

Aprender y enseñar ciencia.
Del conocimiento cotidiano al
conocimiento científico

Juan Ignacio Pozo Municio
Miguel Angel Gómez Crespo

EDICIONES MORATA, S. L.
Fundada por Javier Morata, Editor, en 1920
C/ Mejía Lequerica, 12 28004 – Madrid

Este material se utiliza con fines exclusivamente didácticos

CONTENIDO

PRESENTACIÓN.....	11
PRIMERA PARTE: Cómo aprenden los alumnos la ciencia	15
CAPÍTULO PRIMERO: ¿Por qué los alumnos no aprenden la ciencia que se les enseña?	17
La crisis de la educación científica, 18.— La construcción del conocimiento como nueva cultura educativa, 23.—La elaboración del conocimiento científico, 24.— El aprendizaje como proceso constructivo, 25.— Las nuevas demandas educativas en la sociedad de la información y el conocimiento, 27.—Las nuevas metas de la educación científica: de la selección a la formación, 29.	
CAPÍTULO II: Cambiando las actitudes de los alumnos ante la ciencia: el problema de la (falta de) motivación	33
La naturaleza de las actitudes como contenido educativo: de las actitudes y las normas a los valores, 35.— El aprendizaje y cambio de actitudes en la enseñanza, 37.— Los contenidos actitudinales en la enseñanza de la ciencia, 41.— ¿Cómo motivar a los alumnos para aprender ciencia?, 44.	
CAPÍTULO III: La adquisición de procedimientos: aprendiendo a aprender y hacer ciencia	51
La naturaleza de los procedimientos como contenidos de aprendizaje, 53.—Adquisición de procedimientos: de la técnica a la estrategia, 59.— La estructura procedimental del currículo de ciencias, 64.—La solución de problemas en la enseñanza de la ciencia, 70.—¿Pueden utilizar los alumnos el pensamiento científico?: el pensamiento formal y el aprendizaje de la ciencia, 75.	
CAPÍTULO IV: El aprendizaje de conceptos científicos: del aprendizaje significativo al cambio conceptual	84
Los contenidos verbales en el currículo: de los datos a los conceptos, 85.— ¿Tienen que aprender datos los alumnos?, 87.— La comprensión de conceptos: aprendizaje significativo y conocimientos previos, 89.— El origen de las concepciones alternativas, 96.— Origen sensorial: las concepciones espontáneas, 98.— Origen cultural: las representaciones sociales, 101.— Origen escolar: las concepciones analógicas, 102.— Las concepciones alternativas como teorías implícitas, 103.— Principios epistemológicos, 109.— Principios ontológicos, 111.— Principios conceptuales, 115.— De las teorías implícitas a las teorías científicas: ¿qué cambia en el cambio conceptual?, 119.— Cambio epistemológico, 121.— Cambio ontológico, 123.— Cambio en las estructuras conceptuales, 125.	
CAPÍTULO V: Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico: más allá del cambio conceptual	128
La hipótesis de la compatibilidad o la acumulación de saberes, 130.— La hipótesis de la incompatibilidad o el cambio conceptual, 134.— La hipótesis de la independencia o el uso del conocimiento según el contexto, 137.— La hipótesis de la integración jerárquica o los diferentes niveles de representación y conocimiento, 140.— Los procesos de construcción del conocimiento científico, 142.— El proceso de reestructuración, 142.— El proceso de explicitación progresiva, 144.— El proceso de integración jerárquica, 145.	
SEGUNDA PARTE: El aprendizaje de la química y la física	147
CAPÍTULO VI: El aprendizaje de la química	149
La química en la educación secundaria, 150.— Dificultades específicas en el aprendizaje de la química, 152.— La naturaleza de la materia como un sistema de interacción entre partículas, 156.— Cuando se utiliza el modelo corpuscular, 160.— Cómo se utiliza el modelo corpuscular, 162.— La representación de los diferentes estados de la materia,	

168.— La conservación de las propiedades no observables de la materia, 170.— Dificultades específicas para comprender la conservación de la materia, 175.— Conservación de la masa, 177.— Conservación de la sustancia, 179.— Las relaciones cuantitativas en química, 182.— Dificultades generales con la cuantificación, 185.— Las dificultades del cálculo proporcional, 187.— Los procedimientos para hacer y aprender química, 191.— Problemas cualitativos, 192.— Problemas cuantitativos, 195.— Pequeñas investigaciones, 198.— Procedimientos generales para el aprendizaje de la química, 201.

CAPÍTULO VII: El aprendizaje de la física205

La física en la educación secundaria, 205.— Dificultades específicas en el aprendizaje de la física, 210.— La energía, 214.— El problema de la interacción, 217.— El problema de la conservación, 220.— El problema de la cuantificación, 225.— Fuerza y movimiento, 227.— El problema de la interacción y el principio de la acción y la reacción, 230.— El problema del equilibrio y el principio de la inercia, 235.— El problema de la cuantificación y el principio fundamental de la dinámica, 237.— Electricidad y magnetismo. Los circuitos eléctricos, 241.— El problema de la interacción en los circuitos eléctricos, 243.— El problema de la conservación en los circuitos eléctricos, 248.— El problema de la cuantificación en el estudio de los circuitos eléctricos, 250.— Los procedimientos para hacer y aprender física, 252.— Problemas cualitativos, 253.— Problemas cuantitativos, 255.— Pequeñas investigaciones, 259.

TERCERA PARTE: La enseñanza de la ciencia263

CAPÍTULO VIII: Enfoques para la enseñanza de la ciencia265

La enseñanza tradicional de la ciencia, 268.— Supuestos y metas de la educación científica, 269.— Criterios para seleccionar y organizar los contenidos, 269.— Actividades de enseñanza y evaluación, 270.— Dificultades de aprendizaje y enseñanza previsibles, 272.— La enseñanza por descubrimiento, 273.— Supuestos y metas de la educación científica, 274.— Criterios para seleccionar y organizar los contenidos, 275.— Actividades de enseñanza y evaluación, 275.— Dificultades de aprendizaje y enseñanza previsibles, 277.— La enseñanza expositiva, 280.— Supuestos y metas de la educación científica, 280.— Criterios para seleccionar y organizar los contenidos, 281.— Actividades de enseñanza y evaluación, 282.— Dificultades de aprendizaje y enseñanza previsibles, 285.— La enseñanza mediante el conflicto cognitivo, 286.— Supuestos y metas de la educación científica, 286.— Criterios para seleccionar y organizar los contenidos, 287.— Actividades de enseñanza y evaluación, 288.— Dificultades de aprendizaje y enseñanza previsibles, 291.— La enseñanza mediante investigación dirigida, 293.— Supuestos y metas de la educación científica, 294.— Criterios para seleccionar y organizar los contenidos, 294.— Actividades de enseñanza y evaluación, 295.— Dificultades de aprendizaje y enseñanza previsibles, 296.— La enseñanza por explicación y contrastación de modelos, 299.— Supuestos y metas de la educación científica, 299.— Criterios para seleccionar y organizar los contenidos, 300.— Actividades de enseñanza y evaluación, 301.— Dificultades de aprendizaje y enseñanza previsibles, 304.— La integración de estos diferentes enfoques o los múltiples papeles del profesor, 305.

BIBLIOGRAFÍA309

ÍNDICE DE AUTORES323

ÍNDICE DE MATERIAS327

OTRAS OBRAS DE EDICIONES MORATA DE INTERÉS330

CAPÍTULO IV. EL APRENDIZAJE DE CONCEPTOS CIENTÍFICOS: DEL APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO AL CAMBIO CONCEPTUAL

Si un hotentote desea que se calme el viento, coge una de sus pieles más gruesas y la cuelga en el extremo de una pértiga, en la creencia de que, al tirar abajo de la piel, el viento perderá toda su fuerza y calmará.

JAMES G. FRAZER, *La rama dorada*

El electrón es una teoría que nosotros utilizamos; tan útil resulta para comprender el funcionamiento de la naturaleza que casi podríamos decir que es un objeto real.

R. P. FEYNMAN, *¿Está Ud. de broma Sr. Feynman?*

Una nueva teoría no se impone porque los científicos se convenzan de ella, sino porque los que siguen abrazando las ideas antiguas van muriendo poco a poco y son sustituidos por una nueva generación que asimila las nuevas desde el principio.

MAX PLANCK

Aunque los contenidos que hemos analizado en los capítulos precedentes están cobrando un peso creciente en las nuevas propuestas para la enseñanza de la ciencia, éstas siguen estando mayoritariamente articuladas en torno a los contenidos verbales, que siguen siendo el eje central de la mayor parte de los currículos de ciencias, no sólo de los que podríamos llamar tradicionales, sino incluso en buena parte de las propuestas renovadoras recientes. Durante cierto tiempo los Proyectos renovadores en la enseñanza de la ciencia estuvieron dirigidos a promover los procedimientos o procesos de la ciencia (véase para una reseña de esa evolución Caamaño, 1994). Sin embargo, los datos recientes de la investigación didáctica, que mencionamos al final del capítulo anterior, muestran que el uso de esos procedimientos sólo es eficaz si se dispone de conocimientos conceptuales adecuados. Pero, según intentaremos mostrar en este capítulo, son muchas las investigaciones que muestran que los alumnos no poseen ese tipo de conocimientos conceptuales, lo que ha llevado a reorientar las propuestas de investigación e innovación didáctica hacia la comprensión de los núcleos conceptuales básicos de la ciencia.

