el concepto de campo de Faraday a Maxwell y el de movimiento de Galileo a Einstein.

Nersessian, delinea una teoría sobre el cambio conceptual, basada en tres aspectos:

- A) Asume lo propuesto por Johnson-Laird¹² (1983) que la representación que implica el conocimiento tiene al menos tres elementos: (1) representación proposicional, (2) modelos mentales y (3) imágenes. Estos tres elementos tienen diferentes momentos en el proceso del conocimiento y sus roles están bien diferenciados. Da especial importancia a la construcción de modelos mentales, pues indica como con ellos, el sujeto elabora esquemas inferenciales sin tener que ser simbólicos y explícitos.

- B) En cuanto a la representación que implica una teoría científica, argumenta que debe ser construida como una estructura que selecciona clases de modelos que

¹⁰ Idem. p 5

¹¹ Ídem. p. 8

¹² Johnson-Laird P. N. (1983) *Mental Models*. Cambridge Mass. Harvard University Press.

mejor se ajustan a un modo semántico de las teorías (van Frassen 1980), más que a un modo sintáctico o lingüístico como se sigue de Carnap.¹³

- C) El significado (en términos filosóficos) está mediatizado por la construcción de modelos mentales que se relacionan con la realidad de diferentes formas.

Con estos tres fundamentos, Nersessian establece un proceso para el cambio conceptual que divide en dos partes: La **cinemática del cambio conceptual** y la **dinámica del cambio conceptual**. La cinemática del cambio conceptual, es la que describe para un concepto particular los posibles cambios. Éstos se clasifican en creados (por ejemplo spin), otros que desaparecen (como calórico), otros son conceptos descendientes (como el caso de masa y tiempo en la teoría de la relatividad, o del de calor en la termodinámica) y otros son absorbidos (propiedades de un concepto que pasan parcialmente a otro como el caso del éter, en la relatividad y en el campo electromagnético). En este caso cambio conceptual significa el cambio de un concepto por otro bajo las modalidades apuntadas. Por dinámica del cambio conceptual apunta que el descubrimiento es un proceso que lleva implícita la creatividad, pero también, el razonamiento. De esta forma el descubrimiento es un proceso cognoscitivo. Este proceso tiene al menos cuatro componentes: (1) el razonamiento analógico, (2) el razonamiento imaginativo, (3) los experimentos pensados y (4) el análisis limitado de casos. Estos elementos conforman el proceso del descubrimiento, que implica para Nersessian, que la solución de problemas (conceptuales) es en sí el cambio conceptual.

En cuanto al proceso de los razonamientos analógico e imaginativo, Nersessian describe el desarrollo de Faraday y Maxwell sobre la idea de campo electromagnético. Hace notar cómo Faraday construye esquemas o modelos gráficos para representar las interacciones entre la electricidad y el magnetismo y cómo Maxwell, elabora un complejo modelo mecánico para interpretar la relación entre la electricidad y el magnetismo en términos de un sistema newtoniano de fuerzas. Muestra como a partir de este modelo, es posible construir, por razonamiento analógico, las ecuaciones del electromagnetismo y posiblemente lo más importante, cómo se llega a un modelo de interacciones que ya no es newtoniano. Hace notar también que este modelo de cambio conceptual se ve soportado por la investigación en inteligencia artificial sobre la construcción de modelos de razonamiento analógicos y que sus implicaciones pueden ser aplicadas, al menos en términos de clarificar, lo que ocurre en el proceso histórico descrito para el trabajo de Maxwell. Sin embargo, es importante resaltar que aún quedan diversos aspectos que al parecer no son explicables en términos del razonamiento analógico y es la estructura matemática que subyace al proceso descrito y también, el problema de cómo se rebasa un modelo para comenzar a hacer otro tipo de interpretaciones y de inferencias que ya no

¹³ Estas posiciones filosóficas, dan cuenta de como se interpreta la construcción de las teorías y de los términos (conceptos). Carnap hace énfasis en el aspecto estructural sintáctico y por su parte van Frassen lo hace en el representacional semántico como otros de los autores que hemos tratado (Stegmueller, Moulines, etc). Se pueden encontrar estas ideas expuestas en los libros Rolleri, J. L. (Comp.) *Estructura de las teorías científicas* UNAM 1989.

tienen que ver con el modelo original. ¿Qué ocurre entonces con el razonamiento analógico?

En cuanto a los experimentos pensados y el análisis de casos límite, esto es, casos en los que las relaciones matemáticas se llevan a situaciones no alcanzables como la velocidad de la luz, o tamaños atómicos, Nersessian hace notar nuevamente que son modelos mentales los que permiten la construcción de esos experimentos pensados. Pone énfasis en que los experimentos pensados son más que un elemento heurístico y constituyen, como los casos del razonamiento analógico e imaginativo, formas de razonamiento que los sujetos llevan a cabo de manera no inferencial, y por consiguiente, de forma más intuitiva. Hace notar también, que en la historia de la Física, son muy numerosos los ejemplos de experimentos pensados como también ha sido reconocido por Kuhn.¹⁴ Pone algunos ejemplos muy conocidos, debido a que se usan como modelo en las clases de Física, como son los experimentos de la caída de los cuerpos de Galileo, y el caso del elevador en el espacio de Einstein que hace indistinguible si se encuentra en un campo gravitacional o en un sistema acelerado. En cuanto a los aspectos relevantes de los experimentos pensados muestra como (a) "Una narrativa facilita la construcción de una situación experimental pensada" y (b) "el pensamiento a través de situaciones experimentales como si fueran consecuencias en el mundo real". Lo anterior implica que el pensamiento que lleva a los experimentos pensados incluye la construcción de un modelo mental y un proceso de ejecución (*running*) o simulación mental.

El modelo sobre la construcción del conocimiento que propone Nersessian, presenta que; el desarrollo del conocimiento científico, se da a través del cambio conceptual, esto es, ante la necesidad de resolver un problema, será necesario construir una nueva representación. Lo anterior implica que debe darse un proceso de cambio de concepciones para que la nueva representación tenga sentido, así, el cambio conceptual será la solución al problema. Este enfoque está en acuerdo con el cambio de paradigma de Kuhn en su estructura de las revoluciones científicas. Por otro lado, el cambio conceptual implica, a su vez, la construcción de modelos mentales. Estos modelos mentales para Nersessian son representaciones esquemáticas de procesos observables como el caso de las líneas de fuerza o los movimientos rotacionales de Faraday y Maxwell. De esta forma los modelos mentales se constituyen en la base del conocimiento. Esta posición, tiene sin embargo, diversos aspectos que no quedan en claro. El método que Nersessian denomina Análisis Histórico-Cognoscitivo, ha sido utilizado previamente por Piaget y García¹⁵, en un trabajo en el que analizan el proceso histórico a partir de la construcción de estructuras cognoscitivas. En este caso no aparecen los modelos mentales, sin embargo, también el análisis es satisfactorio en términos de estructuras, de esquemas y de mecanismos reguladores. Cabe entonces preguntarse ¿qué papel tienen los procesos estructurales en la construcción del conocimiento? ¿qué relación hay entre esas estructuras y los modelos mentales?

Nersessian también da por supuesto que los modelos mentales que los sujetos construyen son los mismos que pueden expresar, de ser así, ¿cómo se diferencia modelo

¹⁴ Kuhn (197) Op. cit.

¹⁵ Piaget J. y García R. (198) *Psicogénesis e historia de la ciencia*. Ed. Siglo XXI México.

mental de la expresión oral? Si los modelos mentales son esquemas gráficos de situaciones posibles como en el caso de los experimentos pensados, de representaciones posibles, o en las visualizaciones y analogías, debe inferirse que ¿el lenguaje tiene entonces esa estructura?¹⁶

Un aspecto que también es cuestionable, acerca de los modelos mentales en la ciencia, es si son elementos contruidos para la generación del conocimiento o lo son para su explicación, esto es, si bien es cierto que en el desarrollo del conocimiento científico han aparecido muchos modelos, salvo en algunos casos explícitos como el de Maxwell no queda claro si éstos modelos son parte del desarrollo y construcción del conocimiento, o bien, si son modelos que se han utilizado para hacer explícita la representación abstracta que supone el conocimiento ya construido.

Aunque no es el objetivo principal del trabajo de Nersessian el aspecto educativo, apunta algunas consideraciones sobre la enseñanza de la ciencia. Así, concibe al aprendizaje dentro de la visión constructivista, en la cual, el sujeto construirá sus propias representaciones, esto es, modelos mentales bajo procesos analógicos. Esta visión constructivista no debe entenderse en sentido radical en la cual el sujeto construye una realidad independiente. En todo caso, el aprendizaje también es elaboración de conocimiento y puede quedar sujeto al descubrimiento como ha sido definido en su método - lo cual no implica relativismo en el aprendizaje, puesto que existen elementos para poner en común las construcciones -. La enseñanza quedará así determinada por la pertinencia de situaciones que lleven a los estudiantes a realizar los procesos para la construcción y funcionamiento de los modelos mentales.

El cambio conceptual como mecanismo de aprendizaje de la ciencia, es actualmente uno de los problemas más analizados. Sin embargo, como puede deducirse de lo expuesto anteriormente, la idea de cambio conceptual depende del enfoque que del conocimiento se adopte. En particular, si este conocimiento lleva implícito un modelo de las ideas de los estudiantes. En el caso de Strike y Posner, el cambio conceptual está referido al cambio de concepciones específicas que se enmarcan en una ecología conceptual, en el caso de Chi el cambio conceptual, en el sentido radical, se da entre categorías ontológicas y en el caso de Nersessian, el cambio corresponde al cambio de modelos mentales.

4.2.1 Tendencias actuales en el cambio conceptual

En la situación presentada se muestran algunas de las diversas interpretaciones sobre el cambio conceptual. Esto ha llevado a realizar intentos por analizar en el aula el cambio conceptual teniendo como marco algunos de estos enfoques (desde luego hay más

¹⁶ Es difícil pensar actualmente, que el lenguaje representa todo lo significado, es decir, que la estructura del lenguaje es isomorfa con lo que el sujeto puede, cognoscitivamente hablando, representar. Esto puede mostrarse en que los procesos deductivos e inferenciales, así como las imágenes mentales sobre aspectos abstractos no permiten ser descritos de manera inmediata y tienen que pasar por procesos largos como la toma de conciencia de Piaget o la transformación de un contexto conceptual como plantean Strike y Posner.

enfoques sobre el cambio conceptual que no se han analizado aquí, por ejemplo, el del crecimiento de marcos conceptuales [*Growth of Knowledge Frameworks*] de Duchl.¹⁷).

Los resultados de esos trabajos hasta ahora no muestran con claridad qué ocurre en las estructuras conceptuales de los sujetos. Esto ha llevado a algunos investigadores a preguntarse **¿qué es lo que cambia en el cambio conceptual?**

Desde luego la respuesta a esta pregunta estará en función de su concepción de conocimiento y de cambio conceptual. Un ejemplo de este tipo de investigaciones es el desarrollado por Benloch y Pozo¹⁸, quienes parten del supuesto de que las ideas previas de los estudiantes, constituyen lo que denominan "teorías implícitas". En un estudio que llevaron a cabo sobre el cambio de estas teorías implícitas con el tema del calor y el aire, hacen notar como en estudiantes de diversos niveles escolares, lo que se manifiesta como significativo en el cambio, son los elementos de las teorías implícitas y no los conceptos aislados, esto es, las ideas o representaciones que conforman en conjunto esas teorías implícitas. Muestran también, en acuerdo con Chi, que el cambio puede interpretarse como cambio en la naturaleza ontológica de las ideas previas.

Cabe aquí el cuestionamiento a lo que Benloch y Pozo llaman teorías implícitas, puesto que parecen inferencias coherentes a partir de las ideas previas, lo que no necesariamente constituye una teoría, incluso en un sentido muy limitado pues, como hemos visto en los capítulos precedentes; una teoría requiere de conjuntos de ideas con características específicas con cierta articulación orgánica y formas de razonamiento sean expresadas en forma matemática o no.

Otro ejemplo, ahora tomando como base que lo que cambia en el cambio conceptual son los modelos mentales, es el desarrollado por Vosniadou S & Ioannides C¹⁹, quienes describen un estudio sobre las transformaciones conceptuales en estudiantes pequeños. Parten de la suposición de que los sujetos construyen estructuras de pensamiento, pero centradas en un dominio específico, y de que estas estructuras sufren cambios en el tiempo. Este cambio no es debido a un desarrollo cognoscitivo (al menos no como el aspecto determinante) sino al desarrollo de teorías o marcos que se van transformando por medio de las ideas que los sujetos construyen y del conocimiento que incorporan del contexto. Estos elementos son utilizados para la representación por medio de modelos mentales, así, los marcos son modelos mentales que los sujetos utilizan para representar e inferir. Aunque no se hace mención al trabajo de Nersessian, es indudable que existen semejanzas en cuanto a la concepción de la evolución del conocimiento. Pero, en este caso, no es la interpretación del conocimiento científico en los procesos de los científicos (casos históricos) sino en el desarrollo de los estudiantes pequeños. En las estructuras con las cuales los modelos mentales son construidos, estos autores, proponen

¹⁷ Duchl R (198) *Restructuring Science Education* The Teacher College Press, Columbia University y Duchl R & Erduran S. (1996) *Modelling the Growth of Scientific Knowledge* en Welford, Osborne & Scott (eds) *Research in Science Education in Europe*. Flamer Press London.

¹⁸ Benloch M. y Pozo J. I. What Changes in Conceptual Change?: From Ideas to Theories. en Welford, Osborne & Scott (eds) *Research in Science Education in Europe*. Flamer Press London.

¹⁹ Vosniadou S. Y Ioannides C. (1998) From conceptual development to science education: a psychological point of view. *International Journal of Science Education*. Vol 20(10) pp. 1213-1230

que existen dos entidades básicas inherentes a las concepciones y percepciones de los sujetos de la realidad. Una es el aspecto ontológico que da cuenta de la naturaleza de los elementos a conocer, por ejemplo, los objetos físicos y su clasificación en inanimados. El otro aspecto es el epistemológico que da cuenta de la naturaleza de nuestro conocimiento, esencialmente de las explicaciones y presuposiciones.

Otro aspecto importante acerca de la reflexión sobre el cambio conceptual, es ¿qué significa realmente y cómo se da éste en la escuela? Este tipo de preguntas ha llevado a cierto nivel de crítica sobre el cambio conceptual. Esta crítica, en mi opinión, es en un sentido positivo puesto que contribuye a precisar no sólo el cambio conceptual en sí, sino las perspectivas y expectativas de la investigación en enseñanza de la ciencia. Un ejemplo de los trabajos en esta línea es el de Caravita S. Y Halldén O.²⁰, quienes plantean dos líneas de cuestionamiento: a) La de analizar si el cambio conceptual significa el cambio o sustitución de un concepto por otro y b) analizar la validez de la presuposición implícita en la mayoría de los trabajos de cambio conceptual, de comparar el proceso de aprendizaje - como cambio conceptual - con el desarrollo histórico de la ciencia (como es el caso de los trabajos de corte epistemológico derivados de Strike y Posner) o con el desarrollo cognoscitivo del sujeto (como los trabajos derivados de una concepción piagetiana).

En cuanto a la línea a), estos autores hacen notar que el aprendizaje de las ciencias es más que los conceptos individuales y que se requiere de un contexto y de diferenciar tipos de aprendizaje o en su caso niveles de cambio conceptual (este aspecto ha sido abordado por diversos trabajos, algunos de los cuales han sido analizados aquí) y por lo que toca a la línea b) muestran cómo los procesos de aprendizaje y las situaciones en el ámbito escolar no son comparables con el desarrollo de las ideas científicas derivadas del análisis histórico y/o epistemológico. Este último aspecto habría que analizarlo con detalle, puesto que al parecer estos autores muestran cierta limitación en lo que las implicaciones, pueden y han aportado, tanto del análisis histórico como del epistemológico, al proceso de comprensión del conocimiento científico y de los problemas conceptuales de los estudiantes.