Sin embargo estas propuestas renovadoras, apoyadas en numerosos datos, asumen que esa comprensión es realmente difícil para los alumnos y por tanto requiere estrategias didácticas específicamente diseñadas para ello. El principal problema al que se enfrenta esa comprensión, como veremos a lo largo de este capítulo, es la existencia en los alumnos de fuertes concepciones alternativas a los conceptos científicos que se les enseñan, que resultan muy difíciles de modificar y que en algunos casos sobreviven a largos años de instrucción científica —como comentábamos en la Introducción algunas de ellas sobreviven, de una u otra forma, incluso entre los propios especialistas en el área. Por tanto, aunque sean un contenido *tradicional* en la educación científica, los conocimientos verbales requieren también un análisis de las dificultades que plantea su aprendizaje que nos ayude a encontrar formas de superarlas.

Los contenidos verbales en el currículo: de los datos a los conceptos

Aunque, como acabamos de señalar, los contenidos verbales han desempeñado casi siempre un papel central como eje estructurador, y posiblemente van a seguir desempeñándolo, hay diversas formas de entender esos contenidos verbales, o si se prefiere, distintos tipos de contenidos verbales, que conllevan diferentes formas de desarrollar el currículo de ciencias, tanto en su organización, como en las propias actividades de enseñanza, aprendizaje y evaluación que constituyen el trabajo diario en las aulas. De hecho, partiendo de una distinción ya establecida en los currículos (Coll, 1986), podemos diferenciar entre tres tipos principales de contenidos verbales: los datos, los conceptos y los principios. Un *dato* o un hecho es una información que afirma o declara algo sobre el mundo. El aprendizaje de la ciencia requiere conocer muchos datos y hechos concretos, algunos de los cuales se recogen en la Tabla 4.1. Parte de esos datos necesarios para aprender ciencia deben enseñarse en las aulas, pero otros son de conocimiento *público*, producto como veremos de la interacción cotidiana con los objetos. No hay que enseñar a los niños que los objetos no

soportados caen: es un hecho que conocen desde una edad sorprendentemente temprana, desde la cuna (Carey y Spelke, 1994).

TABLA 4.1. Algunos ejemplos de hechos o datos que pueden aprenderse en las clases de ciencias

- Las rocas están formadas por minerales
- El símbolo del cobre es Cu
- Las células se nutren, se relacionan y se reproducen
- La teoría de la evolución fue propuesta por Darwin
- La temperatura de ebullición del agua a la presión de 1 atmósfera es de 100 oC
- La densidad del agua pura es de 1 g/cm³
- El hielo se derrite
- El alcohol se evapora a temperatura ambiente
- Una distancia de 1 kilómetro equivale a 1.000 metros
- La aceleración que experimenta un cuerpo es directamente proporcional a la resultante de las fuerzas que actúan sobre él

Pero una cosa es tener un dato, conocer algo como un hecho y otra darle sentido o significado. Comprender un dato requiere utilizar *conceptos*, es decir relacionar esos datos dentro de una red de significados que explique por qué se producen y qué consecuencias tienen. Los bebés saben que los objetos no soportados caen, pero otra cosa es que sepan interpretar ese hecho. Conocer un dato nos permite, en el mejor de los casos, reproducirlo (un número de teléfono o la masa atómica del cadmio) o predecirlo (el objeto caerá o se detendrá, esas nubes presagian lluvia esta tarde), pero no darle sentido o interpretarlo. ¿Por qué no influye la masa en la velocidad con que caen los objetos? ¿Por qué se evapora el agua? ¿Por qué es mayor la masa atómica del cobre que la del hidrógeno?

Responder a estas preguntas requiere conocer otros hechos y sobre todo otros conceptos, por lo que interpretar o comprender un dato es más difícil que conocerlo. Los hechos o los datos deben aprenderse literalmente, de un modo reproductivo; no es necesario comprenderlos y, de hecho, frecuentemente cuando se adquieren contenidos factuales o no hay nada que comprender o no se está dispuesto o capacitado para hacer el esfuerzo de comprenderlo. En general, el aprendizaje factual de contenidos como los que recoge la Tabla 4.1 suele consistir en la adquisición de información verbal literal (por ej., nombres, vocabularios, etc.) o de información numérica (por ej., aprenderse la tabla de multiplicar, saberse "de memoria", sin necesidad de calcularlo, cuál es el cuadrado de 23 o la raíz cúbica de 32). Algunos de estos datos pueden tener un significado, pueden ser comprendidos. Por ejemplo, uno puede entender por qué existe el día y la noche si es capaz de establecer ciertas relaciones entre los movimientos de rotación y traslación de la Tierra; más complejo es comprender por qué los días y las noches tienen distinta duración según la época del año y el lugar del planeta en que nos encontremos. Sin embargo, éste es un dato que mucha gente conoce sin necesidad de enseñar ciencia. La ciencia proporciona algunos datos nuevos, a veces muchos, incluso demasiados, pero sobre todo debe proporcionar marcos conceptuales para interpretar no sólo esos datos nuevos, sino también la información factual que los alumnos tienen sin necesidad de estudiar ciencias, que, en la sociedad de la información y el conocimiento a la que nos referíamos en el Capítulo Primero, son cada vez más abundantes.

Por tanto, pretender que los alumnos aprendan la ciencia como un conjunto de datos o como un sistema de conceptos implica formas totalmente distintas de orientar la enseñanza de la ciencia y, por consiguiente, actividades de enseñanza, aprendizaje y evaluación totalmente distintas (Pozo, 1992). Como veremos un poco más adelante en realidad ambos tipos de conocimiento verbal pueden considerarse complementarios, pero su peso en el currículo no puede ser equivalente. En general, teniendo en cuenta las metas que para la educación científica presentábamos en el Capítulo Primero, la enseñanza de los contenidos verbales tiende a orientarse hoy en día más hacia la comprensión que hacia la mera acumulación de datos. Pero dentro de ese aprendizaje de conceptos, puede establecerse a su vez una distinción entre los principios o conceptos estructurantes de una disciplina, y los conceptos específicos. Los principios serían conceptos muy generales, de un gran nivel de abstracción, que suelen subyacer a la organización conceptual de un área, aunque no siempre se hagan lo suficientemente explícitos. Sin necesidad de remontarnos a los *Principia*

Mathematica de Newton, conceptos tales como los de conservación y equilibrio, son algo más que conceptos específicos, puntuales, que puedan ser objeto de estudio en una unidad o bloque de unidades concretas. Son principios que atraviesan todos los contenidos de esas materias y cuya comprensión plena debe ser uno de los objetivos esenciales de su inclusión en la Educación Secundaria (como intentaremos mostrar en el próximo capítulo y con más detalle en los Capítulos VI y VII). Difícilmente se pueden comprender nociones más específicas si no se dominan esos principios, de forma que una de las metas últimas sería la asimilación o construcción por los alumnos de esos principios o conceptos estructurantes, a los que deben acceder *a través* de los contenidos conceptuales específicos de las materias, que constituyen el listado habitual de contenidos conceptuales (por ej., densidad, energía, combustión, dilatación, etc.). Estos conceptos específicos pueden recibir un tratamiento curricular más localizado.

Los hechos, los conceptos específicos y los principios implican un gradiente creciente de generalidad, de tal modo que los contenidos más específicos deberían ser el medio para acceder a los contenidos más generales, que constituirían propiamente las capacidades a desarrollar (Pozo, en prensa). En otras palabras, los diferentes tipos de contenidos verbales desempeñarían una función distinta en el currículo y de algún modo se requerirían mutuamente. La meta final debería ser lograr una comprensión de los contenidos más abstractos y generales (en este caso los principios) pero ello sólo es posible a través de los contenidos más específicos, conceptos y datos. El verdadero sentido o significado de los datos y de los conceptos deriva de esos principios, pero éstos a su vez sólo pueden alcanzarse *a través* del aprendizaje de datos y conceptos, de los que nos ocupamos a continuación. De hecho la propia idea de relegar el estudio "memorístico" de datos incomoda a muchos profesores que no conciben la ciencia sin el conjunto de datos en que se apoya. ¿Tienen los alumnos que aprender datos? Y si es así ¿cómo? ¿y para qué?

¿Tienen que aprender datos los alumnos?

Ésta es una pregunta relevante para muchos profesores, que observan cómo ciertos hechos y datos muy queridos por ellos parecen verse relegados al cajón de los contenidos obsoletos ante la creciente búsqueda de significado de todos los conocimientos. Cuando, en palabras de García Márquez, éramos jóvenes e indocumentados, todos nosotros tuvimos que aprender, o al menos estudiar, interminables listas, letanías de fórmulas, símbolos químicos, pero también afluentes por la derecha y por la izquierda, capitales de países remotos, la mayor parte de los cuales ya no existen ¿Qué fue de aquel saber verbal? ¿No tiene ya sentido en nuestra sociedad? ¿No se están relegando ciertos contenidos básicos en favor de lograr otros objetivos, como la construcción de ciertos contenidos conceptuales por los alumnos, que resultan difícilmente alcanzables?

Toda decisión sobre selección y organización de contenidos en el currículo debe tomarse en función de las metas a las que esté dirigido ese currículo. Por nuestra parte, tal como hemos argumentado en el Capítulo Primero, creemos que hay que situar la educación científica en el contexto de una sociedad en la que *sobra* información y *faltan* marcos conceptuales para interpretar esa información, de modo que la transmisión de datos no debería constituir un fin principal de la educación científica, que debería estar dirigida más bien a dar sentido al mundo que nos rodea, a comprender las leyes y principios que lo rigen. Hay, no obstante, quienes reclaman una *vuelta a lo básico* en la educación, anclada en muchos casos en la enseñanza de datos. Se argumenta incluso que, aunque los alumnos no puedan dar sentido a muchos de esos datos en el momento de aprenderlos, si los retienen, más adelante lograrán comprenderlos. Sin embargo, si atendemos a los principios del aprendizaje y de la memoria, además de a nuestra propia experiencia personal, hemos de convenir que la mayor parte de los datos que, cuando éramos jóvenes e indocumentados, aprendimos sin comprenderlos, felizmente con el tiempo los hemos olvidado. Dado que muchos de esos datos o hechos que en su día aprendimos luego no los *usamos* para interpretar situaciones o predecirlas, tendemos a olvidarlos (Pozo, 1996a). Las leyes del olvido son en general poco condescendientes con el aprendizaje factual. Si los alumnos tienen dificultades para comprender los conceptos básicos de la ciencia, aún más dificultades tienen para recordar los datos que no comprenden.

Sin embargo, aunque la transmisión de datos o de mera información verbal no sea ya uno de los fines esenciales de la educación científica, no significa que no sea necesario enseñar datos. De hecho, no puede enseñarse ciencia sin datos. Ahora bien, éstos no deben ser nunca un fin en sí mismos, sino que deben ser un medio, una vía para acceder a otras formas de conocimiento verbal, más próximas a la comprensión. Los datos no se justifican en sí mismos si no promueven conductas o conocimientos significativos. Pero en muchos casos son necesarios para facilitar ese aprendizaje más significativo. Volviendo al argumento

anterior, el aprendizaje de datos es necesario cuando esos datos son *funcionales*, sirven para facilitar otros aprendizajes más significativos. Tomemos un ejemplo simple. El aprendizaje verbal de la multiplicación debe tener como meta la comprensión del concepto (la multiplicación como suma de sumas), pero, para poder operar eficazmente con la multiplicación, deben también adquirir datos (la tabla de multiplicar). No tiene sentido que los niños aprendan a multiplicar sin comprender lo que están haciendo, pero tampoco podrán aprender a multiplicar eficazmente sin conocer los datos relevantes, es decir, sin aprenderse de modo repetitivo, mal llamado también memorístico, la tabla de multiplicar. Pero el aprendizaje de datos no es en este caso un fin en sí mismo sino que debe estar subordinado al uso que pueda hacerse de esos datos. Así la decisión de "hasta dónde" deben aprender los alumnos la tabla de multiplicar (¿hasta 10×10 ? ¿ 15×15 ? ¿ 33×33 ?) debe basarse en criterios funcionales. Un argumento parecido podríamos desarrollar en torno a la enseñanza de la tabla periódica en Química. No debe ser un fin en sí mismo, sino que los alumnos deberán aprender aquellos símbolos que les ayuden en posteriores aprendizajes.

En nuestra opinión, la selección de contenidos factuales debe estar subordinada a la comprensión y el uso funcional del conocimiento y no constituir nunca un fin en sí misma. Esa funcionalidad viene en muchos casos determinada por el grado en que facilitan la posterior comprensión de conceptos. Pero a veces también la enseñanza factual de información verbal está justificada aunque no se apoye en la comprensión. Por ejemplo, sería insensato suponer que sólo los alumnos que comprendan adecuadamente el funcionamiento del sistema inmunológico deberían aprender las conductas que previenen el contagio del sida. O que sólo quienes entienden la farragosa química del efecto *invernadero* deben aprender qué hábitos y conductas pueden ayudar a contenerlo. En éstos y en otros casos, es necesario que los alumnos aprendan esos datos, aunque no puedan interpretarlos (igual que todos nosotros aprendemos a utilizar un microondas sin entender su funcionamiento). Pero ésta no debe ser la meta principal de la educación científica, sin pervertir su esencia. Como señala Claxton (1991) enseñar los conocimientos científicos como datos, como hechos, sin significado para el alumno, axiomas o principios no entendidos ni discutidos ("la materia está compuesta de átomos separados entre sí por un espacio vacío", "el viento es aire en movimiento") convierte el aprendizaje de la ciencia en una cuestión de fe, y a los alumnos en creyentes, o más frecuentemente apóstatas, condenados al *infierno* de los suspensos, cuando no se quedan en el *limbo* de la falta de comprensión. De hecho, si los datos ayudan a adquirir conceptos, éstos a su vez son la forma más eficaz de retener datos. Cuando uno comprende, da sentido a las cosas, los datos dejan de ser arbitrarios y por tanto son más fáciles de retener. Así sucede en todos los dominios del aprendizaje. Quien *entiende* de fútbol, música clásica, informática, termodinámica o macramé retiene también muchos más datos que el neófito olvida o ni siquiera percibe. La mejor forma de aprender los hechos de la ciencia es comprenderlos. El problema es que comprender algo es bastante más difícil que repetirlo y, por consiguiente, la enseñanza de conceptos es más compleja que la enseñanza de datos.

La comprensión de conceptos: aprendizaje significativo y conocimientos previos

Un rasgo característico del aprendizaje de hechos o datos, tal como hemos visto, es que el alumno debe hacer una copia más o menos literal o exacta de la información proporcionada y almacenarla en su memoria. De nada vale que nos aprendamos un número de teléfono si nos equivocamos en una o dos cifras. Este carácter reproductivo del aprendizaje de datos y hechos hace que el proceso fundamental sea la repetición. Este proceso de ciega repetición será insuficiente en cambio para lograr que el alumno adquiera conceptos. Una persona adquiere un concepto cuando es capaz de dotar de significado a un material o una información que se le presenta, es decir cuando "comprende" ese material; donde comprender sería equivalente, más o menos, a traducir algo a las propias palabras. Imaginemos que estamos oyendo hablar a una persona en un idioma extranjero que conocemos en muy escasa medida; podremos decir que hemos entendido algo cuando logremos traducirlo a nuestro propio idioma; tal vez seamos capaces de repetir literalmente algunas frases en ese otro idioma, sonido a sonido, como un magnetófono, pero no por ello entenderemos lo que ha dicho. Otro tanto sucede con el alumno en el aula; el alumno tiene sus propios modelos o representaciones de la realidad y podremos decir que ha entendido el concepto de evaporación o el de selección natural cuando logramos que lo conecte con esas representaciones previas, que lo "traduzca" a sus propias palabras y a su propia realidad.

Un problema muy habitual en nuestras aulas es que los profesores "explican" o enseñan "conceptos" (la energía cinética, el enlace covalente, la fotosíntesis o la densidad) que los alumnos en realidad aprenden como una lista de datos, que se limitan a memorizar o reproducir en el mejor de los casos. Esto se debe a

que la comprensión es más exigente para el alumno que la mera repetición. Comprender requiere poner en marcha procesos cognitivos más complejos que repetir. La Tabla 4.2 intenta resumir las principales diferencias entre el aprendizaje de hechos y de conceptos, o si se prefiere entre el aprendizaje repetitivo y significativo de información verbal.

TABLA 4.2. **Diferencias entre hechos y conceptos como contenidos del aprendizaje** (tomado de Pozo, 1932)

	HECHOS	CONCEPTOS
Consiste en	Copia literal	Relación con conocimientos anteriores
Se aprende	Por repaso (repetición)	Por comprensión (significativo)
Se adquiere	De una vez	Gradualmente
Se olvida	Rápidamente sin repaso	Más lenta y gradualmente

Aunque las diferencias entre ambos tipos de conocimiento verbal son más sutiles (véase al respecto Pozo, 1992, 1996a), a nuestros efectos, bastaría con destacar que los hechos y datos se aprenden de modo literal, consisten en una reproducción exacta, en la que el aprendiz no pone nada de su parte, salvo el esfuerzo de repetirla, mientras que los conceptos se aprenden relacionándolos con los conocimientos previos que se poseen. Así, la adquisición de hechos y datos es de carácter todo o nada. O el alumno sabe cuál es el símbolo químico del cadmio o no lo sabe. En cambio, los conceptos no se saben "todo o nada", sino que pueden entenderse a diferentes niveles. Mientras que el aprendizaje de hechos sólo admite diferencias "cuantitativas" ("sí" lo sabe o "no" lo sabe), el aprendizaje de conceptos se caracteriza por los matices cualitativos (no se trata tanto de si el alumno lo comprende o no, sino de "cómo" lo comprende). Éste será un rasgo muy importante del aprendizaje de conceptos que deba tenerse en cuenta en la evaluación. Si es necesario plantear actividades diferenciadas para enseñar hechos y conceptos (ver García Madruga, 1990; Pozo, 1992), igualmente importante es diferenciar en la evaluación cuándo el alumno ha aprendido algo como un hecho y cuándo como un concepto. De modo muy resumido, la Tabla 4.3 sugiere algunas precauciones que pueden tomarse en la evaluación para impedir que el aprendizaje de conceptos se trate como un aprendizaje de hechos.