Caravita y Halldén hacen notar cómo el cambio conceptual debe reinterpretarse bajo los siguientes rubros:

Dependiente de la disciplina que se estudia

Cambio no paradigmático que implica la reorganización, profundización y extensión del conocimiento

Cambio paradigmático que implica cierto nivel de transformación o sustitución de conceptos.

Como puede notarse, este tipo de trabajos enfatizan la interrelación de aspectos o factores que tienen que ver con los aspectos escolares y de práctica escolar y diferencian entre los diversos campos científicos sobre los que se espera aprendizaje de los alumnos, distinguiendo así diversos niveles del cambio conceptual.

²⁰ Caravita Silvia and Halldén Ola (1994) Re-framing the problem of conceptual change. *Learning and Instruction* vol 4, pp 89-111

Analizaremos finalmente, un trabajo reciente de diSessa y Sherin²¹ el cual abre nuevas perspectivas para, con otro enfoque, comprender lo que significa el cambio conceptual. El primer aspecto que analizan es determinar qué se entiende por cambio conceptual. Para ello, hacen un análisis de algunos trabajos sobre el cambio conceptual y definen como "concepción estándar" aquella en la que el cambio conceptual significa un cambio en el núcleo de los sistemas conceptuales, esto es, que el cambio conceptual implica transformaciones en las representaciones de los sujetos de manera que son transformaciones profundas, que llevan al cambio de conceptualización y por tanto de representación de los fenómenos y sus explicaciones en los sujetos y que, por el contrario, no debe entenderse el cambio conceptual como la sustitución de conceptos. El segundo punto de análisis es la indagación de qué es lo que cambia en esos sistemas. Una primera respuesta a esta última pregunta es; los conceptos que lo conforman. Pero esta afirmación es ambigua porque no se tiene, en la literatura sobre preconcepciones y cambio conceptual, un manejo uniforme y claro de lo que significa la palabra concepto. Así, los autores intentan llegar a un consenso en cuanto al concepto de concepto. De su análisis se desprenden tres problemas presentes en las investigaciones previas sobre cambio conceptual y conceptualización. Estos son:

1. **¿Qué se debe considerar cuando se habla de un concepto?** Esta pregunta tiene origen en el hecho de que, en diversas ocasiones, se toman como conceptos posibles relaciones o palabras que, independientemente de la edad de los sujetos y su uso en un contexto específico, no necesariamente lo son. Por ejemplo muestran como la idea de "cosas vivas" (*living things*) no necesariamente implica un concepto en cuanto a lo que son las cosas vivas y su clasificación, sino sólo como una palabra que denota acciones de clasificación.
2. **Poca atención a las manifestaciones de variedad de los conceptos.** Por ejemplo, en diversas ocasiones se tratan conceptos como vida animal, equivalente a fuerza o campo eléctrico no diferenciando entre sus especificidades tanto estructurales como de representación teórica. En este punto debe notarse que - y en acuerdo con diSessa - los conceptos tienen significación dentro de una estructura teórica y que, dependiendo de su ubicación en la misma los conceptos tienen distinta categoría y función, por ello no se pueden tomar como equivalentes conceptos que describen relaciones empíricas de conceptos que establecen entidades abstractas con un papel de enlace teórico.
3. **Imprecisión teórica.** Que depende del marco teórico en el cuál se lleva a cabo la investigación y que implica a la determinación de si un sujeto ha comprendido o no un concepto, sin tomar en cuenta el marco contextual y teórico que tiene el sujeto comparado con el del investigador para poder afirmar la comprensión del concepto analizado.

El primer aspecto que analizan estos autores, es la insuficiente precisión que puede derivarse de las investigaciones y concepciones psicológicas acerca del término concepto,

²¹ diSessa A. A & Sherin B. L. (1999) What changes in conceptual change?. *International Journal of Science Education*. Vol 20(10) pp 1155-1191

haciendo notar cómo diversas posiciones cognoscitivas, si bien apuntan hacia cierto tipo de comprensión del término concepto, no son aplicables en general y menos aún, en los conceptos científicos. Por ejemplo, es típico de investigaciones psicológicas tratar conceptos como "silla", para analizar procesos conceptuales. Si bien esto es posible, sus resultados no pueden generalizarse a conceptos como campo eléctrico que, como se ha mostrado anteriormente, tiene características distintas; en especial su sentido, representación y vinculación con una estructura teórica. También analizan y muestran cómo en estudios sobre ideas previas y cambio conceptual en Física no ha habido la claridad suficiente para saber, cuándo se está hablando de conceptos previos (o preconceptos), cómo se está interpretando en función de las ideas de los estudiantes.

Para resolver esta situación diSessa y Sherin presentan lo que denominan un modelo de concepto. Este modelo de concepto debe contemplar los siguientes aspectos:

Determinar un estándar de qué se entiende por un concepto. Esto implica tener mayor claridad sobre lo que es y lo que no es un concepto, así como soporte teórico y empírico.

Tomar en cuenta las diferentes variedades de conceptos. Esto implica, considerar que hay una variedad de constructos teóricos que determinan diversos tipos o clases de conceptos.

Consideraciones teóricas sobre una variedad de procesos involucrados en el uso de conceptos y el cambio conceptual. Estas consideraciones deben dar cuenta de procesos como la operación, emergencia y cambio de esas entidades.

Habilidad para relacionar (empatar) datos en tiempo real del pensamiento de los estudiantes con las consideraciones teóricas sobre los procesos descritos. Esto implica "la capacidad de organizar y diferenciar los procesos involucrados en la aplicación de un concepto y su cambio conceptual".

En la propuesta de diSessa y Sherin, el primer aspecto que se debe considerar es que "concepto" no puede ser definido como una entidad acotada y precisa, por el contrario, se piensa en concepto como un sistema. Esto implica cierta "borrosidad" (*fuzzy*) que corresponde a lo que ocurre en realidad con los sujetos, esto es, todo concepto en un sujeto es una abstracción que no tiene bordes definidos. Esto también implica que no se puede catalogar a los conceptos mediante clases predeterminadas (por ejemplo las clases ontológicas) sino en función de su utilización y formas de interpretación.

diSessa y Sherin definen su propuesta de modelo de concepto como **Coordinación de clases**. En esta propuesta, los conceptos (coordinación de clases) tienen la función de obtener información y determinar clases. Cada función dependerá del tipo de disciplina. Por ejemplo, para los conceptos físicos, se refiere a la obtención de información, tal es el caso de la velocidad, que sirve para determinar cuando un objeto tiene mayor rapidez, viaja más lejos, etc., en el caso de conceptos en biología, su función está más cercana a la de establecer diferencias y pertenencia a una clase, como si un animal es un pájaro o no.

La coordinación de clases, implica que los conceptos en el sistema están en función de cómo se observa con ellos. - observar se entiende en sentido amplio, esto es, ver algo u

observar algo implica conocer, aprender, interpretar, etc. -. Así, el cambio conceptual, será el cambio en la manera de 'ver' los procesos naturales.

La coordinación de clases, es entonces, un proceso que llevan a cabo los sujetos para construir sus nociones. La coordinación de clases tiene dos componentes estrechamente relacionadas. Por un lado lo que los autores denominan **estrategias de obtención de información o de lectura** (*readout strategies*) que es el mecanismo bajo el cual el sujeto percibe los procesos y la información y que tiene a su vez dos componentes; la **integración** (en el sentido de información) y la **invarianza** (en términos de reconocer patrones en lo observado). Por otro lado se tiene la **red causal** (*causal net*) que tiene la función de establecer cómo y cuando se establecen relaciones entre los elementos obtenidos en las estrategias de obtención de información. Estos dos elementos, son utilizados para describir cómo se van conformando las concepciones en los sujetos y que, los autores, ejemplifican con el concepto de fuerza. Con los elementos de la coordinación de clases, se puede apreciar cómo, el cambio conceptual, se traduce entonces, en las transformaciones coordinadas entre la obtención de la información y el establecimiento de relaciones (Cabe aclarar que información debe entenderse en un sentido amplio y no solo en la obtención de datos, sino en un sistema complejo de representación). Considerada de esta forma las transformaciones de estos elementos de representación es que cobra sentido la afirmación de que el cambio conceptual se traduce en un cambio en la forma de interpretar o 'ver' un proceso a la luz de los conceptos implícitos en la representación.

Con los elementos sobre coordinación de clases (como equivalente a concepto aplicable a situaciones físicas) los autores establecen una serie de sugerencias que ayudan a comprender los problemas del cambio conceptual en los estudiantes de física. Estos son:

No hay falta de capacidad para ver eventos físicos relevantes. Los estudiantes no requieren el apoyo de nuevas estrategias sensoriales para coordinar clases apropiadamente. Por el contrario, la red causal constituye un problema más serio.

Debido a que la causalidad intuitiva tiene un amplio uso en los sujetos, el problema prototípico es, entonces, que hay demasiadas cosas que consideran relevantes, o en su caso, erróneas. La invarianza o detección de patrones de comportamiento que no cambian, se presenta aquí como el principal problema.

Coordinación de primitivos fenomenológicos (*p-prims*). Esto es, el comienzo de una red causal es sustancialmente, el sentido intuitivo de mecanismo que se identifica como un conjunto de primitivos fenomenológicos que los estudiantes tienen.²²

Las interpretaciones cualitativas de las ecuaciones son más importantes que los cálculos precisos. Este es el papel que deben jugar las ecuaciones en la coordinación de clases.

²² En la descripción del capítulo I sobre el trabajo de diSessa (1993), se explica lo que este autor denomina sentido intuitivo de mecanismo y el significado de primitivo fenomenológico (*p-prims*).

En el trabajo descrito de diSessa y Sherin, puede apreciarse cómo, abordar el tema de cambio conceptual, implica diversos procesos conceptuales que van más allá de la simple sustitución o clasificación de entidades semánticas o conceptos, y que para comprender la formación de nociones científicas y sus transformaciones en los sujetos, se requiere de abordar el problema con una perspectiva que relacione el proceso de construcción del conocimiento con el de cambio, integrando así, una idea de aprendizaje de la ciencia con diversos matices y concepciones.

En particular, es importante resaltar que el cambio conceptual implica la transformación correlativa de procesos y contenidos, sujetos ambos a la interpretación y la construcción de modelos. Sin embargo, es necesario señalar que aún con las propuestas de cambio conceptual como cambio de modelo y con la descripción más fina de diSessa y Sherin sobre mecanismos de cambio de un cierto tipo de conceptos (coordinación de clases), se percibe la falta, al menos, de incorporar un elemento más a la concepción de cambio conceptual y sus procesos. Este elemento tiene que ver con el aspecto estructural, esto es, con el cambio en la conformación jerárquica de las concepciones de los sujetos y su papel en el establecimiento de relaciones causales e inferenciales.

Para el caso de los modelos parciales posibles presentados en este trabajo, el cambio conceptual, implicará entonces, una transformación estructural en los conjuntos conceptos constrictores y reglas de correspondencia, que llevará a su vez a las transformaciones de relaciones causales como se apunta también en la red causal de diSessa y Sherin.

A continuación se presenta una forma de representación del cambio conceptual con los modelos parciales posibles y algunas implicaciones que apuntan hacia un modelo de cambio conceptual en términos del semiformalismo desarrollado en los capítulos precedentes.

4.3 Representación del cambio conceptual con los modelos parciales posibles

Del análisis presentado sobre las diversas posiciones y problemas del cambio conceptual, puede inferirse que es necesario desarrollar un modelo para representar el cambio conceptual que sea flexible al menos en dos sentidos. Uno, que el modelo dé cuenta del proceso mismo del cambio, esto es, que pueda mostrar cómo las variaciones en algunos aspectos de los modelos parciales posibles dan origen a nuevas concepciones y a una nueva visión sobre ciertos fenómenos físicos. Este proceso de cambio no necesariamente implica una transformación abrupta como el caso del cambio de clases ontológicas, sino más bien, un proceso gradual y en el mejor de los casos evolutivo. El otro, implica que se pueda inducir la transformación por un proceso (no necesariamente secuencial) a partir de transformaciones en los elementos - conceptos constrictores y reglas de correspondencia - y en la estructura del modelo que representa las ideas de los sujetos.

Lo anterior implica que un modelo que dé cuenta de la transformación conceptual de los estudiantes, debe describir el proceso en dos niveles: el de las **diferencias individuales** y el de la **estructura general**.

A continuación se expone cómo los modelos parciales posibles desarrollados pueden utilizarse para representar y guiar procesos de transformación conceptual cumpliendo con las condiciones determinadas para dar cuenta de un proceso como éste.

Los modelos parciales posibles, están constituidos por los conjuntos de conceptos constrictores y reglas de correspondencia que cumplen con los criterios definidos para su determinación y que operan bajo inferencias simples. Entonces, para modificar un modelo parcial posible, será suficiente con la modificación de al menos uno de los elementos que pertenecen a uno de los conjuntos CC y RC. Esta modificación puede darse por la **transformación** de uno de esos elementos, por una **nueva jerarquización** de los elementos (por ejemplo que un elemento pase de CC a RC o viceversa) o por la **inclusión de nuevos elementos**. Debe notarse que estos procesos no son excluyentes y puede presentarse la combinación de algunos de ellos.

Cuando uno de los factores de cambio mencionados ocurre, las inferencias posibles en las que participan esos elementos se verá modificada y el sujeto tendrá la posibilidad de construir explicaciones o predicciones diferentes a las que podía realizar anteriormente. Si este proceso implica conciencia de las transformaciones entonces, el sujeto, podrá percatarse de las ventajas de sus nuevas representaciones. Cuando ocurre que el sujeto se da cuenta de las nuevas interpretaciones y explicaciones, puede entonces comenzar un proceso de reconocimiento de las limitaciones de sus elementos previos y reconocer, por ejemplo, inconsistencias y contradicciones.

Este proceso no puede pensarse como una secuencia lineal, debido a que la transformación conceptual ocurre en forma evolutiva compleja en donde puede percibirse que, para ciertos casos, parece haber una comprensión y utilización de conceptos en forma acertada, sin embargo, en otros casos parece que no ha habido transformación en absoluto. Es importante reconocer, como lo han apuntado la mayoría de los autores analizados en este capítulo, que la transformación conceptual es un proceso complejo, con inconsistencias, integraciones y, en buena medida no consciente; esto es, no dirigido intencionalmente por el sujeto que aprende. Esta afirmación se infiere de otros modelos evolutivos como el piagetiano, los neopiagetianos o los cognoscitivos.²³ Sin embargo, para determinar con mayor precisión algunos aspectos de los procesos involucrados en el cambio conceptual, como es propuesto a través de los modelos parciales posibles, se requiere de una investigación específica lo cual no es motivo de este trabajo y queda

²³ En el caso de la psicología genética, la integración de estadios por medio de invariantes funcionales, no se da de manera lineal, sino en un proceso complejo que Piaget denomina toma de conciencia. Piaget, J. (1981) *La toma de conciencia*. Editorial Morata. Madrid. En el caso de los trabajos neopiagetianos se puede mencionar el de Case, Okamoto & Henderson (1993) Individual Variability and Consistency in Cognitive Development: New Evidence for the Existence of Central Conceptual Structures. en Case & Edelman (eds) *The New Structuralism in Cognitive Development*. En el caso de los modelos cognoscitivos los modelos conexionistas son un buen ejemplo.

como una de las posibles consecuencias para la investigación de la propuesta como se apuntará en el siguiente capítulo.