TABLA 4.3. **Algunos criterios para diferenciar entre hechos y conceptos durante el proceso de evaluación.** (Extraído de Pozo, 1992)

<ul style="list-style-type: none"> • Evitar preguntas y tareas que permitan respuestas reproductivas, es decir, evitar que la respuesta "correcta" esté literalmente incluida en los materiales y actividades de aprendizaje. • Plantear en la evaluación situaciones y tareas nuevas, al menos en algún aspecto, requiriendo del alumno la generalización de sus conocimientos a una nueva situación. • Evaluar al comienzo de las sesiones o los bloques temáticos los conocimientos previos de sus alumnos, activando sus ideas y trabajando a partir de ellas. • Valorar las ideas personales de sus alumnos, promoviendo el uso espontáneo de su terminología, entrenándoles en parafrasear o explicar las cosas con sus propias palabras. • Valorar las interpretaciones y conceptualizaciones de los alumnos que se alejan o desvían de la idea aceptada. Esta valoración debe hacerse no sólo antes sino también después de la instrucción. • Utilizar técnicas "indirectas" (clasificación, solución de problemas, etc.) que hagan inútil la repetición literal y acostumar a los alumnos a aventurarse a usar su conocimiento para resolver enigmas, problemas y dudas, en lugar de encontrar la solución fuera de ellos (en el profesor, el libro, etc.).

La mayor parte de estas ideas están dirigidas a evaluar el aprendizaje conceptual con criterios abiertos o flexibles en vez de en términos de respuestas correctas o incorrectas. El aprendizaje de hechos o de datos es un proceso que no admite grados intermedios; si no se producen las condiciones adecuadas (de

motivación, práctica y cantidad restringida de material) no se aprende. En cambio, el proceso de comprensión es gradual; es prácticamente imposible lograr una comprensión óptima (similar a la que tendría un experto) la primera vez que nos enfrentamos a un problema (por ej., entender cómo funciona un microondas o cómo se produce la combustión). Si dirigimos nuestros esfuerzos a la comprensión y no sólo al aprendizaje de datos (por ej., cuánto tiempo hay que cocer la pasta o las verduras o qué sustancias son inflamables y cuáles no), poco a poco iremos comprendiendo qué tipo de materiales podemos usar con el microondas y cómo debemos usarlos o qué precauciones debemos tomar al calentar un líquido determinado. Cada nuevo ensayo o intento puede proporcionarnos una nueva comprensión del fenómeno un tanto mágico de la cocción en el microondas o ayudarnos a entender que, en el caso de la combustión del alcohol, es mejor no hacer ningún ensayo. Este carácter gradual de la comprensión tiene consecuencias importantes para la selección y secuenciación de los contenidos conceptuales en el currículo. Si el alumno estudia, por ejemplo, la combustión en la Educación Secundaria Obligatoria y, más tarde, de nuevo en el Bachillerato, deben establecerse niveles de exigencia distintos en una y otra etapa educativa. Aunque en ambos casos estudie el mismo concepto y haya un solapamiento deseable entre ambos, los contenidos no pueden ni deben ser los mismos.

Por último, los hechos y los conceptos no sólo difieren en su aprendizaje, sino también en su olvido. Como señalábamos antes, lo que aprendemos como dato tiende a olvidarse fácilmente en cuanto dejamos de repasar o practicar. Se nos olvida el número de teléfono del restaurante en cuanto dejamos de frecuentarlo; o el símbolo químico del laurencio en cuanto alguien deja de preguntarnos insistentemente por él. En cambio, aquello que comprendemos lo olvidamos de manera bien diferente. Tal vez con el tiempo algo se vaya borrando y nuestra comprensión se difumine y deforme, pero teniendo en cuenta los principios que rigen la memoria o la recuperación del conocimiento aprendido, el olvido no es tan repentino ni tan total como en el aprendizaje de datos (Pozo, 1996a).

Todos estos rasgos hacen que el aprendizaje de conceptos sea más eficaz y duradero que el aprendizaje de datos, pero también más exigente. Sus resultados son mejores, pero las condiciones para que se ponga en marcha son también más difíciles. Como mostró Ausubel en su teoría sobre el aprendizaje significativo (Ausubel, Novak y Hanesian, 1978), deben cumplirse ciertas condiciones para que tenga lugar la comprensión (véase Figura 4.1).¹

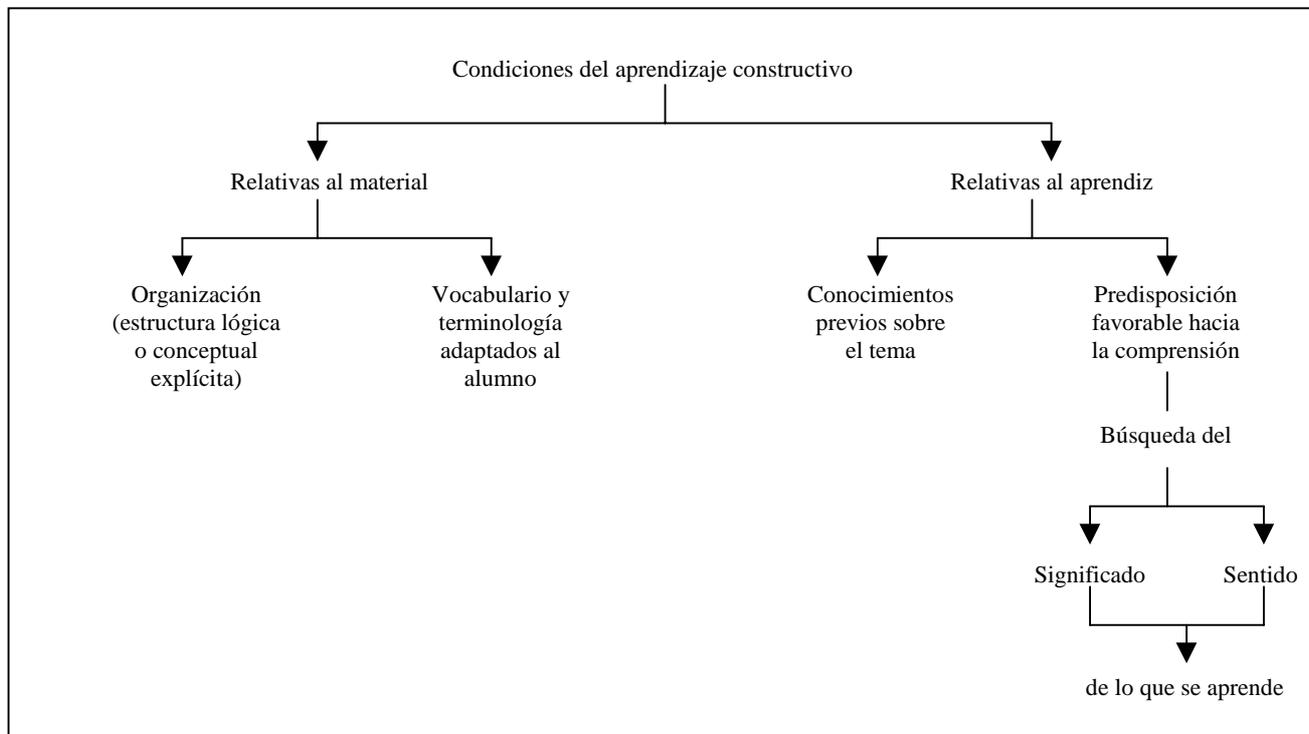
Comenzando por las características que debe tener el material de aprendizaje para que pueda ser comprendido, la principal exigencia es que tenga una organización conceptual interna, es decir, que no constituya una lista arbitraria de elementos yuxtapuestos. Cuando aprendemos un número de teléfono, no existe una relación lógica entre una cifra y la siguiente, sino que la relación entre ellas es arbitraria o casual. Por eso no es muy sensato preguntarse por qué una persona tiene ese número de teléfono y no otro. No hay nada que comprender en un número de teléfono, es algo arbitrario. Lo mismo sucede con algunos materiales de aprendizaje, que aunque podrían tener una cierta lógica interna (por ej., las instrucciones para programar el vídeo o para usar un procesador de textos), se presentan como un mero listado de acciones, sin que se explicita la lógica que las rige. Mientras que la limitación más importante para el aprendizaje repetitivo de datos sería la cantidad de material presentado, las restricciones para la comprensión dependen más de la organización interna de ese material. Sólo podrán comprenderse aquellos materiales que estén internamente organizados de forma que cada elemento de información tenga una conexión lógica o conceptual con otros elementos, como por ejemplo, la relación entre los símbolos químicos y las iniciales de los nombres en castellano o latín, o a un nivel mayor de significado, la organización de la tabla periódica no como una lista arbitraria de elementos sino como un mapa de la estructura atómica de la materia.

Además de requerir que el material de aprendizaje tenga una estructura conceptual explícita, conviene que *la terminología y el vocabulario empleado* no sea excesivamente novedoso ni difícil para el aprendiz. Pero sobre todo, el material no sólo debe estar organizado en sí mismo, sino que debe estar organizado *para los alumnos* cuyos conocimientos previos y motivación deben tenerse en cuenta. Para que un aprendiz comprenda un material, conviene que tenga una *actitud favorable* a la comprensión, que como vimos en el Capítulo II, será más probable si lo que mueve o impulsa al aprendizaje del alumno es la motivación intrínseca —o deseo de aprender— en vez de la motivación extrínseca —o búsqueda de

¹ La teoría de Ausubel sobre el aprendizaje significativo puede encontrarse desarrollada en extenso en Ausubel, Novak y Hanesian (1978) o Novak (1977). Presentaciones más sintéticas y críticas de la misma pueden encontrarse en García Madruga (1990), Pozo (1989). Aplicaciones de dicha teoría a la enseñanza de la ciencia se encuentran en Gutiérrez (1987), Moreira y Novak (1988). Finalmente para una teoría más actual y compleja de la comprensión véase Kintsch (1998).

recompensas—. En general, la comprensión requiere una práctica más continuada y en definitiva más recursos cognitivos, más esfuerzo que repasar simplemente (Alonso Tapia, 1995; Novak y Gowin, 1984; Pozo, 1996a). Comprender algo requiere mayor implicación personal, mayor compromiso en el aprendizaje, que seguir ciegamente unos pasos marcados, obedeciendo el dictado de unas instrucciones.

FIGURA 4.1. **Condiciones o requisitos para que se produzca un aprendizaje constructivo.** (Según Ausubel, Novak y Hanesian, 1978)



El alumno que intenta comprender la explicación de su profesor o el significado de un dato obtenido al investigar la oscilación del péndulo, tal como veíamos en el capítulo anterior, como el lector que intenta comprender el sentido de este párrafo o de este libro, está de hecho construyendo su propio libro o su propio párrafo, su propia comprensión de la explicación o del péndulo, que en algún sentido, por mínimo que sea, será diferente de cualquier otra comprensión realizada por otra persona —o incluso por el mismo alumno o lector en otro momento— porque todo intento de dar significado se apoya no sólo en los materiales de aprendizaje sino en los conocimientos previos activados para dar sentido a esos materiales. Ésta es otra condición para que se produzca un aprendizaje significativo según Ausubel. Nada mejor para ilustrarlo que tomar un texto entresacado de una obra de "divulgación científica" sobradamente conocida, la *Historia del tiempo* de Stephen Hawking (1988, pág. 158 de la trad. cast.), en la que el autor pretende explicar la teoría del *big-bang* sobre el origen del universo:

"Alrededor de cien segundos después del *big-bang*, la temperatura habría descendido a mil millones de grados, que es la temperatura en el interior de las estrellas más calientes. A esta temperatura protones y neutrones no tendrían ya energía suficiente para vencer la atracción de la interacción nuclear fuerte, y habrían comenzado a combinarse juntos para producir los núcleos de átomos de deuterio (hidrógeno pesado), que contienen un protón y un neutrón. Los núcleos de deuterio se habrían combinado entonces con más protones y neutrones para formar núcleos de helio, que contienen dos protones y neutrones y también pequeñas cantidades de un par de elementos más pesados, litio y berilio."

A pesar del intento de divulgación, y de que sin duda el texto tiene una lógica interna, es obvio que sin unos considerables conocimientos previos sobre química y astrofísica, y aún con ellos, el texto puede resultar tan oscuro y denso como un agujero negro. Para que haya aprendizaje significativo es necesario que el aprendiz pueda relacionar el material de aprendizaje con la estructura de conocimientos que ya dispone. De esta forma la comprensión de una explicación o del texto anterior —su significado— no depende sólo del autor, del texto en sí, sino también del *lector*, del alumno, de sus conocimientos conceptuales previos.

Cada lector *construye* su propio libro, como cada espectador construye su propia película o cada alumno construye su propia física, su propia química o su propia biología.

Por tanto, siempre que una persona intenta comprender algo —sea un alumno que trata de comprender la transformación de un líquido en un gas o su profesor preguntándose por qué ese mismo alumno no comprende la naturaleza corpuscular de la materia— necesita activar una idea o conocimiento previo que le sirva para organizar esa situación y darle sentido. Sin embargo, la activación de conocimientos previos, aun siendo necesaria para la comprensión, no asegura un aprendizaje adecuado de los nuevos conceptos presentados. El objetivo del aprendizaje significativo es que en la interacción entre los materiales de aprendizaje (el texto, la explicación, la experiencia, etc.) y los conocimientos previos activados para darle sentido, se modifiquen esos conocimientos previos, surja un nuevo conocimiento; sin embargo, con mayor frecuencia de lo que la explicación ausubeliana del aprendizaje significativo haría suponer, cuando los alumnos intentan comprender una nueva situación a partir de sus conocimientos previos, es esa nueva información la que *cambia*, la que es interpretada en términos de los conocimientos previos sin que éstos apenas se modifiquen.

Este es uno de los problemas fundamentales para el aprendizaje de la ciencia, que abordaremos con detalle en el próximo capítulo. Los alumnos, como cualquiera de nosotros, interpretan cualquier situación o concepto que se les presenta desde sus conocimientos previos, su física, química o biología personal o intuitiva. Y como consecuencia de ello, la enseñanza de la ciencia apenas cambia esos conocimientos previos en términos de los cuales interpretan los conceptos científicos que se les enseñan, ya que en lugar de reinterpretar sus conocimientos previos en función de los conceptos científicos, suelen hacer lo contrario, asimilar la ciencia a sus conocimientos cotidianos. Así, cuando estudian la noción newtoniana de fuerza la asimilan a su idea intuitiva de fuerza, que viene a ser el agente causal de todo movimiento, y en vez de modificar ésta, dan un sentido distinto a todos los conceptos de la mecánica clásica (fuerza, movimiento, inercia, etc.), lo que hace imposible una comprensión adecuada de los mismos. Como veremos en el Capítulo VII, *los principios* ontológicos, epistemológicos y conceptuales desde los que los alumnos elaboran su física intuitiva —todo movimiento implica una causa, las relaciones causales son lineales y unidireccionales— son radicalmente distintos de los que subyacen a la física que se les enseña —el movimiento no necesita ser explicado, sino el cambio en la cantidad de movimiento, el movimiento es producto de una interacción dentro de un sistema de fuerzas—, con lo que la comprensión resulta muy difícil. Otro tanto sucede en el caso de la química. Cuando se explica al alumno la noción de movimiento intrínseco de las partículas, la asimila a su propia concepción intuitiva, de forma que acaba por asumir que las partículas se mueven sólo cuando manifiestan un movimiento aparente, como en el caso de los gases y algunos líquidos, pero no cuando su apariencia es estática (Gómez Crespo, 1996; también Capítulo VI), lo que le impide comprender la teoría cinético-molecular, ya que nuevamente esta teoría se apoya en unos principios (interacción, sistema, equilibrio) muy alejados de los que implícitamente subyacen a sus propias intuiciones (no hay movimiento sin causa, las causas actúan lineal y unidireccionalmente, etc.).

De hecho, la resistencia de los conocimientos previos a modificarse como consecuencia de la instrucción, y la tendencia a asimilar los aprendizajes escolares a las propias intuiciones han sido objeto de numerosas investigaciones en los últimos años dentro de la didáctica de las ciencias y constituyen sin duda el enfoque de estudio actualmente predominante. El interés se ha desplazado desde las condiciones y procesos del aprendizaje significativo a la naturaleza y contenidos de esos conocimientos previos y la forma en que pueden ser cambiados. El aprendizaje significativo ha dado paso al estudio del cambio conceptual, entendido como el cambio de esos conocimientos previos de los alumnos.