Analicemos ahora cada uno de los factores de transformación de los modelos parciales posibles:

Transformación de los elementos de CC o RC. Por transformación de los conceptos constrictores o de las reglas de correspondencia, se va a entender que el sujeto a partir de una concepción construye otra que la sustituye, esto es, que una idea previa como *que el movimiento siempre ocurre en la dirección de la fuerza aplicada*, se sustituye por otra concepción. Sustitución no implica, como se ha analizado en este capítulo, un proceso simple, por el contrario, requiere, que el sujeto, pueda formular una representación alternativa lo cual tiene que ver con todo un desarrollo conceptual y estructural.

El caso más simple dentro de este proceso de transformación puede ser la negación, así en el ejemplo mostrado la negación sería que *el movimiento no necesariamente ocurre en la dirección de la fuerza aplicada*. Esto, como puede apreciarse, dará como resultado interpretaciones distintas y puede hacer la diferencia entre una mecánica del movimiento de sentido común y una galileana o newtoniana.

En otras ocasiones la negación no es la modificación adecuada y se requerirá de la **inclusión de un nuevo cc o rc**. Esto significa, lograr que el estudiante construya o acepte una formulación nueva, por ejemplo, siguiendo con el caso del movimiento, la inclusión de la afirmación *la dirección del movimiento será el resultado de los movimientos ortogonales* que proporciona una mejor descripción de las posibles trayectorias de un objeto en movimiento.

En el caso de una **nueva jerarquización**, se pueden presentar, al menos, dos posibilidades. Una que un cc o rc cambie de categoría, esto es, que una consideración que en principio correspondía por ejemplo al conjunto CC, con una nueva interpretación y/o condiciones, pase a formar parte de RC o viceversa. Otra, que sea un elemento que deja de utilizarse y aunque sigue presente en el conjunto inicial, no es ya relevante para las inferencias que los sujetos realizan.

Como puede apreciarse, la modificación de un solo elemento (principalmente un concepto constrictor) puede introducir una representación completamente diferente de los procesos físicos en el sujeto. Sin embargo, en términos de la teoría física, eso no será suficiente, puesto que puede darse el caso, como en el ejemplo anterior, que con relación al movimiento y la fuerza se pase de una visión intuitiva a una newtoniana, pero manteniendo otras concepciones como por ejemplo: *un objeto adquiere la fuerza que se le aplica* elemento que dará lugar a inconsistencias en una visión newtoniana.

Las situaciones descritas que también se presentan en el aula, impiden la comprensión de los modelos de la física en su sentido amplio y refuerza el conocimiento por separado (*Knowledge in pieces*) lo que no favorecerá el aprendizaje. Por ello, será necesario que el proceso de transformación conceptual se lleve a cabo con la transformación de los elementos necesarios para pasar de una representación a otra. Esta transformación, en su conjunto, no es simple y no se da sino después de que el sujeto ha tenido una larga serie de procesos de modificación de sus cc y rc y los puede utilizar de

manera sistemática y generalizable, esto es, usando los términos de la psicología cognoscitiva; pasar de novato a experto.

Para mostrar con detalle cómo los modelos parciales posibles describen el cambio conceptual entendido éste en los términos a los que nos hemos referido, se analizará el modelo parcial posible de los gases. Aunque la demostración se puede realizar con cualquiera de los modelos desarrollados en el capítulo precedente, se ha seleccionado el de los gases porque presenta características que lo hacen especialmente interesante. Por un lado, se tiene abundante información de lo que piensan los estudiantes en las entrevistas del proyecto de investigación sobre fluidos que desarrollamos²⁴ y porque presenta una importancia histórica especial como se muestra en el trabajo de L. Gallegos²⁵ en el que se hacen notar las etapas correlativas entre la historia del concepto de presión y el que desarrollan los estudiantes. El análisis histórico aporta elementos conceptuales y estructurales para comprender el paso de los modelos parciales posibles de los estudiantes a los modelos posibles de la Física.

El modelo parcial posible para los gases designado como M_{ppG} fue definido como:

$CC := \{ cc_1, cc_2, cc_3, cc_4, cc_5, cc_6 \}$

cc_1 = El comportamiento de los objetos depende de su sustancia.

cc_2 = Si las características del objeto no cambian, su comportamiento es invariable.

cc_3 = La presión es una fuerza.

cc_4 = La presión actúa en todas direcciones.

cc_5 = En el vacío no hay gravedad.

cc_6 = En el vacío el peso de los objetos no cambia.

$RC := \{ rc_1, rc_2, rc_3, rc_4, rc_5, rc_6, rc_7 \}$

rc_1 = En el vacío la presión jala a los objetos.

rc_2 = La presión tiene diferente magnitud en cada dirección.

rc_3 = El aire atrapado ejerce presión.

rc_4 = La fuerza o presión se transmite en el aire.

rc_5 = El aire presiona los objetos hacia arriba.

rc_6 = El aire atrapado empuja a los objetos.

rc_7 = La presión sobre los objetos es más grande en objetos pesados.

Para tener presente el referente de la física escolar a la que se quiere llegar, se presenta a continuación el modelo desarrollado en el capítulo II. A este modelo que designaremos como M_{pF} (modelo posible de fluidos) lo definiremos como:

²⁴ Flores F. et al. (1993) Op. cit.

²⁵ Gallegos Leticia (1998) *Formación de conceptos y su relación con la enseñanza de la física*. Tesis de Maestría. UNAM.

CC:= { $cc_1, cc_2, cc_3, cc_4, cc_5$ }

cc_1 = Un elemento unitario de fluido es un volumen diferencial que tiene asociada de manera intransferible una densidad $\rho = m/V$.

cc_2 = En un líquido, la densidad es constante y el fluido es incompresible.

cc_3 = En un gas, la densidad es variable, pero siempre mayor que cero y el fluido es compresible.

cc_4 = Toda modificación en las condiciones del elemento unitario de fluido son debidas al cambio de la presión interna.

cc_5 = En los líquidos, cualquier aumento de presión se transmite en todo el fluido con el mismo valor.

RC:= { $rc_1, rc_2, rc_3, rc_4, rc_5$ }

rc_1 = Los objetos flotan cuando el peso de los mismos es igual a la suma de presiones en el área del objeto.

rc_2 = La presión es función de la profundidad según la relación $p_2 = p_1 + \rho g h$.

rc_3 = En un gas la relación $p = \rho cte$.

rc_4 = Todo objeto o sustancia en un fluido está sujeto a la presión interna del fluido.

rc_5 = Cuando dos sustancias tienen la misma presión, se encuentran en equilibrio.

Ambos modelos nos marcan sus semejanzas y diferencias proporcionando una primera orientación acerca de las modificaciones que debe sufrir M_{ppG} , para acercarse a M_{pF} . Para dar cuenta de un proceso posible de transformación se partirá de un problema que presentan los estudiantes como idea previa y que ha sido también un elemento importante en la historia de la física. Se trata del problema del vacío.

En las ideas previas de los estudiantes, el vacío tiene propiedades como la de jalar o empujar como se mostró en el capítulo III (página 152) ante el problema del dardo que se une al vidrio, una de las interpretaciones más comunes es que, debido a que se forma un vacío entre el dardo y el vidrio, la acción de ese vacío es la que los mantiene unidos. Otro ejemplo común es cuando se succiona un líquido por un popote. En ese caso, los estudiantes atribuyen que el líquido sube por el popote debido a que es jalado por el vacío que se forma al succionar el aire que hay previamente en el popote. Este problema tiene su paralelo en la historia de la física y junto con otros problemas semejantes, dará origen a la presión atmosférica. La explicación que se daba a este problema no era, como en el caso de los estudiantes, en términos de jalar o empujar, sino en la imposibilidad del vacío, esto es, en la naturaleza no podía existir el vacío (*horroris vacui*). Sin embargo, aunque la existencia del vacío es una importante diferencia entre las explicaciones de los estudiantes y la de los personajes de la historia, es hasta el Renacimiento, el mecanismo por el que se explicaban esos fenómenos era esencialmente el mismo que utilizaban los griegos. Esto es, debido a la reacción de la naturaleza para que no se forme el vacío, un líquido subirá por un popote o un objeto se mantendrá unido a otro (debe notarse que uno de los objetos

es liso y pulido como el caso del vidrio en los alumnos, semejante al caso de superficies pulidas en contacto que analizaban en la antigüedad).

En el proceso histórico se dio la transformación de las concepciones de imposibilidad u horror al vacío hacia el concepto de presión de un medio continuo a partir de los siguientes pasos²⁶

La naturaleza actúa para evitar que se forme el vacío.

El vacío puede existir en la naturaleza por lo que los fenómenos antes atribuidos a él deben tener un agente causal diferente.

El agente causal es el peso del aire.

El peso del aire es una fuerza. Los fenómenos pueden ser explicados por un equilibrio de fuerzas.

La presión interna en un fluido es ejercida por el fluido de su alrededor.

La presión interna en un fluido es ejercida en todas direcciones por el mismo fluido.

Como puede notarse, el primer paso que tuvo que superarse es el reconocimiento de la existencia del vacío, para después encontrar un agente causal que diera explicación a los fenómenos que antes se explicaban con la imposibilidad de su existencia. Sin embargo, el encontrar en el aire ese agente causal, llevó a la construcción de un concepto que en un principio estaba asociado al peso y que se convertiría, posteriormente, en un concepto que a diferencia del de fuerza no es direccional y que no es atribuible a la naturaleza misma del fluido. Esta transformación que ocurrió a lo largo de varios siglos, muestra cómo la negación de una concepción, en este caso un cc, puede desencadenar un proceso que requerirá de la construcción de nuevos conceptos y estructuras para ofrecer una nueva visión sobre los procesos físicos que intenta explicar.

En el caso que se está analizando sobre la transformación de las ideas de los estudiantes seguiremos un proceso semejante, mostrando las posibles transformaciones a los cc y rc de los estudiantes y haciendo notar las adecuaciones y nuevos elementos que serán necesarios para pasar de un modelo al otro.

4.3.1 Transformación de modelos representacionales para describir el cambio conceptual en las ideas de los estudiantes.

Tomemos como enunciado la explicación que los estudiantes dan de cómo ocurre que un dardo se mantiene unido a un vidrio. Las respuestas de los estudiantes fue designada (página 152) como

cc₃ X rc₁ f₂

²⁶ Gallegos (1998) Op.Cit pp 147 y 153. En este trabajo se muestra la transición de las ideas del vacío hasta el desarrollo del concepto de presión en los fluidos, dando cuenta de las etapas e interpretaciones que ocurrieron en diversos momentos en la historia de la física; poniendo especial énfasis en el proceso de cambio y en las condiciones conceptuales para que se diera.

La presión es una fuerza (cc_3); el vacío jala los objetos (rc_1), entonces el dardo se mantiene unido al vidrio (f_2)

Como los estudiantes no tienen problema en reconocer la presencia del vacío, entonces es necesario que se modifique su función, esto es, asignarle al vacío otro papel. En este punto las posibilidades que se tienen son las de transformación y de inclusión, debido a que una nueva jerarquización, sin un cambio precedente, no modificaría las explicaciones de los estudiantes. Si optamos por la transformación, entonces, parece evidente que habrá que empezar por quitarle atributos al vacío, la negación de rc_1 , en este caso parece ser suficiente, esto es $rc_1 =$ el vacío no presenta acción alguna sobre los objetos.

Con este cambio ya no sería posible hacer el razonamiento expresado en

$$cc_3 \text{ X } rc_1 \text{ f}_2$$

sin embargo, es posible sustituirlo por el razonamiento

$$cc_3 \text{ X } rc_3 \text{ f}_2$$

Este razonamiento se expresa como: la presión es una fuerza (cc_3); el aire atrapado jala (rc_3) entonces, el dardo queda unido al vidrio (f_2). Esto implicaría que el sujeto tiene que transformar todas sus explicaciones en términos del vacío como agente de cambio, por explicaciones donde el aire atrapado tome esa acción. Mientras se trate de la explicación del dardo parece que esta modificación es suficiente. Pero si ahora se intenta explicar por qué sube el agua por un popote, no se llegaría a ningún resultado satisfactorio porque cuando se succiona se quita aire.

La transformación que se requiere es ahora de rc_3 , sin embargo, esto no es como en el caso anterior una negación, implica el reconocimiento de que el aire (en general un fluido) ejerce presión como una característica propia de su constitución. Esta transformación puede venir como en el caso histórico, de reconocer que la atmósfera ejerce presión o, en su caso más elemental, fuerza sobre los objetos. Este reconocimiento implica además de la transformación un cambio de jerarquía, puesto que ahora se tiene una concepción que es de carácter general por lo que deberá pasar a formar parte de los conceptos restrictores.

Con las dos transformaciones hasta ahora, el modelo para los gases se transforma en M_{ppG}^2 :

$$CC := \{ cc_1, cc_2, cc_3, cc_4, cc_5, cc_6, cc_7 \}$$

$cc_1 =$ El comportamiento de los objetos depende de su sustancia.

$cc_2 =$ Si las características del objeto no cambian, su comportamiento es invariable.

$cc_3 =$ La presión es una fuerza.

$cc_4 =$ La presión actúa en todas direcciones.

$cc_5 =$ En el vacío no hay gravedad.

cc_6 = En el vacío el peso de los objetos no cambia.

cc_7 = El aire presiona a los objetos.

$RC := \{ rc_1, rc_2, rc_3, rc_4, rc_5, rc_6, \}$

rc_1 = El vacío no ejerce ninguna acción sobre los objetos.

rc_2 = La presión tiene diferente magnitud en cada dirección.

rc_3 = La fuerza o presión se transmite en el aire.

rc_4 = El aire presiona los objetos hacia arriba.

rc_5 = El aire atrapado empuja a los objetos.

rc_6 = La presión sobre los objetos es más grande en objetos pesados.

Con este nuevo modelo que se puede simbolizar como M_{ppG2} , se pueden llevar a cabo explicaciones e inferencias que resuelvan el problema que dio origen a esas transformaciones. Así, el problema del agua que sube por el popote puede resolverse como:

$cc_3 \text{ X } (rc_1 \text{ } rc_3) \text{ } f_3$

Razonamiento que se expresa como: la presión es una fuerza (cc_3), el vacío no ejerce acción sobre los objetos (rc_1) y el aire presiona los objetos (rc_3) entonces, al formar vacío, el agua sube por el popote porque es empujada por la presión del aire (f_3). El problema de dardo se resuelve de manera similar, al reconocer los estudiantes que el vacío no actúa y que es el aire que se encuentra alrededor el que lo hace.

Aunque el nuevo modelo M_{ppG2} tiene mayores posibilidades de representar mejor ciertos fenómenos físicos en términos de una explicación física satisfactoria, queda limitado a fenómenos donde se sustituyen las explicaciones del vacío por la presión atmosférica. Esto sin duda es un avance notable pero no suficiente para acercarse a un modelo físico como el presentado en M_{pp} .

Un segundo paso es reconocer que el vacío no tiene ninguna función en términos de conceptos constrictores y reglas de correspondencia, por lo que habrá de suprimirlos del modelo. Una vez realizado eso, será necesario atender a otras fenomenologías para forzar al modelo M_{ppG2} a generar explicaciones y ver su suficiencia interpretativa. Por lo pronto y atendiendo a la eliminación de elementos que no tienen ya ninguna función, el modelo se puede expresar como M_{ppG3} :

$CC := \{ cc_1, cc_2, cc_3, cc_4, cc_5 \}$

cc_1 = El comportamiento de los objetos depende de su sustancia.

cc_2 = Si las características del objeto no cambian, su comportamiento es invariable.

cc_3 = La presión es una fuerza.

cc_4 = La presión actúa en todas direcciones.

cc_5 = El aire presiona a los objetos.