La investigación sobre los conocimientos previos de los alumnos, su física, química o biología intuitiva, se ha desarrollado considerablemente en los últimos veinte años. Hoy tenemos numerosos datos sobre las concepciones que tienen los alumnos para interpretar gran parte de los fenómenos y conceptos estudiados en las diversas áreas de la ciencia. De hecho, el número de estudios es ya casi inabarcable (Pfundt y Duit, 1994). Hay incluso diversos catálogos o monografías de las ideas de los alumnos en esas áreas, en los que puede encontrarse una descripción detallada de las concepciones mantenidas por los alumnos y de las técnicas que pueden utilizarse para estudiarlas o evaluarlas (por ej., Driver, Guesne y Tiberghien, 1985; Driver y cols., 1994; Hierrezuelo y Montero, 1991; Osborne y Freyberg, 1985; Pozo, Gómez Crespo, Limón y Sanz, 1991; o también de modo sintético el número 7 de la revista *Alambique*, dedicado monográficamente a las ideas de los alumnos sobre la ciencia y su influencia en el aprendizaje). Además de estas recopilaciones o catálogos de ideas ha habido múltiples intentos de caracterizar esas concepciones, de interpretarlas (por ej., Black y Lucas, 1993; Chi, 1992; Furió, 1996; Wandersee, Mintzes y Novak, 1994; Pozo, 1996b; Pozo y cols., 1992; Vosniadou, 1994a). Estas diversas interpretaciones, aunque

tienen rasgos comunes, como su adscripción al enfoque constructivista de la educación, difieren en muchos puntos esenciales. Para empezar no se ponen ni siquiera de acuerdo en el nombre de la cosa. Hace ya más de diez años Giordan y De Vecchi (1987) encontraban 28 formas distintas de identificar esos conocimientos previos de los alumnos. Desde entonces seguramente han florecido otras tantas, que reflejan posiblemente otras tantas formas de interpretarlas.² De hecho, los rasgos que se han atribuido a esas ideas o concepciones varían levemente de un autor a otro. No obstante, en general se asume que se trata de concepciones muy *persistentes* (se mantienen incluso tras muchos años de instrucción), *generalizadas* (las comparten personas de diversas culturas, edades y niveles educativos), de carácter más *implícito* que explícito (los alumnos las utilizan pero muchas veces no pueden verbalizarlas), relativamente coherentes (ya que el alumno las usa para afrontar situaciones diversas) y que en algunos casos guardan una notable similitud con concepciones ya superadas en la propia historia de las disciplinas científicas.

Sin embargo, no todas las concepciones estudiadas manifiestan estos rasgos en la misma medida, e incluso alguno de ellos es dudoso que pueda atribuirse a la mayor parte de ellas. Por esto, en lugar de esta caracterización global, intentaremos un análisis pormenorizado de la ciencia *intuitiva* de los alumnos. Así, en las páginas que restan de este capítulo trataremos de indagar en la naturaleza y el origen de esas concepciones alternativas, intentando comprender por qué son tan resistentes al cambio conceptual, y en el próximo capítulo nos centraremos en los mecanismos mediante los que puede fomentarse ese cambio, que conformarían, junto con el cambio de actitudes y procedimientos de los que nos hemos ocupado en capítulos precedentes, un modelo de aprendizaje/enseñanza de las ciencias basado en la integración y reestructuración de esos conocimientos previos en el marco de las teorías científicas. Los capítulos siguientes desarrollan o ilustran ese modelo en el aprendizaje de la química (Capítulo VI) y de la física (Capítulo VII).

El origen de las concepciones alternativas

Tal vez algunos lectores a estas alturas piensen que los problemas identificados en el aprendizaje de procedimientos y actitudes en capítulos anteriores eran ya suficientes obstáculos para la enseñanza de la ciencia como para tener que luchar también con la existencia de concepciones alternativas firmemente arraigadas y opuestas al conocimiento científico establecido. Tal vez, a estas alturas, la crisis de la educación científica que se describía en el primer capítulo empiece a cobrar apariencia de catástrofe, y algún lector tal vez se esté preguntando ya no por qué los alumnos no aprenden ciencia sino cómo es posible que a veces la aprendan. De hecho, el panorama no es tan negro. Las concepciones alternativas no son un problema más, sino otra manifestación más del mismo problema, que tiene dimensiones actitudinales, procedimentales y conceptuales: la desconexión entre el conocimiento que los alumnos generan para dar sentido al mundo que les rodea, un mundo de objetos y personas, y el conocimiento científico, plagado de extraños símbolos y conceptos abstractos referidos a un mundo más imaginario que real, mientras que el conocimiento conceptual que los alumnos traen al aula, y con él sus actitudes y procedimientos, se refiere al mundo cotidiano, un *mesocosmos* trazado por las coordenadas espacio-temporales del aquí y ahora, la ciencia que se les enseña se mueve más en la "realidad virtual" del *microcosmos* (células, partículas y otras entidades mágicas y no observables) y del *macrocosmos* (modelos idealizados, basados en leyes universales, no vinculados a realidades concretas, cambios biológicos y geológicos que se miden en miles, si no millones de años, sistemas en interacción compleja, etc.). Sólo una relación entre estos diferentes niveles de análisis de la realidad, basada precisamente en su diferenciación, puede ayudar a los alumnos a comprender el significado de los modelos científicos y, desde luego, a interesarse por ellos. Para esto es necesario comprender cómo se acercan los alumnos a ese mundo de objetos y personas que se agitan a su alrededor,

² En realidad, esas diversas denominaciones no son intercambiables entre sí. Así, cuando se habla de preconceptos o ideas previas, se está poniendo el acento en que anteceden al verdadero aprendizaje, mientras que cuando se les denomina como ciencia intuitiva se destaca su entidad epistemológica. Uno de los nombres más comunes de la cosa hace unos años, "concepciones erróneas", ha caído afortunadamente en desuso, al tiempo que entraba en crisis el modelo de cambio conceptual por conflicto cognitivo que lo sustentaba que, como veremos en el próximo capítulo, estaba dirigido a erradicar o reemplazar esas concepciones erróneas por otras científicamente correctas. Por nuestra parte, a pesar de esos matices, y eludiendo las etiquetas con significado más dudoso, utilizaremos genéricamente los términos "concepciones alternativas" o "conocimientos previos", como sinónimos, si bien en el próximo apartado, al analizar los diversos niveles representacionales en los que pueden analizarse estas concepciones, nos referiremos a ellas también como "teorías implícitas", dando al término un sentido preciso.

mostrando que ese acercamiento requiere no sólo procedimientos y actitudes, sino también conceptos bien diferentes de los que requiere el aprendizaje de la ciencia.

De hecho, la existencia en los alumnos de ideas o concepciones previas bastante arraigadas no es algo que afecte exclusivamente ni a los alumnos ni al aprendizaje de la ciencia. Aunque tal vez sea el área en la que más se han investigado esas ideas, todos nosotros poseemos ideas o teorías informales sobre todos aquellos dominios del *mesocosmos* que afectan a nuestra vida cotidiana. No sólo hay una física, una química o una biología *intuitiva*. Hay también un conocimiento informal sobre el mundo social e histórico (Carretero, Pozo y Asensio, 1989; Carretero y Voss, 1994; Rodrigo, 1994), una matemática intuitiva (Kahneman, Slovic y Tversky, 1982; Pérez Echeverría, 1994; Resnick y Ford, 1981), un conocimiento intuitivo o implícito en el uso de las tecnologías (Norman, 1988) o en la producción artística (Gardner, 1982; Eisner, 1985), por no hablar de la psicología intuitiva que todos, profesores y alumnos, utilizan para dar sentido a su práctica cotidiana en las aulas y que es tan resistente al cambio, si no más, que la física o la química intuitiva (por ej., Pozo y Scheuer, 1998; Pozo, Scheuer, Mateos y Pérez Echeverría, 1998).

En cualquier dominio que nos resulte relevante, por afectar a nuestra vida cotidiana, tenemos ideas que nos permiten predecir y controlar los sucesos, aumentando nuestra adaptación a los mismos. Estas funciones de predicción y control del entorno inmediato tienen un alto valor adaptativo en todas las especies, pero se multiplican en los seres humanos, gracias al aprendizaje y la cultura (Pozo, 1996a). De hecho podemos decir, de acuerdo con la psicología evolutiva, que esta necesidad de predecir y controlar empieza ya en la cuna. Según hipótesis muy recientes y sugestivas, los bebés disponen ya, casi desde el nacimiento, de verdaderas ideas o teorías sobre el mundo de los objetos y las personas (Karmiloff-Smith, 1992). Incluso hay quien cree que "nacen sabiendo" ya muchas de esas ideas (Mehler y Dupoux, 1990), aunque esto sea más debatible (Pozo, 1994). Lo que está fuera de duda es que, para predecir y controlar el movimiento de los objetos que componen su *mesocosmos*, los bebés necesitan *teorías* que predigan y controlen su conducta. Por ello, tampoco es extraño que, sin necesidad de instrucción formal e incluso sin apenas ayuda cultural, las personas estemos dotadas desde muy temprano para aprender del mundo y extraer conocimiento sobre él, recurriendo a mecanismos de *aprendizaje implícito* (Berry, 1997; Pozo, 1996a. Reber, 1993) que nos permiten detectar y extraer las regularidades que hay en nuestro mundo sensorial, que constituyen la primera y más sistemática fuente en el origen de nuestras concepciones espontáneas sobre el mundo. Sin embargo, otras concepciones tienen un *origen cultural*, ya que vienen formateadas en los juegos de lenguaje propios de cada cultura. Y finalmente otras ideas surgen en las aulas, tienen un origen escolar en el uso más o menos acertado de metáforas y modelos que acaban por impregnar el pensamiento de los alumnos. Las concepciones de los alumnos tienen por tanto un origen sensorial, cultural y escolar que determina en buena medida la naturaleza representacional de esas ideas (Pozo y cols, 1991; Russell, 1993).