RC:= { $rc_1, rc_2, rc_3, rc_4, rc_5$ }

rc_1 = La presión tiene diferente magnitud en cada dirección.

rc_2 = La fuerza o presión se transmite en el aire.

rc_3 = El aire presiona los objetos hacia arriba.

rc_4 = El aire atrapado empuja a los objetos.

rc_5 = La presión sobre los objetos es más grande en objetos pesados.

Es de esperar que los modelos se vayan reduciendo debido a que se van suprimiendo aspectos centrados en los objetos para establecer relaciones más generales.

La explicación de otros fenómenos como los relacionados con la flotación (por ejemplo de globos) llevará a la modificación de otros elementos. En especial, habrá que notar que los mayores cambios ocurren en los elementos de RC puesto que son los que expresan las relaciones funcionales que establecen los sujetos con los objetos. Así, experiencias con flotación podrán llevar a modificar reglas de correspondencia como rc_3 y rc_5 por una relación como: *la flotación de los objetos ocurre cuando el peso de los mismos es menor o igual a la presión que ejerce el fluido en el área del objeto por un lado y relaciones de equilibrio por el otro; como en la expresión: si las sustancias tienen la misma presión entonces se encuentran en equilibrio.* Por otro lado, relaciones con la direccionalidad de la presión en líquidos y gases, llevará a sustituir elementos como rc_1 por expresiones como: *las variaciones de presión se transmiten en todas direcciones.*

En cuanto a conceptos constrictores, paulatinamente se irán modificando aquellos que no tienen ninguna función en las explicaciones e interpretaciones como cc_1 y cc_2 , los cuales no necesariamente serán transformados o cambiados de lugar, podrían permanecer en un estrato potencial, pero que con el tiempo, se irán dejando fuera del modelo. Para fines prácticos, es conveniente ya no tomarlas en cuenta.

Con los cambios, reorganización jerárquica, eliminaciones y adiciones de concepciones se llega a un nuevo modelo M_{ppG4} .

CC:= { cc_1, cc_2, cc_3 }

cc_1 = La presión es una fuerza.

cc_2 = La presión actúa en todas direcciones.

cc_3 = El aire presiona a los objetos.

RC:= { $rc_1, rc_2, rc_3, rc_4, rc_5, rc_6$ }

rc_1 = Las variaciones de presión se transmiten en todas direcciones.

rc_2 = La fuerza o presión se transmite en el aire.

rc_3 = El aire presiona los objetos hacia arriba.

rc_4 = El aire atrapado empuja a los objetos.

rc_5 = Si las sustancias tienen la misma presión entonces se encuentran en equilibrio.

rc_6 = La flotación de los objetos ocurre cuando el peso de los mismos es menor o igual a la presión que ejerce el fluido en el área del objeto.

Este último modelo tiene elementos muy cercanos a la representación física si no se consideran los aspectos formales que definen relaciones matemáticas. Evidentemente, estas relaciones matemáticas no son derivables de las ideas presentadas en los modelos de los estudiantes; son relaciones que deberán ser introducidas y que cobrarán significado en función de su interpretación y su correlación con las cc y rc , presentadas (modificadas o no). Lo anterior no implica que los sujetos no puedan llegar a elaborarlas, pero se requiere de una guía experimental controlada para poder llegar a ellas, lo cual se dará sólo con acciones específicas que podrán llevarse a cabo en la escuela (por ejemplo, situaciones experimentales, actividades dirigidas sobre construcción de representaciones gráficas y algebraicas). No debe olvidarse que los estudiantes aunque presenta relaciones cercanas al proceso histórico, no tiene como problema principal ni es su fin último la explicación de los fenómenos físicos, por lo que no elaborarán por sí mismos relaciones matemáticas.

Los elementos que deberán ser introducidos en el modelo parcial posible y que corresponden a relaciones matemáticas o abstracciones teóricas como la partícula en mecánica y el elemento infinitesimal para los fluidos son:

Un elemento unitario de fluido es un volumen diferencial que tiene asociada de manera intransferible una densidad $\rho = m/V$

En un líquido, la densidad es constante y el fluido es incompresible

En un gas la relación $p = cte$

En un gas, la densidad es variable, pero siempre mayor que cero y el fluido es compresible.

Con la inclusión de estos últimos elementos en el modelo de los estudiantes, se tiene obtiene un modelo muy cercano al de la física escolar con prácticamente todo su potencial predictivo y explicativo.

Queda, sin embargo, un elemento del conjunto de conceptos constrictores que no se ha modificado hasta el momento y es el que identifica la presión con la fuerza. Esta idea previa, es una de las más complejas de modificar, no sólo se encuentra en los estudiantes de los ciclos básicos, sino también en los niveles superiores, en los textos y en muchos profesores - si bien operacionalmente no parece haber confusión al expresar la presión como $p = F/A$ (presión equivalente a fuerza entre área) - se presenta esta situación.

También en el proceso histórico se tiene que la presión fue identificada como una fuerza. La concepción de presión como una entidad física que determina el estado de la materia fue un proceso lento y complejo que comienza con la identificación, en los fluidos, de elementos abstractos e infinitesimales de fluido que se caracterizan por sus interacciones moleculares.

Como podrá notarse, para que en el modelo parcial posible, que caracteriza las concepciones de los estudiantes, se pueda sustituir la noción de presión como fuerza, por

la de presión como variable de estado, se requiere de un proceso complejo y de largo tiempo (tanto por su evolución histórica como por lo que toca a la construcción de los alumnos). La confusión radica principalmente en el carácter de acción que se asigna tanto a la presión como a la fuerza y a su relación matemática donde una queda en función de la otra ($F = p/A$ o $p = FA$) al menos en términos de valor absoluto²⁷.

Con los cambios últimos que se han realizado (sin tomar en cuenta el problema de la presión como fuerza), se tiene un modelo M_{ppG5} con los siguientes elementos:

$CC := \{ cc_1, cc_2, cc_3 \}$

cc_1 = Un elemento unitario de fluido es un volumen diferencial que tiene asociada de manera intransferible una densidad $\rho = m/V$.

cc_2 = La presión es una fuerza.

cc_3 = La presión actúa en todas direcciones.

cc_4 = El aire presiona a los objetos.

$RC := \{ rc_1, rc_2, rc_3, rc_4, rc_5, rc_6, rc_7 \}$

rc_1 = Las variaciones de presión se transmiten en todas direcciones.

rc_2 = La fuerza o presión se transmite en el aire.

rc_3 = El aire atrapado empuja a los objetos.

rc_4 = Si las sustancias tienen la misma presión entonces se encuentran en equilibrio.

rc_5 = La flotación de los objetos ocurre cuando el peso de los mismos es menor o igual a la presión que ejerce el fluido en el área del objeto.

rc_6 = En un gas la relación $p = cte$.

rc_7 = En un gas, la densidad es variable, pero siempre mayor que cero y el fluido es compresible.

Con este modelo se tienen, prácticamente, todos los elementos equivalentes a la física escolar y, por lo tanto, la misma potencialidad descriptiva y explicativa. La mayoría de los fenómenos cotidianos (sólo para el caso de la hidrostática) pueden tener explicación en términos de este modelo parcial posible. Esto lleva a un proceso de sustitución funcional, que el sujeto que ha llevado a cabo la transformación de su modelo inicial, tiene posibilidad de utilizar en cualquier momento.

La transformación de modelos que se ha mostrado es una transformación de las muchas que podrían llevarse a cabo puesto que no se puede definir un camino único. Es posible pensar en secuencias de transformación diferentes dependiendo de las acciones que se lleven a cabo, de los problemas a los que se enfrente el sujeto y, desde luego, a su capacidad de reinterpretación y estructuración de nuevos esquemas. Sin embargo, algunas

²⁷ La definición operacional de presión se suele poner en los libros como $p = F/A$, pero no se aclara a los estudiantes que en esta ecuación F es el módulo o valor absoluto, esto es que no tiene los atributos de direccionalidad del vector fuerza. Esto hace que la presión sea una cantidad escalar y no vectorial, por lo que es esencialmente distinta de la fuerza.

consideraciones generales sobre el proceso seguido pueden establecerse como parámetros que indiquen aspectos sobre los procesos de cambio conceptual derivados de la aplicación de los modelos parciales posibles.

4.4 Proceso conceptual de la transformación de modelos

En el proceso desarrollado para la transformación de modelos correspondientes a lo que puede denominarse cambio conceptual, es posible notar varios aspectos que dan cuenta de algunas características que son importantes para la transformación de los modelos.

En primer lugar debe notarse que no existe ningún orden para las acciones de transformación, jerarquización, eliminación y adición de elementos; sean éstos conceptos constrictores o reglas de correspondencia. Efectivamente, cada acción, estará condicionada por los requerimientos que el problema específico plantee y por el tipo y arraigo de las ideas previas en los estudiantes. Además, la acción también estará determinada por momentos reflexivos, en los cuales, los sujetos pueden percibir la insuficiencia de sus explicaciones o predicciones.

En segundo lugar debe notarse que la modificación del modelo, usualmente tiene origen en la insuficiencia de las reglas de correspondencia. Esto tiene sentido si se toma en cuenta que las reglas de correspondencia dan cuenta de las relaciones que los sujetos establecen con los parámetros físicos observables, esto es, con las características y/o condiciones que cumplen los objetos (sustancias) en un fenómeno físico. Esta caracterización en función de relaciones y condiciones, es el primer aspecto que muestra su insuficiencia ante fenómenos que no se ajustan a sus descripciones. Por ello, las primeras modificaciones tendrán lugar entre las reglas de correspondencia.

Aunque como se acaba de apuntar, las reglas de correspondencia son los primeros elementos afectados, no bastan para reestructurar de manera importante el modelo, puesto que aunque se modifiquen, no son los elementos fundamentales para las explicaciones y, lo más importante, no dan origen a síntesis, puesto que al modificarse, no necesariamente implica que otras reglas de correspondencia sean a su vez modificadas. Esto significa que la coexistencia es factible sin que se presente problema con relaciones que pudieran ser contradictorias en diversas circunstancias. Como ejemplo de lo anterior, está el hecho de transformar la acción del vacío pero no la del aire, como se mostró en el ejemplo de transformación del modelo parcial posible en gases.

En el caso de la modificación de conceptos constrictores, la situación es distinta, cuando esos elementos se modifican, dan lugar a cambios en reglas de correspondencia y también en otros conceptos constrictores. Esto implica que los conceptos constrictores como se apuntó en su definición en el capítulo II, tienen un papel fundamental como elemento explicativo y en general causal. Por otro lado, también, es importante resaltar que las transformaciones de conceptos constrictores dan lugar a procesos de síntesis y de integración.

Otro aspecto que es importante hacer notar, es que, conforme se avanza en la modificación de los modelos parciales posibles, llega un momento en que será necesaria la adición de nuevos elementos (conceptos constrictores y reglas de correspondencia) por su naturaleza compleja. Esa complejidad radica en ser constructos teóricos y matemáticos, que difícilmente serán construidos por los sujetos a partir de la reflexión de sus ideas previas y de notar la insuficiencia de esas ideas para la explicación de las nuevas situaciones fenomenológicas. Estos elementos que deberán ser introducidos en el proceso de enseñanza implican un proceso cognitivo complejo puesto que requieren también de síntesis e integración pero, además, de una reestructuración en el orden jerárquico de los elementos de los modelos, que en algunas ocasiones puede corresponder a un cambio ontológico como lo describe Chi²⁸.

Finalmente apuntaremos que si bien la transformación de los modelos parciales posibles implica el cambio conceptual en los estudiantes, no constituyen la explicación cognoscitiva del proceso de cambio. Sin embargo, como se puede deducir a partir de los modelos, nos proveen de posibles acciones para favorecer el cambio conceptual, lo cual puede notarse en el tipo de elementos del núcleo que es necesario transformar. El proceso de transformación de modelos descritos, también nos presenta elementos para interpretar los posibles momentos o transiciones que los estudiantes están llevando a cabo en su proceso interno de cambio conceptual, aspecto que se manifiesta en las explicaciones que pueden ser deducidas de los modelos transformados.

²⁸ M. Chi (1994) Op. Cit.

Capítulo V

IMPLICACIONES DE LOS MODELOS PARCIALES POSIBLES PARA LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y CONCLUSIONES

5.1 Implicaciones

El problema del aprendizaje de la ciencia y en su caso de la Física, es múltiple y complejo. Es múltiple porque implica que los sujetos construyan una visión, con condiciones específicas formales y operatorias, que les permita interpretar los procesos naturales que pueden percibirse o inferirse. La construcción de esa representación requiere que los sujetos interactúen e incorporen como elementos abstractos los observables físicos para, con ellos, llevar a cabo la elaboración conceptual de esquemas y modelos, dar significación a un sistema simbólico, compartir significados con una comunidad y desarrollar un sistema inferencial que les permita interactuar físicamente con la realidad.

Es complejo porque implica la elaboración de entes abstractos y de un marco conceptual donde éstos tengan significado y puedan relacionarse para elaborar explicaciones y predicciones. Lo anterior implica que el sujeto debe poner en juego todas las habilidades cognoscitivas y su sistema de creencias.

A la propia problemática conceptual del aprendizaje de los conceptos científicos hay que añadir otra serie de factores que dependen de la situación escolar como son las formas ineficaces de enseñanza, la deficiente formación docente, las concepciones erróneas o poco claras de los profesores y textos sobre ciencia, diseños curriculares enciclopédicos y programas curriculares mal estructurados, escasa oportunidad de interactuar de manera experimental con los temas de estudio, énfasis en los aspectos operatorios en detrimento de los conceptuales, insuficiente distribución de tiempo para las materias científicas, escasa información contextual sobre la ciencia, su importancia y sus procesos, un ámbito enrarecido que describe al científico y su quehacer de manera impropia y deformada y muchos aspectos más que contribuyen a que los temas científicos sean rechazados por los estudiantes, a pesar de la natural inclinación de los humanos por la comprensión de la naturaleza.

La investigación acerca de la enseñanza y el aprendizaje de la ciencia, ha abordado esta problemática, con especial énfasis en el aspecto cognoscitivo y ha puntualizado algunos de los problemas conceptuales que se presentan en el aprendizaje de la ciencia como se ha descrito en los capítulos sobre los modelos representacionales (capítulo I) y el cambio conceptual (capítulo IV). Esto no implica que otros problemas como los mencionados con respecto a la situación escolar no se consideren de suma importancia y que no existan investigaciones sobre esos tópicos, sin embargo, es notorio que el énfasis ha estado en el proceso de construcción y significación de los conceptos.

Entre los problemas que más se han destacado en los últimos años se encuentran: las ideas previas, los modelos representacionales (mentales y cognoscitivos), el lenguaje, la

interpretación de las ecuaciones y las gráficas, la solución de problemas y el cambio conceptual. Estos problemas han seguido, en general, caminos independientes de investigación, pero en fecha reciente, comienzan a integrarse sobre todo aquellos que tienen que ver con la representación, las ideas previas y el cambio conceptual. Son estos tres últimos aspectos los que se analizaron en este trabajo y a los cuales la propuesta de los modelos parciales posibles intenta integrar y describir por medio de un esquema que permita jerarquizar las ideas previas, dar sentido inferencial a las representaciones y dar una posible interpretación a los procesos de cambio conceptual, para mostrar, con mayor detalle, cómo es que los modelos parciales posibles contribuyen a comprender los problemas conceptuales de aprendizaje de la ciencia y las representaciones y formas de razonamiento que los estudiantes emplean para interpretar los fenómenos físicos.

Comenzare por describir cómo los modelos parciales posibles presentan una propuesta para mejorar la estructura y diferenciar las ideas previas, -evitando así, considerarlas equivalentes cuando, como se ha analizado, pueden representar concepciones de órdenes diversos de la misma forma que los conceptos científicos no pueden considerarse iguales en jerarquía y nivel teórico- los modelos representacionales y el cambio conceptual. Posteriormente, se harán algunas sugerencias de nuevos caminos de investigación y de aplicación para el mejoramiento de la enseñanza de la Física.

5.1.1 Aportaciones de los modelos parciales posibles a la comprensión de las ideas previas

Las ideas previas o comúnmente preconceptos, han sido investigados de manera abundante pero no consistente y lo que las hace reconocibles, es una idea intuitiva de que son las construcciones propias de los sujetos debido a su interacción con la realidad y con otros conocimientos compartidos socialmente.

En la mayoría de los casos¹ las ideas previas no pasan de ser una colección de ideas independientes, que en algunos campos como la mecánica, pueden articularse para presentar una visión coherente.

Las ideas previas también se han caracterizado porque no son modificadas por los cursos escolares y por ser impredecible cuándo se modifican. Pero además de estos aspectos, no se conocen más características de las ideas previas, salvo aquellas que han surgido a raíz de la investigación sobre cambio conceptual que se apuntaron en el capítulo IV y que se detallan en el anexo.

Uno de los aspectos que no se ha investigado lo suficiente, es si todas las ideas previas tienen el mismo papel en la construcción de representaciones e inferencias (predicciones y explicaciones causales) de los estudiantes. Este aspecto es de radical importancia porque no sólo proporciona una visión más clara sobre la estructura conceptual de los sujetos, sino que, permitiría conocer sobre qué ideas debe enfocarse la enseñanza para proponer situaciones de cambio conceptual.

¹ Se pueden mencionar los trabajos de recopilación de R. Driver, E. Guesne y A. Tiberghien (1985) *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press. También el de P.J. Fensham R.F. Gunstone y R.T. White (1994) *The Content of Science: A constructivist approach to its teaching and learning*. The Falmer Press London.

Determinar cierta jerarquización en las ideas previas de manera que permita conocer cuáles de esas ideas juegan un papel generador, no es en sí suficiente. Porque si bien, como ha sido propuesto por diversos autores entre ellos Ausubel² es necesario determinar ideas generadoras y ancla para el aprendizaje significativo, esto no es suficiente para una caracterización de las ideas previas que pretenda constituir un marco de referencia e inferencial, esto es, un conjunto mínimo de conceptos y relaciones entre conceptos suficiente para a partir de él, generar las representaciones y significaciones que den inteligibilidad a los fenómenos que los estudiantes observan y comparten socialmente. Aseverar que las ideas generadoras no son suficientes, tiene fundamento en que, una concepción no está aislada ni en cuanto a aspectos relacionales ni estructurales, por ello, no se puede hablar de un concepto generador sino en su caso de un proceso que implique transformaciones con otros conceptos y relaciones entre conceptos.

A este primer problema, sobre el papel de las ideas previas en la construcción de representaciones e inferencias, los modelos parciales posibles propuestos y desarrollados en este trabajo, dan respuesta con la construcción del conjunto Conceptos Constrictores (CC). En este conjunto, sus elementos tienen la función de ser ideas que cumplan con la posibilidad de ser los referentes sobre los cuales se construirán las explicaciones causales (similar a la red causal propuesta por diSessa descrita en el capítulo IV). Efectivamente, los criterios elaborados para que una idea previa pertenezca al conjunto CC, garantizan que ésta pueda ser utilizada como elemento primitivo sobre el cual construir otras ideas e interpretaciones. Además, el conjunto CC está formado por un conjunto finito de elementos que garantizan un conjunto mínimo de axiomas (que funcionan como tales para el sujeto) sobre los cuales fundamentar un marco de interpretación e inferencial que cubra una fenomenología específica.

En los ejemplos descritos sobre la construcción de inferencias en los campos de la mecánica sobre las fuerzas y el movimiento y de la estática de fluidos, puede notarse cómo los conceptos constrictores juegan el papel de ser la premisa verdadera sobre la que se sustentará la inferencia. Por ejemplo, las ideas de presión como fuerza o la de que los objetos adquieren ímpetus al ser sometidos a una fuerza, nos muestran cómo son consideradas por los sujetos como verdaderas para justificar sus interpretaciones, explicaciones y predicciones.

La caracterización de un conjunto de elementos que cumplen con esta propiedad de ser no solo generadores, sino axiomas (en el sentido utilizado, esto es, enunciados verdaderos para los estudiantes) nos lleva a replantear la investigación sobre ideas previas, en el sentido de ir más allá de la sola descripción y caracterización de las ideas de los estudiantes como ideas previas o preconceptos y buscar en los sujetos, conjuntos mínimos de esas ideas que expliquen la aparición de otras ideas previas como se mostró en el caso de las ideas previas sobre mecánica en el capítulo III, donde, a partir del modelo parcial posible elaborado, se dedujeron otras ideas previas que no pertenecen a los conjuntos del núcleo del modelo y que, sin embargo, son reportadas en la literatura sin ninguna distinción, en especial sin ninguna forma que les de organización. Esta sugerencia, se aplica sobre todo en áreas donde la investigación de las ideas previas a sido aún

² Ausubel D. (1978) Op. cit.

insuficiente o superficial como es el caso de la estructura de la materia, la termodinámica, las ondas y la física moderna.

Por otro lado, la determinación del conjunto CC a partir de las ideas previas contribuye a la determinación del tipo de concepciones que los sujetos construyen, mostrando que en ellas, los procesos de transformación conceptual tienen diversos niveles como se apuntará más adelante.

Otro de los problemas que se han presentado con las ideas previas, es su clasificación. Como se ha apuntado, la mayoría de las investigaciones sobre ideas previas, se limitan a determinar un listado o conjunto de tales ideas. Pero aún la identificación de algunas de esas ideas como generadoras y como conceptos constrictores, no es suficiente porque para el establecimiento de inferencias y relaciones que lleven a la descripción de los fenómenos, es necesario caracterizar las ideas previas que cumplan con esa función de relacionamiento. En este trabajo, se propone una distinción funcional de las ideas previas entre aquellas que cumplen con ser el conjunto mínimo de axiomas del sujeto, esto es, el conjunto CC y por otro lado, otro tipo de ideas cuya función es establecer relaciones entre aspectos fenomenológicos, que pueden ser condiciones iniciales o contextuales por un lado y, por el otro, variables del sistema o proceso natural. Estas ideas previas se han denominado como reglas de correspondencia y constituyen el conjunto RC.

En la comprensión de la construcción de nociones y conceptos la distinción entre conceptos constrictores y reglas de correspondencia, ayuda a representar cómo es que los estudiantes elaboran sus nociones, sobre todo atendiendo al aspecto de extraer consecuencias de observables físicos como los ejemplos descritos en capítulo III, pero también, en la interpretación de nuevos sucesos. Este último aspecto lleva a la pregunta siguiente: ¿Cómo incorporan los sujetos las nuevas experiencias y/o conocimientos a su estructura conceptual?

Los modelos parciales posibles, si bien no constituyen una respuesta formal a esa pregunta, sí permiten inferir que la respuesta podrá encontrarse en un análisis sobre los procesos de razonamiento que los sujetos elaboran con las reglas de correspondencia para articular esas nuevas experiencias o conocimientos y, posteriormente, reorganizar su estructura y atribuirle función de relacionamiento o bien de causalidad. Esto apunta hacia la investigación de mecanismos como los estudiados por Piaget, sobre las relaciones causales³. Así, la función de ciertas ideas previas como reglas de correspondencia, o en general, como relaciones funcionales, es otro de los aspectos que los modelos parciales posibles aportan para que sea un tema de investigación en el campo de las ideas previas.

5.1.2 Aportaciones de los modelos parciales posibles a la comprensión del cambio conceptual

El cambio conceptual, es en la actualidad, uno de los problemas de la enseñanza de la ciencia a la que mayor atención se está dedicando. Esto obedece principalmente a dos aspectos que pueden señalarse como los principales problemas:

³ Una excelente presentación de este problema en la obra de Piaget se encuentra en Silvie Parrat-Dayan (1998) La teoría de Piaget sobre la causalidad en Moreno M. Sastre G., Bovet M y Leal A. *Conocimiento y Cambio*. Paidós. Barcelona. pp 22-30

Insuficiencia de un marco teórico para interpretar el cambio conceptual.

Como se ha hecho notar en el capítulo IV, se ha puesto de manifiesto la falta de claridad teórica que si bien se ha comenzado a reconocer, está aún lejos de poder construir un marco psicológico y epistemológico que le dé sustento.

Incapacidad de incorporar los modelos de cambio conceptual a la práctica escolar de manera efectiva. Esto se traduce en la dificultad que se ha encontrado en aplicar las ideas y modelos sobre cambio conceptual a la situación escolar, esto es, en desarrollos de aplicaciones didácticas que den como resultado el cambio esperado.

En cuanto al aspecto de falta de un marco teórico, no es sólo problema de los planteamientos específicos sobre el cambio conceptual, sino que implica también, como ya se ha señalado, un marco conceptual insuficiente sobre las ideas previas. Por su parte la puesta en práctica de modelos didácticos para el cambio conceptual ha tenido escasos resultados, no sólo por la poca eficacia de las propuestas para lograr el cambio esperado, sino también, en las dificultades inherentes de reconocer cuando el cambio está en proceso o se ha dado.

Con relación al problema teórico, como fue abordado en el capítulo IV, las investigaciones se están encaminando a dilucidar los factores que implican el cambio conceptual, haciendo reflexiones epistemológicas y cognoscitivas sobre lo que significa el término concepto y sobre sus parámetros de cambio, lo cuál ha sido resumido en la pregunta ¿qué cambia en el cambio conceptual? Por lo que toca al problema práctico, los trabajos se están orientando hacia el estudio de los modelos representacionales de los estudiantes y a los parámetros de los mismos, que impliquen su transformación y por consiguiente, el cambio en la capacidad de representar los fenómenos físicos.

Los modelos parciales posibles presentan algunos elementos que pueden contribuir a la solución de los problemas planteados en torno al cambio conceptual. En primer lugar, se tiene la distinción entre conceptos constrictores y reglas de correspondencia que marca una diferencia conceptual importante en el papel que esos elementos tienen en la construcción de un marco de referencia teórico para el cambio conceptual.

En segundo lugar como se ha mostrado en el capítulo IV, el cambio conceptual se da principalmente en el conjunto CC, esto es, en aquellos elementos que son parte fundamental del esquema inferencial y causal de los estudiantes. Esto implica que si bien es posible, por diversos mecanismos y propuestas de enseñanza, lograr modificaciones en ciertas ideas previas, si éstas no son las que corresponden con los elementos de CC, entonces el cambio conceptual no se dará. Lo anterior contribuye a dar respuesta a la pregunta sobre lo que cambia en el cambio conceptual, indicando que deben cambiar aquellas concepciones de los estudiantes que cumplan con los criterios para pertenecer al conjunto de los conceptos constrictores. Desde luego que esto no indica ningún mecanismo de cambio, ni proceso sobre la construcción de las nociones del sujeto, pero contribuye a ubicar donde radican los elementos para el cambio.

Los conceptos constrictores, también abren un camino de investigación sobre el cambio conceptual al menos en dos sentidos. Uno, averiguando cómo es que ciertas nociones o ideas previas adquieren ese status de axiomas de sujeto y segundo, investigando sobre las modificaciones específicas y sus implicaciones en el conjunto de conceptos constrictores mínimos que constituyen el CC del núcleo del modelo.

En cuanto a los posibles procesos de cambio conceptual que orienten la acción didáctica, el desarrollo presentado en este trabajo, permite orientar los siguientes aspectos:

Orientar el cambio conceptual hacia los conceptos constrictores.

Reconocer que existen diversos mecanismos como transformación, jerarquización e inclusión para favorecer el cambio conceptual.

Presentar situaciones que lleven al sujeto a percibir la necesidad del cambio de concepción por medio de las explicaciones causales y de las inferencias sobre la predictibilidad de ciertos procesos naturales.

Construcción de modelos parciales posibles para determinar si el cambio que puede mostrar un sujeto debe ser considerado como cambio conceptual y no se trata simplemente de un cierto nivel de ejecución adecuada de los estudiantes ante situaciones especiales.

Estos aspectos, si bien no constituyen una metodología para el desarrollo de propuestas didácticas, si son elementos que permiten, primero, describir si el cambio conceptual está en proceso o ha ocurrido y, segundo, proponer elementos guía para la construcción de una propuesta didáctica sobre cambio conceptual. Estos elementos pueden tomarse también para orientar la investigación así como el reconocimiento del cambio.

Finalmente, apuntaremos que los modelos parciales posibles contribuyen a la comprensión de las dificultades en el aprendizaje de los contenidos científicos en términos de la posibilidad e imposibilidad que un sujeto tiene en un momento dado acerca de ciertos campos del conocimiento de la Física. La posibilidad porque permiten predecir e interpretar las explicaciones e inferencias que ante una situación fenomenológica los sujetos pueden elaborar, dan cuenta del nivel de estructuración de sus conocimientos, de los modelos que pueden construir acerca de ciertos fenómenos y sobre todo de las ideas previas que les son fundamentales para su imagen física de la realidad. La imposibilidad permiten dar cuenta de lo alejado que los sujetos pueden estar de las estructuras formales y/o escolares de la Física.

Por lo anterior es posible, con la construcción de los modelos parciales posibles, conocer si los elementos que hacen falta para que los sujetos lleguen a una mejor concepción científica, tienen que ver con su contexto o con la jerarquización de ciertas nociones. En el primer caso, indicará que será necesario reforzar las actividades experimentales para que los sujetos construyan más y mejores reglas de correspondencia y en el segundo, porque indica que no están siendo considerados ciertos conceptos constrictores como fundamentales para sus explicaciones causales. El hecho de conocer la estructura de la física que se enseña en la escuela - y por ende su organización temática -

y relacionarla con una descripción detallada de los CC y RC que representan una organización de las ideas previas de los estudiantes, puede apoyar al conocimiento de los principales problemas de la enseñanza de la ciencia.

5.1.3 Implicaciones de los modelos parciales posibles para la investigación en enseñanza de la ciencia

Limitaciones de los modelos parciales posibles. Antes de mostrar los posibles desarrollos en investigación que pueden derivarse de los modelos parciales posibles, es necesario hacer notar sus limitaciones. Los modelos parciales posibles no son modelos atribuibles a los sujetos, esto es, no intentan ser una descripción de lo que los sujetos construyen para representarse la realidad, por el contrario, son modelos para representar lo que los sujetos realizan como representaciones propias e inferencias. Esto significa que los modelos parciales posibles están orientados hacia la construcción de un marco teórico sobre la estructura del conocimiento. Ello puede notarse porque el semiformalismo empleado, es decir, el núcleo y las aplicaciones intencionales son trasladables desde las ideas de los sujetos hasta la formalización de las teorías físicas⁴. Ahora bien, este formalismo es aún parcial y no da cuenta de procesos epistemológicos como tampoco de los cognoscitivos, por lo que no puede considerarse como una teoría del conocimiento ni del aprendizaje. Tampoco da cuenta de la construcción de los conceptos particulares, sean estos teóricos o fenomenológicos para el caso formal y constrictores y de correspondencia para el caso de los estudiantes. En cuanto al mecanismo inferencial, se ha recurrido al mínimo posible, lo cual no indica que éste sea el potencial lógico de los sujetos. Sin embargo, el marco inferencial ha sido suficiente para el nivel de descripción que se ha requerido. Posiblemente, para la representación de estudiantes de otros niveles superiores y otros temas físicos, será necesario ampliar el marco inferencial con lógicas más complejas. También es de hacer notar que en el estado actual de desarrollo de los modelos parciales posibles, no es posible establecer vínculos entre los diversos campos de la Física, esto es, de establecer redes entre modelos que permitan construir - si es que es los sujetos lo hacen, lo cual es motivo actual de investigación - una visión integrada de la representación e interpretación que los sujetos pueden llevar a cabo entre distintas áreas de la Física en primer lugar y de la otros campos de la ciencia en segundo.