Origen sensorial: las concepciones espontáneas

Buena parte de esas concepciones alternativas se formarían, de modo espontáneo, en el intento de dar significado a las actividades cotidianas y se basarían esencialmente en el uso de reglas de inferencia causal aplicadas a datos recogidos —en el caso del mundo natural— mediante procesos sensoriales y perceptivos. Cada vez que nos enfrentamos a un suceso nuevo, o sea, moderadamente discrepante de nuestras expectativas, iniciamos una búsqueda causal con el fin de encontrar información que nos permita predecir y controlar ese suceso. El origen de estas búsquedas es siempre un *problema* (tal como se caracterizó en el Capítulo III). No toda situación imprevisible es un problema; se requiere además una relevancia, una influencia en nuestra vida cotidiana o un interés particular para que alguien viva una situación como un problema (Pozo y Gómez Crespo, 1994). Cuando esto ocurre, cuando un objeto no se comporta como esperamos, cuando sucede ese imprevisto, en nuestra vida cotidiana solemos recurrir a ciertas reglas simplificadoras que nos identifican las causas más probables y frecuentes, reduciendo la complejidad del mundo sensorial a unos pocos elementos destacados, eliminando el *ruido* de tantos factores irrelevantes.

En lugar de realizar un análisis sistemático y riguroso de posibles variables, como haríamos si estuviéramos haciendo una investigación científica, reducimos el espacio de búsqueda mediante un atajo cómodo que nos facilite una solución aproximada. Aunque estas reglas tienen un alto valor adaptativo (nos proporcionan soluciones inmediatas y frecuentemente acertadas con un escaso esfuerzo cognitivo), a veces conducen a errores o "falsas soluciones", como muestran los ejemplos de concepciones alternativas presentados en la Tabla 4.4 a modo de ejemplo de las reglas asociativas que rigen nuestro pensamiento causal cotidiano (Pozo, 1987):

- La *semejanza* entre causa y efecto o entre la realidad que observamos y el modelo que la explicaría.
 - La *contigüidad espacial*, y si es posible, el contacto físico entre causa y efecto.
 - La *contigüidad temporal* entre la causa y el efecto, que deben sucederse de modo próximo no sólo en el espacio sino también en el tiempo.
 - La *covariación cualitativa* entre causa y efecto. Las variables relevantes serán aquéllas que se produzcan siempre que se produce el efecto.
 - La *covariación cuantitativa* entre causa y efecto, de modo que un incremento de la causa produzca un aumento proporcional del efecto, y viceversa.

Estas reglas estarían muy vinculadas al funcionamiento del sistema cognitivo humano como procesador de información con recursos limitados (por ej., atencionales) y que por tanto restringe el espacio de búsqueda ante una situación de incertidumbre. Normalmente funcionarían de modo mecánico o inconsciente, tendrían una naturaleza implícita, y vendrían a coincidir básicamente con las leyes del aprendizaje asociativo (Pozo, 1989, 1996a). Se trataría de *reglas heurísticas*, aproximativas, con un carácter probabilístico, más que exacto, que utilizaríamos con el fin de simplificar las situaciones y aumentar nuestra capacidad de predicción y control sobre ellas, si bien tienen un escaso poder explicativo, ya que se limitan a *describir secuencias probables* de acontecimientos.

Aunque posiblemente se utilizarían en todos los dominios de conocimiento, se reflejan ante todo en nuestras teorías sobre el funcionamiento del mundo natural. Como vemos en los ejemplos de la Tabla 4.4, buena parte de nuestra física y química intuitiva, pero también nuestras ideas sobre la salud y la enfermedad, se apoyan en este tipo de reglas. Un rasgo de este tipo de ideas es que presentan una mayor universalidad, a través de culturas y edades, que los otros tipos de ideas que se analizan a continuación. Otro rasgo característico es que suelen ser conocimientos más implícitos que explícitos. Muchas veces es algo que sabemos hacer, pero difícilmente decir, verbalizar. Buena parte de las ideas de los alumnos no son conocimientos verbales sino "teorías en acción", reglas de actuación, verdaderos procedimientos (Karmiloff-Smith, 1992; Pozo y cols., 1992).

TABLA 4.4. Algunos ejemplos de la utilización de heurísticos o reglas simplificadoras en la formación de las concepciones espontáneas

Regla	Ejemplos
<i>Semejanza</i> entre causa y efecto	<ul style="list-style-type: none"> • Si hace calor, nos quitamos ropa, ya que la ropa "da calor". • Si me duele el estómago, será algo que he comido (pero tal vez no lo sea). • Si el agua es húmeda, las partículas de agua también serán húmedas • Los átomos de cobre tendrán el mismo color que el metal: rojizo. • Si un sólido está visiblemente quieto, las partículas que lo componen también estarán inmóviles. • Si una planta "transpira" será que está sudando.
<i>Contigüidad</i> espacial	<ul style="list-style-type: none"> • Si oímos un ruido en la parte trasera del coche buscaremos razonablemente allí la causa. • Las bombillas más cercanas a la pila en un circuito en serie lucirán con más intensidad que las más alejadas. • El agua condensada en las paredes de un vaso es agua que se filtra a través de las paredes. • La contaminación sólo afecta a las ciudades, ya que en el campo se respira aire puro.

<p><i>Contigüidad temporal</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Si nos duele la cabeza o el estómago, se deberá a lo último que hayamos hecho o comido. • La forma de las montañas se debe a la erosión y no a los movimientos geológicos. • Si alguien se muestra enfadado con nosotros, buscaremos algún hecho reciente en el que le hayamos molestado. • Si se nos seca el bonsai será que la semana pasada hizo calor (aunque tal vez llevemos dos años sin abonarlo).
<p><i>Covariación cualitativa entre causa y efecto</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Si cada vez que tengo fiebre y dolor de cabeza tomo un antibiótico, por más que digan los médicos creeré que los antibióticos curan la gripe. Si en cambio el médico me receta un antibiótico que debo seguir tomando una semana, en cuanto cesa la fiebre y el dolor, dejo de tomarlo, porque si no hay síntomas, no hay enfermedad. • Si hacemos que las cosas sean eléctricas solucionaremos el problema del medio ambiente, independientemente de cómo se obtenga esa electricidad. • Cuando se oye un trueno es porque hay un rayo. • Si un cuerpo se mueve lleva una fuerza. • Muchas ideas supersticiosas y rituales extravagantes se basan también en esta regla. Por ej., le damos a cuatro teclas para conseguir que salga el teletexto en la pantalla cuando en realidad bastaba con una de ellas.
<p><i>Covariación cuantitativa</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Si tenemos una cazuela con agua hirviendo y aumentamos la intensidad del fuego, mucha gente cree que aumenta la temperatura del agua. • Para calentar más rápidamente la casa suele subirse al máximo la temperatura en el termostato. • Se interpreta que, cuanta más velocidad lleva un cuerpo, mayor es la fuerza adquirida. • Los alumnos creen que la velocidad de caída de los objetos aumenta con el peso, ya que los objetos, todo el mundo lo sabe, caen por su propio peso.

Origen cultural: las representaciones sociales

A diferencia de las reglas que acabamos de analizar, estas concepciones tendrían su origen no tanto en la interacción directa, sensorial, con el mundo, como en el entorno social y cultural, de cuyas ideas se impregnaría el alumno. La cultura es entre otras muchas cosas un conjunto de creencias compartidas por unos grupos sociales, de modo que la educación y la socialización tendrían entre sus metas prioritarias la asimilación de esas creencias por parte de los individuos. Dado que el sistema educativo no es hoy el único vehículo —y a veces ni siquiera el más importante— de transmisión cultural, los alumnos accederían a las aulas con creencias socialmente inducidas sobre numerosos hechos y fenómenos. Hay ciertos modelos, como el modelo de contagio en la transmisión de enfermedades, o los modelos de gasto y consumo (de energía, de recursos naturales, etc.), que aparecen de modo recurrente en nuestra cultura, bien por transmisión oral, bien por su presentación a través de los medios de comunicación, que en la sociedad de la información desempeñan una función cada vez más relevante en la *difusión* de ciertas concepciones alternativas, ya sea en su intento de divulgación, o incluso a través de la publicidad que nos ofrece detergentes con *bioalcohol* o refrigeradores con *frigorías*. Igualmente hay conceptos que poseen un significado diferente en el lenguaje cotidiano que en los modelos científicos. Así, los conceptos de calor y temperatura se utilizan en la vida cotidiana casi como sinónimos, cuando su significado para la ciencia es bien diferente. O, como veremos en el Capítulo VII, la energía se usa en la vida cotidiana con un significado difuso, pero asumido por todos, que es bien distinto del nítido significado que tiene este concepto en física.