Una vez enunciadas las limitaciones que tiene aún el desarrollo propuesto en este trabajo, es posible apuntar algunas sugerencias que de él se derivan para la investigación. Unas serán derivadas de las propias limitaciones del actual desarrollo de los modelos parciales posibles y otras, apuntarán hacia otros campos de las ciencias cognoscitivas.

⁴ Este empleo de un semiformalismo para caracteriza el pensamiento de los sujetos, desde luego, tiene su origen en los trabajos de Piaget, sin embargo, hay que hacer notar una diferencia importante con lo aquí planteado. Esta diferencia consiste en que mientras el semiformalismo lógico de transformaciones y combinaciones de Piaget da cuenta de procesos intrínsecos a la construcción cognoscitivo y estructural del sujeto, los modelos parciales posibles dan cuenta de un semiformalismo trasladable y, por ende, comparable con el de la Física que se quiere que los sujetos comprendan.

5.1.4 Modelos *parciales posibles en otros campos de la Física*

Una de las líneas de investigación que se puede deducir, de manera evidente, es la aplicación de los modelos parciales posibles a otros campos de la Física. Esto no debe interpretarse como una aplicación que no representa dificultades, por el contrario, atendiendo a las diferencias estructurales entre las teorías físicas, es muy probable que los modelos, para su descripción y también para la descripción de las ideas y estructura de los conceptos de los estudiantes, tengan que sufrir modificaciones. Estas modificaciones pueden llevar a nuevas características de los modelos incluyendo una nueva categoría de conjuntos así como otras reglas de construcción lógica. Además, también se muestra la necesidad de ampliar los modelos aún en los mismos campos abordados en este trabajo, puesto que, por ejemplo, de la mecánica sólo se han abordado los aspectos de las fuerzas y el movimiento, haciendo falta todo lo referente a la energía, cuerpo rígido y gravitación. Por su parte en el caso de los fluidos, sólo se analizó la estática, quedando el muy complejo campo de la dinámica de fluidos.

5.1.5 *Redes de modelos*

El análisis del funcionamiento de los modelos parciales posibles a otros campos de la Física e incluso dentro de un mismo campo, obliga a reconocer la existencia de diversos modelos posibles, los cuales, para ofrecer una visión coherente del pensamiento de los sujetos, deberán articularse entre sí, esto es, construir redes de modelos. Sin embargo, esto no es trivial. La dificultad más importante se encuentra en las profundas diferencias entre las teorías físicas. Por ejemplo, la estructura de la mecánica y del electromagnetismo es muy distinta y encontrar los elementos que permitan ponerla en una red puede ser una tarea extremadamente compleja. Más aún, campos como la mecánica cuántica son irreductibles al formalismo de la mecánica clásica. Este problema se traslada al caso de los sujetos donde perciben aspectos como el movimiento alejados de la electricidad o el calor. Sin embargo, existen elementos mínimos de conexión que han permitido históricamente la interrelación de campos como la mecánica y el calor a través de la mecánica estadística por poner un ejemplo. De hecho, uno de los ideales de la Física es una teoría de campo unificado que logre integrar la gravitación con el electromagnetismo y las fuerzas nucleares.

Cuando se trata de un solo campo, las redes no sólo son posibles sino necesarias para una completa interpretación de los conceptos físicos. Por ejemplo, en el caso de la mecánica, se encuentra la relación entre la formulación newtoniana de fuerzas con la generalización que se hace con la energía y también con lo que se denomina mecánica del cuerpo rígido que trata del movimiento de los objetos con dimensiones. En el caso de los estudiantes, el establecimiento de estas redes de modelos para campos específicos, será de gran utilidad para dar una correcta dimensión a sus concepciones y representaciones físicas y apoyar los procesos de transformación y construcción conceptual.

5.1.6 *Modelos parciales posibles en otros campos de la ciencia*

Los modelos parciales posibles que han sido desarrollados, parten del formalismo de las teorías físicas, sin embargo, una vez reformulado el marco teórico para ser aplicado

al pensamiento de los estudiantes, se percibe la posibilidad de aplicarlo a otros campos de la ciencia. Esta posibilidad se manifiesta en que todas las ciencias desarrollan conceptos que cumplen con dos funciones básicas: la explicación y la descripción de los fenómenos. Así, en la explicación se crean conceptos básicos sobre los cuales las explicaciones tengan significado y en la descripción, se hace necesaria la clasificación y el establecimiento de relaciones entre los conceptos. Estas características permiten aplicar los modelos desarrollados en campos como la Química y la Biología. La aplicación, sin embargo, no es inmediata, requiere de adecuar los criterios para determinar los conceptos constrictores y las reglas de correspondencia, así como los procesos inferenciales. Esta adecuación es motivo de investigación en el campo, puesto que, los criterios que funcionan para una ciencia no corresponden a otra y la visión axiomática y jerárquica está en función de parámetros muy diferentes.

5.1.7 Los modelos parciales posibles en la investigación sobre solución de problemas

Otro de los campos que han sido motivo de investigación intensa, sobre todo en las dos últimas décadas es la solución de problemas. Estas investigaciones han partido del análisis de las diferencias entre expertos y novatos y han derivado en aproximaciones propias del campo, en las que se ponen en juego los modelos y la creatividad. Los modelos parciales posibles, si bien no se han enfocado a este campo, pueden ofrecer un apoyo a la investigación en lo que respecta a la descripción de los razonamientos posibles para interpretar e inferir qué llevan a cabo los sujetos. En efecto, la formulación de explicaciones y predicciones fenomenológicas por parte de los sujetos a partir de los elementos de CC y RC, permitirían enfocar la interpretación de los problemas a partir de las ideas previas con un sistema inferencial.

5.1.8 Los modelos parciales posibles y el cambio conceptual

Como se apuntó en el capítulo IV, uno de los problemas de investigación más complejos en la enseñanza de la ciencia es el cambio conceptual. Este tema tiene problemas desde su origen, en donde las preguntas ¿qué es el cambio conceptual? y ¿qué cambia en el cambio conceptual? siguen siendo válidas y están, en los últimos años, reorientando la investigación. Es precisamente en este momento que los modelos parciales posibles, con la posibilidad de descripción de las transformaciones de los núcleos pueden contribuir a este problema. Algunos de los aspectos que se pueden sugerir para la investigación de este problema a partir de los modelos parciales posibles han sido ya establecidos, pero otros más pueden surgir sobre todo en lo referente a la construcción de los conceptos físicos y su evolución en la estructura conceptual de los sujetos.

5.1.9 Los modelos parciales posibles y la historia de la ciencia

Uno de los campos de investigación que mayor atención ha recibido en fecha reciente es el de las implicaciones del análisis histórico de la ciencia en la enseñanza. Desde luego que este análisis histórico, está orientado a los problemas de construcción de los conocimientos científicos, desde un punto de vista constructivista y por consiguiente evolutivo. La caracterización de los modelos que se desarrollaron en cada época sobre la

evolución de las teorías científicas, es uno de los principales temas de investigación en este campo, debido a su relación posible con las construcciones de los estudiantes como se ha llevado a cabo en diversas investigaciones⁵. Los modelos parciales posibles, presentan para este tipo de trabajos la posibilidad de construir modelos posibles, que describan en términos estructurales e inferenciales los modelos teóricos desarrollados en distintas épocas y facilitar así, su correlación con el pensamiento de los estudiantes.

5.1.10 Los modelos parciales posibles y su relación con la inteligencia artificial

Aunque este campo de estudio no es reciente, el desarrollo del cómputo en la última década, ha favorecido enormemente su desarrollo. No sólo en el caso de programas inteligentes sino también en las redes neuronales. Uno de los principales problemas que abordan estos temas es el de la capacidad de simulación de inferencias a partir de conceptos y la manera en la que esos conceptos se organizan y permiten un aprendizaje tanto operacional como de relaciones entre conceptos. Los modelos parciales posibles, ofrecen un campo de desarrollo en lo referente a las posibilidades de construcción de programas de inteligencia artificial que partiendo de las clases de conjuntos CC y RC y determinadas reglas simples de inferenciación, permitan realizar deducciones semejantes a las que podrían llevar a cabo los estudiantes ante situaciones semejantes. Los modelos parciales posibles, ofrecen en principio, los elementos básicos para la construcción de programas de esa naturaleza, puesto que su estructura es trasladable a la de la programación.

5.2 Aportaciones de los modelos parciales posibles a la enseñanza de la Física

Los modelos parciales posibles, si bien han sido elaborados para contar con una representación semiformalizada de las concepciones y formas de inferencia de los estudiantes en torno a los conceptos físicos, tienen la intención de poder aplicarse a los procesos de enseñanza. En la etapa en la que se encuentran, como se ha visto en la sección anterior, requieren de investigaciones que amplíen su campo fenomenológico y su capacidad de explicación y predicción. Por consiguiente podría resultar prematuro indicar cómo pueden contribuir a los procesos didácticos. Sin embargo, es conveniente apuntar algunas directrices en las cuales los modelos parciales posibles podrán utilizarse para mejorar los procesos de enseñanza. Estas implicaciones pueden dividirse en dos grandes rubros; *implicaciones para la enseñanza escolarizada de los jóvenes* (incluyendo la enseñanza superior) y la *formación de profesores*.

En cuanto a la enseñanza escolarizada se puede apuntar la utilidad de los modelos parciales posibles al menos en los siguientes aspectos:

⁵ Basta recordar aquí los trabajos referidos de Neressesien y de Gallegos

- (a) Diseño de estrategias para la modificación de los elementos de CC y RC. Los elementos de CC y RC tienen distinta naturaleza y función. Mientras que los elementos de CC dan cuenta de los elementos abstractos y en cierto sentido axiomáticos en la representación física de los estudiantes, los elementos de RC atienden a los procesos de relación y función entre observables físicos. Por ello, las estrategias didácticas deberán ser diferenciadas para cada conjunto. Así, para los elementos de RC será necesario desarrollar estrategias de enseñanza centradas en el contexto y sus variaciones, esto es, en elaborar situaciones en las que los sujetos lleven a cabo experiencias fenomenológicas, orientadas de tal manera que le permitan construir nuevas reglas de correspondencia o modificar las existentes. Por su parte los elementos pertenecientes a los conceptos constrictores implicarán estrategias de enseñanza más orientadas a los aspectos reflexivos, de establecimiento de explicaciones causales, de articulación entre conceptos y de generar una visión de mayor alcance que la simple vinculación concepto *vs* fenómeno específico. También deberá notarse que para los elementos de CC, los cambios esperados deberán de ser de más largo plazo que los correspondientes al conjunto RC, por lo que requerirán de la planeación de procesos didácticos de mayor tiempo.
- (b) Planeación de actividades en función de posibles inferencias e interpretaciones de los estudiantes. Uno de los propósitos de los modelos parciales posibles es la reconstrucción y, en su caso, elaboración de posibles inferencias que los sujetos pueden hacer con los elementos del núcleo de los modelos. Esto implica que, en principio, es posible que se planeen situaciones de enseñanza en las que se prevea qué puede conceptualizar un estudiante ante una situación de enseñanza. Por ejemplo, una actividad experimental. Esta posibilidad, permitirá elaborar secuencias de actividades previniendo las posibles rutas que los estudiantes podrían seguir y que los llevaría a ciertas representaciones que les impedirían comprender adecuadamente los conceptos y relaciones físicas. Con ello se contaría con alternativas previamente elaboradas para corregir los problemas que se presenten.

Por lo que toca a la formación de profesores, los modelos parciales posibles pueden contribuir a generar en ellos, una concepción de enseñanza, en la cual, además de incorporar las ventajas de una visión constructivista, perciban que es necesario tomar en cuenta que las teorías científicas requieren de ciertos elementos y formalismos que son parte fundamental de su constitución y que, por consiguiente, en la enseñanza esto está presente no sólo en la Física, sino también en los estudiantes y que, los procesos de enseñanza (incluyendo la evaluación) deben tomar esto en cuenta y no centrarse en conceptos y relaciones específicas o individuales, sino en estructuras de pensamiento. Los modelos parciales posibles, también presentan la oportunidad de hacer notar a los docentes que en las ideas de los estudiantes, existe cierto nivel de estructuración y que sus inferencias, por absurdas que parezcan, tienen fundamento lógico y que sólo con argumentos y procesos que sean capaces de contraargumentar y sugerir otras posibilidades, se logrará cierto nivel de transformación conceptual.

Finalmente se puede apuntar, que los modelos parciales posibles, les proporcionan a los profesores un modelo que contribuye a que conozcan de un modo más profundo o explicativo, la dimensión cognoscitiva que utilizan los alumnos ante problemas determinados.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Entre los múltiples problemas que enfrenta la enseñanza de la ciencia es posible distinguir, al menos, dos niveles. Uno que aborda todos aquellos aspectos relacionados con las acciones propiamente educativas y que, por lo tanto, atiende al conocimiento didáctico en el cual, debe incluirse el conocimiento de las concepciones iniciales de los alumnos como es el caso de las ideas previas. El otro nivel, que puede denominarse "teórico", intenta dar cuenta de las representaciones posibles que permiten construir modelos acerca de cómo los estudiantes, interaccionan con el conocimiento, lo aprenden y utilizan para interpretar su realidad fenomenológica.

Dentro de este aspecto teórico de la problemática de la enseñanza de la ciencia, ha cobrado cada vez mayor importancia, el problema específico de construir una representación que de cuenta de las formas en las que los estudiantes construyen sus significados e inferencias, esto es, de cómo las ideas previas se estructuran y operan para construir sus nociones en torno a los procesos naturales y los conceptos científicos que se introducen en la escuela y llevar a cabo los procesos de cambio conceptual.

Como se ha mostrado en el primer y cuarto capítulos, los trabajos generales que intentan dar cuenta de la construcción del conocimiento como los modelos cognoscitivos (en especial la teoría de Piaget), los modelos mentales y las aproximaciones hacia el cambio conceptual, no dan cuenta de manera satisfactoria de este problema, sobre todo, en lo que respecta a la construcción de las nociones científicas.

Uno de los aspectos que no han sido analizados en la construcción de este tipo de modelos de representación, es su vínculo con la ciencia en sentido formal. Así, aunque, como se ha mostrado para el caso de la Física, hay aproximaciones que introducen aspectos epistemológicos e históricos, no incorporan, sin embargo, los elementos estructurales de las teorías físicas. Este aspecto, es importante, porque en el aprendizaje de la ciencia no sólo se deben tomar en cuenta los conceptos y principios, sino también, la estructura que los organiza y da significado. Es necesario recordar aquí que los conceptos físicos, no son entidades aisladas autosuficientes de contenido sino que, por el contrario, son entidades construidas dentro de una visión específica de la naturaleza y bajo reglas también específicas de manera que, sin ese conjunto, no tienen sentido y pueden prestarse a equívocos como los muestran las mismas ideas previas.

Los **modelos parciales posibles** que se proponen en este trabajo, son un intento por solucionar este problema. Así, ésta aproximación teórica, expresada en los modelos semiformalizados, constituye una representación que, bajo el formalismo que los define, es capaz de organizar de manera diferenciada las concepciones de los estudiantes (conceptos constrictores y reglas de correspondencia) bajo reglas precisas de clasificación, de un mecanismo operatorio inferencial y, sobre todo, de vincular esa representación de los estudiantes con la física escolar y con la física formal, logrando con ello un punto de partida operacional e interpretativo que permite tomar en cuenta la

estructura del conocimiento científico, tanto en su formalismo que lo caracteriza como en las aproximaciones que de él se hacen en los currícula escolares, cumpliendo así, con el propósito de este trabajo.

Para que los modelos parciales posibles cumplieran con los elementos que exigía una aproximación al problema de la representación de los alumnos, se partió - a diferencia de la mayoría de los trabajos analizados - del análisis del formalismo físico, tomando como base la teoría axiomática de conjuntos que se describe en el capítulo II. De esta teoría que tiene la característica de ser dinámica y de diferenciar entre tipos de conceptos (teóricos y no teóricos), resulta especialmente relevante que, bajo condiciones que pueden cumplir cualquier conjunto de concepciones (elementos), se pueda estructurar un semiformalismo operatorio, es decir, que permita la construcción de significados a partir de las relaciones entre el conjunto de concepciones bajo reglas de construcción simples. Esta aproximación permitió, en primera instancia, hacer un traslado de la física formal a la física que denominamos "escolar" y que si bien, no se expresa en forma axiomática, sí cumple con aspectos de coherencia interna como el ser estructurada en función de leyes, principios y reglas específicas que son consideradas como axiomas y que constituyen un formalismo equivalente a la física formal como se mostró en el capítulo II con el establecimiento de los modelos para la física escolar sobre los temas de las fuerzas y el movimiento y, la estática de fluidos.

Los modelos correspondientes a la física escolar, están más cerca de las representaciones que los estudiantes construyen y, por consiguiente, constituyen un punto de partida para la formulación de los modelos para interpretarlas. Para ello, ha sido necesario tomar en cuenta las diferencias en la formulación de los conceptos - los de la física escolar y los de los estudiantes - que serán considerados como axiomas para la construcción de las representaciones. Así, a partir de analizar las características que presentan las ideas previas y los requerimientos para la construcción de los modelos bajo la teoría de conjuntos, se estableció primero, la diferenciación entre las clases de concepciones que los estudiantes elaboran determinando los conceptos constrictores por un lado y las reglas de correspondencia por otro. Los conceptos constrictores constituyen la base axiomática del núcleo y tienen, entre otras, la particularidad de ser entidades no determinadas directamente de una relación empírica. Las reglas de correspondencia, por el contrario, se fundamentan en las relaciones empíricas y son la expresión de las relaciones que los sujetos pueden establecer de manera directa atendiendo sólo a las variaciones que pueden observar o prever de las variables identificadas de los fenómenos interpretados.

Posteriormente y tomando como punto de partida el trabajo de diSessa (1993), se estableció un conjunto de condiciones que cada uno de esos conjuntos debe cumplir. Estas condiciones constituyen una parte importante y sustancial del trabajo. Su importancia radica en que permiten clasificar el conjunto amorfo de ideas previas que se han reportado en la literatura especializada.

Para la operacionalización de los modelos parciales posibles, fue necesario establecer un mecanismo inferencial que, por un lado, no fuese complejo y por otro, estuviera lo más cercano a la descripción de las inferencias comunes que llevan a cabo los sujetos. Por ello, se decidió establecer un conjunto mínimo de operaciones lógicas bajo un esquema de producto cartesiano. Con ello, se logró dar flexibilidad a las operaciones

lógicas, en el sentido de poder poner en relación, elementos de las dos clases de conjuntos establecidas y tener, como contradominio, las situaciones empíricas, esto es, las descripciones y predicciones directamente observables y que bajo la estructura del semiformalismo propuesta se han denominado aplicaciones intencionales.

¿Qué aportan los modelos parciales posibles a la solución del problema que les dio origen? La aportación de los modelos parciales posibles se puede reconocer en los siguientes aspectos.

- a) Permiten establecer diferencias entre la naturaleza de las ideas previas o preconcepciones de los estudiantes. Con ello, se cuenta con al menos dos clases de ideas previas que tienen funciones específicas y que contribuye a conocer qué ideas son más fundamentales para la representación física de los sujetos y, con ello, evitar que las ideas previas sean tratadas bajo un parámetro común como a ocurrido con diversos modelos cognoscitivos y con propuestas para el cambio conceptual tanto teóricas como prácticas.
- b) Permite reproducir, en términos de los conceptos constrictores y las reglas de correspondencia, razonamientos posibles semejantes a los que presentan los sujetos ante una situación física particular, como se ha mostrado en el capítulo III, en cual, se ha podido describir, no sólo, ideas de los estudiantes ante un problema específico, sino también ideas previas reportadas en diversas investigaciones mostrando que, efectivamente, diversas ideas previas que se consideraban como fundamentales son el resultado de inferencias que hacen los alumnos a partir de otras, en este caso, de las pertenecientes al conjunto de los conceptos constrictores.
- c) Es posible prever construcciones - inferencias - que los estudiantes realizarían ante descripciones y explicaciones de fenómenos relacionados con el tema que describen los modelos parciales posibles. Esto tiene especial relevancia para la didáctica puesto que permite prever, ante posibles situaciones de enseñanza, lo que los estudiantes pueden interpretar. Con ello, se está en posibilidad de adelantar nuevas actividades de aprendizaje.
- d) Como se mostró en el capítulo II, la estructura básica de los modelos posibles permiten hacer el traslado entre la física escolar y la física formal y, por consiguiente, el paso de la física del estudiante a la física escolar.
- e) Este aspecto está relacionado estrechamente con el anterior puesto que ese paso posible de la física del alumno o mejor dicho, representación física del alumno hacia una física escolar, se presenta como un conjunto de posibilidades de transformación en el modelo de los estudiantes, esto es, indicios sobre posibles caminos para el cambio conceptual.

Estos aspectos que aportan los modelos parciales posibles, en su conjunto constituyen una nueva forma de representación de las ideas y formas de construcción de inferencias de los estudiantes que, al menos, para el campo analizado de la Física, promete ser fructífera y contribuye al debate teórico sobre las estructuras de conocimiento y el cambio conceptual.

En el campo de la didáctica, presenta la perspectiva de apoyar la anticipación de acciones de enseñanza orientadas a la transformación de las concepciones más fundamentales y complejas de modificar de los estudiantes. Esta posibilidad se establece porque los modelos parciales posibles identifican las ideas con las cuales los estudiantes construyen sus representaciones básicas, como lo muestra el conjunto de conceptos constrictores. Pero además, porque permite determinar lo cerca o lejos que está la representación de los estudiantes de la física escolar, comparando directamente los modelos parciales de los estudiantes con los de la Física que se espera aprendan.

Otro factor importante de apoyo al proceso de enseñanza, radica en la posibilidad que tienen los modelos parciales posibles de representar los cambios de interpretación ocurridos en el desarrollo histórico de la ciencia, con lo cual, se pueden desarrollar estrategias de enseñanza tomando el referente histórico como guía de la posible transformación conceptual de las ideas previas. Por último, los modelos parciales posibles permiten tener una visión de conjunto - conceptos y estructuras - que permitirá comprender las dificultades de los alumnos de manera más completa y no sólo por la ejecución de una actividad escolar, la solución a un problema operatorio o la evocación de leyes o enunciados.

Como toda propuesta de representación de conocimiento con perspectiva educativa, no es completa ni suficiente, los modelos parciales posibles requerirán de afinarse para otros campos de la misma Física y, desde luego, para otros campos científicos. También se deberá delimitar su intervalo de acción y la precisión de sus descripciones y alcances representacionales. En este sentido, será recomendable ampliar este estudio a otros campos temáticos y analizar su suficiencia.

Como se ha hecho notar el capítulo V, existen campos de ampliación de la propuesta y, de extensión de la misma, que deberán ser explorados para determinar sus límites y, en su caso, las transformaciones que deberán hacerse a la propuesta para mejorarla y que resuelva, de manera más completa y precisa, la representación de las nociones físicas de los estudiantes.

ANEXO

LAS IDEAS PREVIAS

Las ideas que los sujetos construyen para interpretar y explicar sucesos naturales cotidianos como la caída de un objeto, la flotación de un trozo de madera, el calentamiento de un objeto o tomar agua con un popote, han sido motivo de investigación debido a que, por un lado, son distintas a las explicaciones científicas y, por otro, no son simples ideas que se cambien al enseñar ciencia en la escuela.

La investigación sobre ideas previas tiene sus inicios hacia fines de los años setenta, cuando se encontró que estudiantes de diversos niveles, incluidos los universitarios, presentaban creencias no correspondientes con lo que se les había enseñado en los cursos de Física, a pesar de ser estudiantes regulares que habían desarrollado las habilidades requeridas para aprobar sus cursos.

Uno de los problemas inmediatos que surgieron en este tipo de investigaciones fue el del nombre y, por consiguiente, concepción que debía darse a esas ideas que presentan los sujetos. Diversos enfoques y designaciones fueron apareciendo, indicando el tipo de investigación y la visión del investigador sobre la construcción del conocimiento. Como Gallegos¹ (1998) apunta: “Existe en la literatura gran cantidad de términos sobre las concepciones alternativas, los esquemas de representación y las ideas que subyacen a las presentaciones teóricas; sin embargo, estas diferencias en la terminología tienen implicaciones epistemológicas y psicológicas adoptadas por los autores. Así por ejemplo, la definición de preconcepciones desde la perspectiva de Piaget es entendida como construcciones no generalizables radicadas en los atributos particulares, mientras que desde la perspectiva de Ausubel se entiende como resultado de una organización no correcta de la información en cuanto a los atributos relevantes de los conceptos”.

Uno de los términos que más se utilizó al principio fue el de “errores conceptuales”, sin embargo, con el reconocimiento de que esas ideas tenían ciertos elementos de sistematicidad y capacidad explicativa, sus denominaciones fueron cambiando por las de “preconcepciones”, “concepciones alternativas”, “teorías de los niños”, “teorías en acción”, etc.

En este trabajo se ha preferido utilizar el término ‘ideas previas’ para denotar esas concepciones. La razón es que el término da cuenta de que son ideas que el sujeto elabora y que no han sido transformadas por algún proceso educativo específico, por ejemplo, una estrategia de enseñanza para el cambio conceptual. No se adopta el término probablemente más difundido de ‘esquemas alternativos’, porque, como se ha mostrado en el trabajo, las ideas de los estudiantes no constituyen explicaciones articuladas en sí mismas, como para ser consideradas alternativas a un campo o dominio de conocimiento, por restringido que éste sea.

¹ Gallegos L. (1998) Op. cit.

La investigación sobre ideas previas ha intentado dar respuesta a las siguientes preguntas principales.²

- ¿Cuáles son las ideas que tienen los alumnos?
- ¿Cuáles son los elementos que contribuyen a su formación?
- ¿Cómo se representan en la mente de los alumnos?
- ¿Cómo se pueden cambiar esas ideas?

Estas investigaciones, como ha sido señalado en los capítulos del trabajo, han dado origen a diversas concepciones, representaciones y tipos de investigación, en especial las relativas a la representación (modelos cognoscitivos) y al cambio conceptual.

En el caso de la investigación de ideas previas en Física, ésta ha sido extensa como puede mostrarse en la recopilación llevada a cabo por Pfund H y Duit R.³ de 1994 en la que “se reportaron 914 trabajos referentes a las concepciones de los estudiantes; 430 sobre aspectos instruccionales utilizando las ideas de los estudiantes y 39 sobre concepciones de los profesores”.⁴ Esta abundancia de investigaciones muestra el impacto que para la enseñanza de la ciencia ha representado la investigación sobre la nociones o ideas previas.

Los temas en los que se encuentran la mayoría de las investigaciones sobre ideas previas en Física⁵ son los siguientes:

- Fuerza, movimiento y gravedad
- Calor y temperatura
- Luz
- Teoría de partículas
- Densidad
- Conceptos de carga y corriente eléctricas, circuitos eléctricos
- Aire y presión
- Ideas sobre cuerpos celestes.

Las investigaciones sobre ideas previas han mostrado ciertas características generales que las hace especialmente útiles para el análisis de los problemas que presenta la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias. Siguiendo lo expuesto por Gallegos (1998), estas características se presentan a continuación.

² Las ideas que se enlistan son tomadas principalmente de Pozo. J. I., Gómez Crespo M. A. Limón M., Sanz Serrano A., (1991) *Procesos cognitivos en la comprensión de la ciencia: las ideas de los adolescentes sobre química*. C.I.D.E. Madrid.

³ Pfund H. y Duit R: (1994). *Bibliography students' alternative frameworks and science education*. IPN: Kiel University.

⁴ Gallegos L (1998) Op. cit. p 7

⁵ La investigación sobre ideas previas se ha extendido a otras áreas científicas como la Química y la Biología principalmente, aunque actualmente es posible encontrar este tipo de investigación incluso en ciencias sociales.

- Las ideas previas son construcciones de los sujetos elaboradas en función de su interacción con los fenómenos cotidianos, sean estos individuales o colectivos. Esto implica que las ideas previas son formadas por las interpretaciones que los sujetos llevan a cabo a partir de la fenomenología que perciben y de la información que reciben sea en la escuela o por otro medio.
- En los trabajos transculturales que se han llevado a cabo, se muestra que las ideas previas, para fenómenos físicos, no presentan diferencias debido al contexto cultural. Así, es común que las investigaciones realizadas en diversos países, culturalmente muy diferentes, muestren ideas previas muy semejantes.
- Las ideas previas están relacionadas con los diversos niveles escolares, lo cual indica que si bien hay diferencias (no en todas las ideas previas, algunas persisten a través de todos los ciclos escolares) en cuanto al nivel escolar, las ideas previas de un mismo nivel son equiparables o iguales para todo contexto social o cultural.
- Los sujetos pueden presentar ideas previas contradictorias. Esto ocurre cuando ante fenómenos de características semejantes que físicamente se pueden explicar bajo los mismos principios y argumentos, los estudiantes generan ideas previas que son contradictorias, sin que el sujeto perciba la contradicción.
- Las ideas previas son el intento de los sujetos por identificar posibles eventos futuros en su entorno, por lo cual, requieren de hacer predicciones que, necesariamente, están basadas en su interpretación de acciones y experiencias propias.
- En varias ideas previas, es posible encontrar similitudes con las ideas que se encuentran en la historia de la ciencia. Esto que en un principio se tomó como un paralelismo entre las ideas de los estudiantes y el desarrollo histórico de la ciencia ha cambiado, contando en la actualidad con diversas líneas de investigación en torno a la construcción de las ideas previas y los aspectos históricos.
- Las ideas previas son implícitas, esto es, no se puede pensar que son el producto consciente y razonado, logrado bajo una toma de conciencia, de la interacción de los sujetos con su entorno.

Finalmente, la investigación sobre ideas previas ha mostrado que es posible determinar algunas causas u orígenes de las ideas previas. Estas se pueden sintetizar en seis rubros⁶.

1. Las ideas de los alumnos se encuentran en buena medida reguladas por la percepción
2. La mayoría de las ideas previas tienen como referente los aspectos visibles de los fenómenos
3. Las ideas de los alumnos son dependientes de situaciones contextuales locales, esto es referidas al fenómeno observado.

⁶ Wandersee J. H., Mintzes J.J. y Novak J. D. (1994) *Research in Alternative Conceptions in Science*. En Gabel D. L. (ed) *Research Handbook on research on science, teaching and learning*. MacMillan Pub. New York

4. En general, los conceptos a los que aluden las ideas previas están indiferenciados, lo que implica poca precisión y por consiguiente uso poco consistente.
5. Las ideas previas son generadas principalmente a partir de situaciones de cambio y no de aquellas que presentan procesos estáticos o de conservación.
6. El razonamiento que se emplea en forma genérica para las ideas previas es causal directo, esto es, son inferencias simples que involucran una premisa y una conclusión.

Las ideas previas han tenido una gran influencia en la enseñanza de la ciencia en las últimas dos décadas. Esta relevancia radica, en parte, por el reconocimiento que las ideas previas aparecen como "obstáculos epistemológicos" en el sentido utilizado por Bachelard⁷ de ser elementos conceptuales necesarios de superar pero que, sin embargo, esa superación no depende sólo de la voluntad y capacidad de análisis de los sujetos, sino de lograr un cambio de visión profundo de algún sector de la representación física o científica en general. Esto ayuda a los profesores a explicar parte de sus fallidos intentos.

⁷ Bachelard G. (1982) *La formación del espíritu científico*. Ed. Siglo XXI, México

REFERENCIAS

- Anderson J. R., (1990) *Cognitive Psychology and Its Implications*. W.H. Freeman and Company, New York, pp 123-133
- Ausubel D. P., Novak J.D., Hanesian, H. (1978) *Educational Psychology. A Cognitive View*. Holt, Rinehart y Winston, New York.
- Bachelard, G., (1982) *La formación del espíritu científico: Una contribución a un psicoanálisis del conocimiento objetivo*. 10ª Edición, Siglo XXI, México
- Barral F.M. (1990) ¿Cómo flotan los cuerpos que flotan? Concepciones de los estudiantes. *Enseñanza de las Ciencias* 8, pp 244-250
- Benloch M. y Pozo J. I. (1996) What Changes in Conceptual Change?: From Ideas to Theories. en Welford, Osborne & Scott (Eds.) *Research in Science Education in Europe*. Flamer Press London. pp 200-211
- Bliss J. y Ogborn J. (1994) Force and motion from the beginning. *Learning and Instruction* Vol. 4, pp 7-25
- Bunge M. (1986) Teorías Físicas en Roller J. L. (Ed.) *Estructura y desarrollo de las teorías científicas*. Universidad Nacional Autónoma de México, pp 113-122
- Caravita S. and Halldén O. (1994) Re-framing the problem of conceptual change. *Learning and Instruction* Vol. 4, pp 89-111
- Case, Okamoto & Henderson (1993) Individual Variability and Consistency in Cognitive Development: New Evidence for the Existence of Central Conceptual Structures. en Case & Edelman (Eds.) *The New Structuralism in Cognitive Development. Theory and Research on Individual Pathways*. Karger New York. pp71-100
- Clement J. (1983) A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students. En Gentener & Stevens (Eds). *Mental Models*. Lawrence Erlbaum Associates, pp 325-339
- Clement J. Brown D. E. Y Sietsniam A. (1989) Not all preconceptions are misconceptions: finding "anchoring" conceptions' for grounding instruction on students' intuitions. *International Journal of Science Education* 11, pp 554-565

- Clough E. & Driver R. (1986) A study of consistency in the use of students' conceptual framework across different task contexts. *Science Education* 70, pp 473-496
- Champagne B. A., Gunstone F. R. & Klopfer E. L. (1985) Instructional consequences of students' knowledge about physical phenomena. En Leo, West & Pines (Eds). *Cognitive Structure and Conceptual Change*. Academic Press, pp 61-90
- Chi M. T.H. (1992) Conceptual Change within and across Ontological Categories: Examples from Learning and Discovery in Science. en R. Giere (Ed.) *Cognitive Models of Science*. Minnesota Studies in the Philosophy of Science Volume XV. University of Minnesota Press, pp 129-186.
- Churchland P. M. (1992). A Deeper Unity: Some Feyerabendian Themes in Neurocomputational Guise. En Giere R. (Ed.) *Cognitive Models of Science*. University of Minnesota Press, pp 342-366
- de Berg K. C. (1992) Students' thinking in relation to pressure-volume changes of a fixed amount of air: The semiquantitative context. *International Journal of Science Education Vol. 14*, pp 295-303
- De Boer G.E. (1991) *A History of ideas in Science Education. Implications for practice*. The Teacher College Press. Columbia University. New York
- diSessa A. & Sherin B. L. (1999) What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education. Vol. 20(10)* pp 1155-1191
- diSessa A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition En Gentener & Stevens (Eds.) *Mental Models*. Lawrence Erlbaum Associates, NJ, pp 15-34
- diSessa A. (1988) Knowledge in pieces. En Forman G. Y Pufall P. (Eds.) *Constructivism in the computer age*. Lawrence Erlbaum Associates Inc. Hillsdale, NJ, pp 49-70
- diSessa A. (1993) Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction. Vol. 10(2 y 3)*, pp 105-225
- Driver R., Guesne E. y Tiberghien A. (1985) *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press.
- Duchl R. (1990) *Restructuring Science Education*. The Teacher College Press, Columbia University
- Duchl R. & Erduran S. (1996) Modeling the Growth of Scientific Knowledge en Welford, Osborne & Scott (eds.) *Research in Science Education in Europe*. Flamer Press London. pp 153-165

- Dykstra D., Boyle C. F y Monarch I. A., (1992) Studying Conceptual Change in Learning Physics. *Science Education Vol. 76(6)*, pp 615-652
- Eckstein S. G. & Shemesh M. (1989) Development of children's ideas on motion: intuition vs. logical thinking. *International Journal of Science Education Vol. 11(3)*, pp 327-336
- Fensham P.J., Gunstone R.F. y White R.T. (1994) *The Content of Science: A constructivist approach to its teaching and learning*. The Falmer Press London.
- Finegold M. & Gonsky P. (1991) Students' concepts of force as applied to related physical systems: A search for consistency. *International Journal of Science Education Vol. 13(1)*, pp 97-113
- Fischbein E., Stavy R. & Ma-Haim H. (1989) The psychological structure of naive impetus conceptions. *International Journal of Science Education, Vol. 11(1)*, pp 71-81
- Flores F., Gallegos L., Covarrubias H., Vega E., Rosas, M., García B., Alvarez, M., Díaz de León, S. M. Lísarraga P. & Meza. A. (1993) Partially possible models and concept formation, in predegree students' concepts *Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Cornell University (versión en diskette y red)
- Flores F. Gallegos L. García B. Covarrubias H., Vega. E. (1993) Reporte de *Investigación Las ideas de los estudiantes sobre presión y flotación*. Proyecto PAPIME. Centro de Instrumentos UNAM.
- Flores F. y Gallegos L. (1993) Consideraciones sobre la estructura de las teorías científicas y la enseñanza de la ciencia. *Perfiles Educativos Vol. 62*, pp 24-30
- Flores F. y Gallegos L. (1998) Partial Possible Models: An Approach to Interpret Students' Physical Representation. *Science Education Vol. 82*, pp 15-29
- Flores F., Gallegos L., Vega. E., y Servín D. (1991) *Razonamiento y cambio conceptual*. C. Ladera (Ed.) Proceedings. II Interamerican Conference on Physics Education. Caracas. pp 399-417
- Galili I. & Bar V. (1992) Motion implies force: where to expect vestiges of the misconceptions?. *International Journal of Science Education Vol. 14(1)*, pp 63-81
- Galili I. (1993) Weight and gravity: teachers' ambiguity and students' confusion about the concepts. *International Journal of Science Education Vol. 15(2)*, pp 149-162

- Gallegos L. (1998) *Formación de conceptos y su relación con la enseñanza de la física*. Tesis de Maestría, UNAM.
- Giere (ed.) *Cognitive Models of Science*. Serie Minnesota Studies in the Philosophy of Science. University of Minnesota Press, 1992
- Glynn S. M. & Duit R. (1995) Learning Science Meaningfully: Constructing Conceptual Models en Glynn & Duit (Eds.) *Learning Science in the Schools: Research Reforming Practice*. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, N.J. pp 3-33
- Greca I. M y Moreira M. (1998) Modelos mentales, modelos conceptuales y modelización. *Caderno Catarinense de Ensino de Física Vol. 15(2)* pp 107-120
- Halloun I. A. & Hestenes D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics Vol. 53(11)*, pp 1056-1065
- Hestenes D., Wells M. & Swackhamer G. (1992) Force Concept Inventory. *The Physics Teacher Vol. 30*, pp 141-158
- Hewson M. (1985) The acquisition of scientific knowledge: Analysis and representation of student conceptions concerning density. *Science Education vol 70* pp 160-170
- Hewson P. W. (1990) La enseñanza de fuerza y movimiento como cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias Vol. 8(2)*, pp 157-171
- Inhelder B. y Piaget J. (1972) *De la lógica del niño a la lógica del adolescente*. Ed Paidós. Buenos Aires
- Jhonson-Laird P. N. (1983) *Mental Models*. Cambridge Mass, Harvard University Press.
- Jhonson-Laird P.N (1990). Mental Models. En Posner M (Ed.) *Foundations of Cognitive Science*. MIT Press Cambridge, pp 469-499
- Kuhn T.S. (1962) *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. Fondo de Cultura Económica. México
- Kuhn T.S. El cambio de teoría como cambio de estructura: comentarios sobre el formalismo de Sneed. En Roller J.L. (Ed.) *Estructura y Desarrollo de las Teorías Científicas*. Universidad Nacional Autónoma de México pp 251-274
- Larkin J. (1983) The Role Problems Representation in Physics. En Gentner & Stevens (Eds.) *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers. N Jersey, pp 75-98

- McCloskey M. (1983) Naive Theories of Motion en Gentner & Stevens (Eds.) *Mental Models*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers New Jersey, pp 299-324
- McDermott L. (1984) Research on Conceptual Understanding in Mechanics. *Physics Today* 1984 (July), pp 24-32
- Moulines U. (1982) *Exploraciones Metacientíficas*. Alianza Editorial. Madrid
- Nersessian N. J. (1992) How Do Scientists Think? Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science. En Giere (Ed.) *Cognitive Models of Science*. Minnesota Studies in the Philosophy of Science Volume XV. University of Minnesota Press, pp 3-44
- Newell A., Rosenbloom P. & Laird J. (1990) Symbolic Architectures for Cognition en Posner (Ed). *Foundations of Cognitive Science*. MIT Press, Cambridge. pp 93-131
- Novak J. D. (1985) Metalearning and metaknowledge strategies to help students learn how to learn. En West & Pines (Eds.) *Cognitive Structure and Conceptual Change*. Academic Press. Orlando, pp 180-210
- Novak J. D. & Gowin B. D. (1984) *Learning how to learn*. Cambridge University, Cambridge Mass.
- Nowak G. & Thagard P. (1992). Copernicus, Ptolemy, and Explanatory Coherence. en Giere R.(ed.) *Cognitive Models of Science*. Minnesota Studies in the Philosophy of Science Volume XV. University of Minnesota Press, pp 274-309
- Ogborn J. (1985) Understanding students' understanding: An example from dynamics. *International Journal of Science Education* vol. 7(2) pp 141-150
- Parrat-Dayán S. (1998) La teoría de Piaget sobre la causalidad en Moreno M. Sastre G., Bovet M. y Leal A. *Conocimiento y Cambio*. Paidós. Barcelona, pp 22-30
- Pfund H. y Duit R. (1994). *Bibliography students' alternative frameworks and science education*. IPN: Kiel University. (versión en red)
- Piaget J. (1981) *La toma de conciencia*. Ediciones Morata, Madrid.
- Piaget J. (1969) *El nacimiento de la inteligencia en el niño* Ed. Aguilar, Madrid
- Piaget J. y García R. (1982) *Psicogénesis e historia de la ciencia*. Editorial Siglo XXI, México.
- Piaget J. y García R. (1989). *Hacia una lógica de significaciones*. Gedisa Editorial, México

- Piaget, Inhelder, Chollet-Levret, Dami, Mounoud, Robert, Rossel-Simonet y Vinh-Bang (1975) *La composición de las Fuerzas y el problema de los vectores*. Ediciones Morata, Madrid.
- Pozo. J. I., Gómez Crespo M. A. Limón M. y Sanz Serrano A., (1991) *Procesos cognitivos en la comprensión de la ciencia: las ideas de los adolescentes sobre química*. C.I.D.E., Madrid.
- Reif F. (1985) Acquiring an effective understanding of scientific concepts En West & Pines (Eds.) *Cognitive Structure and Conceptual Change*. Academic Press, Orlando. pp 133-151
- Rolleri J.L. (Ed.) (1986). *Estructura y Desarrollo de las Teorías Científicas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rollnick, M & Rutherford M. (1990). African primary schools teachers-what ideas do they hold on air and air pressure? *International Journal of Science Education Vol. 12*, pp 101-113
- Rollnick, M & Rutherford M. (1993). The use of conceptual change model and mixed language strategy for remediating misconceptions on air pressure. *International Journal of Science Education Vol. 15*, pp 363-381
- Rumelhart D. (1990). The Architecture of Mind: A Connectionist Approach. En Posner M (Ed.) *Foundations of Cognitive Science*. The MIT Press, Cambridge. pp 133-159
- Seré M.G. (1985) The gaseous state. En Driver, Guesne & Tiberghien (Eds.) *Children Ideas in Science*. Milton Keynes U.K., Open University Press.
- Simon H. y Kaplan C. (1990) Foundations of Cognitive Science. En Posner M (Ed.) *Foundations of Cognitive Science*. The MIT Press, Cambridge. pp 1-47
- Sneed J. D. (1979). *The Logical Structure of Mathematical Physics*. Reidel Publishing Co., Dordrecht.
- Sneed J.D. (1986) Problemas filosóficos en la ciencia empírica de la ciencia: un enfoque de teorías. En Rolleri J.L. (Ed.) *Estructura y Desarrollo de las Teorías Científicas*. Universidad Nacional Autónoma de México. pp 179-214
- Stegmueller W. (1979) A Combined Approach to the Dynamics of Theories. En Radnitzky & Andersson. (Eds.) *The Structure and Development of Science*. Reidel Publishing Co., Dordrecht, pp 151-186

- Stegmueller W. (1986) Cambio teórico accidental (no substancial) y desplazamiento de teorías. En Rolleri J.L. (Ed.) *Estructura y Desarrollo de las Teorías Científicas*. Universidad Nacional Autónoma de México, pp 215-250
- Suppes P. (1966). *Introducción a la lógica simbólica*. CECSA, México.
- Tiberghien A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*. Vol. 4, pp 71-87.
- Truesdell C. *Ensayos de Historia de la Mecánica*. Editorial Tecnos, Madrid.
- Viennot L. (1979) Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education* Vol. 1, pp 205-222
- Viennot L. (1985) Analyzing students' reasoning: Tendencies in interpretation. *American Journal of Physics* Vol. 53(5), pp 432-436
- Villani A. y Pacca I. (1990) Conceptos espontáneos sobre colisiones. *Enseñanza de las Ciencias* Vol. 8(3), pp 238-243
- von Pfuhl D.M.A. (1980). Notions of physical laws in childhood. *Science Education* Vol. 64, pp 59-84
- Vosniadou S. Y Ioannides C. (1998) From conceptual development to science education: a psychological point of view. *International Journal of Science Education*. Vol 20(10), pp 1213-1230
- Wandersee J. H., Mintzes J.J. y Novak J. D. (1994) Research in Alternative Conceptions in Science. En Gabel D. L. (Eds.) *Research Handbook on research on science, teaching and learning*. MacMillan Pub., New York.
- Williams M. D., Hollan J, D. y Stevens A. L.(1983) Human Reasoning About a Simple Physical System. En Gentner & Stevens (Eds.) *Mental Models*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, N Jersey pp 131-153
- Wittrock M. C. (1994) Generative Science Teaching. En P.J. Fensham; R.F. Gunstone y R.T. White. *The Content of Science: A constructivist approach to its teaching and learning*. The Falmer Press, London, pp 29-38.