El estudio de las representaciones sociales realizado por psicólogos sociales como Moscovici (1976; Farr y Moscovici, 1984) nos sugiere de qué forma se difunden y adquieren este tipo de concepciones culturales, por procesos de esquematización (mediante los cuales las teorías científicas al divulgarse quedan reducidas a ciertos esquemas simplificados, usualmente reducidos a una imagen), de naturalización (por los que esas concepciones en lugar de concebirse como construcciones sociales pasan a formar parte de la realidad) y de interiorización o asimilación (por los que cada individuo se apropia de esos productos

culturales, los hace suyos) (para más detalles de estos procesos, véase Páez y cols., 1987; Rodrigo, Rodríguez y Marrero, 1993).

En suma, al convertirse en conocimiento social, al hacerse públicos, esos conceptos se conforman a los esquemas y reglas de conocimiento simplificadores que acabamos de analizar. De hecho, estos modelos están bastante vinculados a las reglas anteriores (en la medida en que significativamente tienden a respetarlas), pero tienen un origen más lingüístico y cultural, por lo que, al contrario que las anteriores, muchas veces se verbalizan con más facilidad y en cambio es más difícil convertirlas en pautas de acción. Son bastante frecuentes en ciertas áreas del conocimiento biológico que son culturalmente significativas, más próximas a las dimensiones del mesocosmos (ideas sobre salud y enfermedad, nutrición, reproducción, pero también las relaciones con el medio ambiente, el clima, etc.).

Otro rasgo característico del aprendizaje de la ciencia en nuestra sociedad, como veíamos en el Capítulo Primero, es que, en vez de tener que buscar activamente la información con que alimentar nuestra ansia de predicción y control, estamos siendo atiborrados, sobrealimentados de información. En nuestra cultura, la información fluye de modo mucho más dinámico pero también menos organizado. El alumno es bombardeado por diversos canales de comunicación que proporcionan, sin apenas filtro, conocimientos supuestamente científicos que, sin embargo, pueden ser poco congruentes entre sí. En este sentido cabría esperar que la escuela en lugar de considerarse la única fuente de información científica sirviera más para integrar o reinterpretar esas diversas fuentes, permitiendo además un uso más discriminativo o reflexivo de las mismas. La aceptación acrítica de toda la información científica presentada por canales divulgativos puede producir más ruido o confusión que conocimiento, si no se sabe filtrar adecuadamente esa información, mediante los conocimientos conceptuales y procedimentales adecuados. Así, el alumno, habituado a escuchar que los detergentes tienen bioenzimas o a asistir a fascinantes espectáculos audiovisuales, a guerras galácticas en las que se escuchan en sonido estereofónico explosiones en el espacio vacío interestelar, puede necesitar de la escuela una reinterpretación de esas informaciones dudosas, más que el desprecio del mundo académico por la trivialidad y el engaño de esa cultura *fast food*. La escuela debe ayudar a reconstruir el saber cultural, pero en lugar de ello, con frecuencia no es sino una fuente más de ideas confusas y concepciones alternativas.

Origen escolar: las concepciones analógicas

Cuando se habla de las ideas de los alumnos suele pensarse implícitamente en las dos fuentes que acabamos de mencionar, olvidándose con frecuencia la importancia de los aprendizajes escolares en la generación de ideas que van a influir a su vez en posteriores aprendizajes. Únicamente se suele hacer mención a esta fuente para referirse a posibles "errores" conceptuales de los alumnos que tienen aparentemente su origen en la propia enseñanza recibida. Presentaciones deformadas o simplificadas de ciertos conceptos conducen a una comprensión errónea, desviada, por parte de los alumnos que no hace sino reflejar la información o la interpretación recibida.

Pero, a menudo, las ideas que los alumnos obtienen del conocimiento escolar no se limitan a reflejar errores conceptuales presentes en los libros de textos o las explicaciones recibidas. Más bien reflejan un "error" didáctico en la forma en que se les presentan los saberes científicos. Al no presentarse el conocimiento científico como un saber *diferente* de otras formas de saber, los alumnos tienden a asimilar esos conocimientos escolares, de forma analógica, a sus otras fuentes de "conocimiento científico" sobre el mundo. La consecuencia más directa es una incompreensión de la propia naturaleza del discurso científico, al confundirlo y mezclarlo con su conocimiento sensorial y social. En otras palabras, los modelos científicos (usualmente referidos a estructuras no observables del macrocosmos o del microcosmos) se mezclan, se difuminan, en aquellos ámbitos del discurso cotidiano (referido al mesocosmos) con referentes comunes. El alumno concibe como análogos sistemas de conocimiento que son complementarios, pero diferentes. Así, como veremos en detalle en el Capítulo VI, a la estructura microscópica de la materia se le atribuyen propiedades macroscópicas, y viceversa. También confunde el movimiento, algo directamente observable, perteneciente al mesocosmos, con la fuerza, una entidad no observable; "sustancializa" (es decir se convierte en objeto material, del mundo real) la energía (véase el Capítulo VII); confunde el fenotipo (con rasgos observables pertenecientes al mesocosmos) con el genotipo (un concepto referido a microcosmos); cree que los electrones dan vueltas por una *pista* situada alrededor del átomo o que los peces respiran con pulmones.

Vemos así que por diferentes vías —sensorial, cultural y escolar— los alumnos adquieren un fuerte bagaje de concepciones alternativas firmemente arraigadas —en los sentidos, en el lenguaje y la cultura, en las tareas escolares— que a pesar de su diferente carácter —espontáneo, social o escolar— interactúan y se mezclan entre sí, dando lugar a esa *ciencia intuitiva* que tan difícil resulta modificar en las aulas de ciencias,

incluso a través de estrategias deliberadamente diseñadas para ello, como veremos en el Capítulo VIII. Parte de las dificultades en modificar o cambiar esas concepciones alternativas provienen de su propia naturaleza representacional —su carácter implícito pero al mismo tiempo altamente organizado, su funcionalidad en el conocimiento cotidiano—, pero otra parte podría deberse a nuestro desconocimiento de esa misma naturaleza, que ha conducido a estrategias didácticas de dudosa eficacia para el cambio conceptual. Por ello, antes de ocuparnos de las estrategias didácticas para el cambio conceptual conviene detenerse en detalle en la naturaleza de esas concepciones alternativas, que como vamos a ver constituyen auténticas *teorías implícitas*.

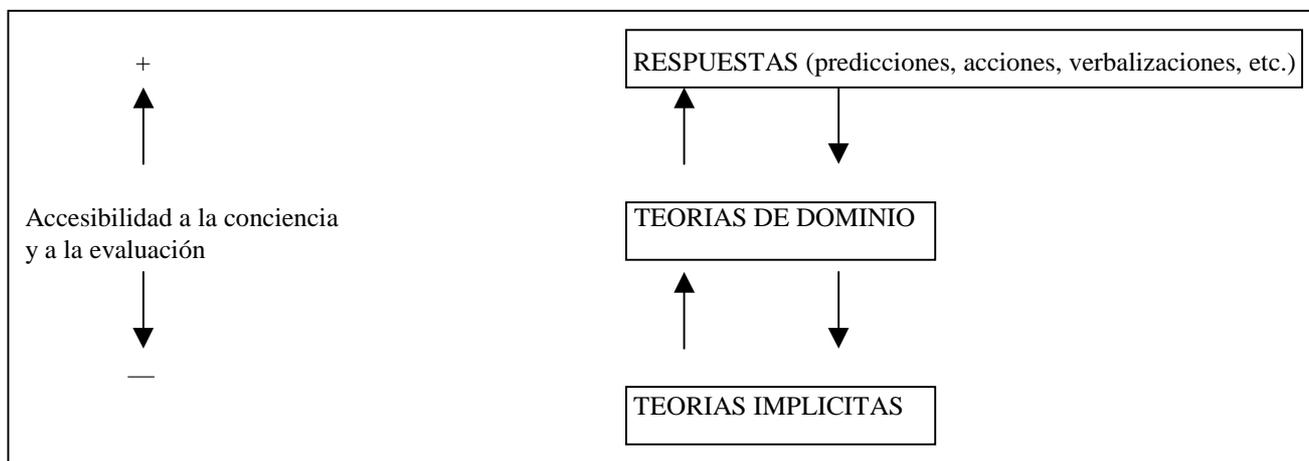
Las concepciones alternativas como teorías implícitas

Hemos visto que esas concepciones alternativas que los alumnos mantienen al enfrentarse a la mayor parte de los conceptos y fenómenos científicos no son algo arbitrario o casual, no son el resultado de un error, de una irregularidad o fallo de su sistema cognitivo, sino al contrario el producto de un aprendizaje en la mayor parte de los casos informal o implícito que tiene por objeto establecer regularidades en el mundo, hacerlo más previsible y controlable. Además buena parte de esas concepciones son también un producto cultural, bien porque constituyen representaciones socialmente compartidas, bien porque responden a un intento de dar sentido a actividades culturalmente organizadas.

En suma, las concepciones alternativas no son algo accidental o coyuntural sino que tienen una naturaleza *estructural*, sistemática. Son el resultado de una mente o un sistema cognitivo que intenta dar sentido a un mundo definido no sólo por las relaciones entre los objetos físicos que pueblan el mundo, sino también por las relaciones sociales y culturales que se establecen en torno a esos objetos. No es extraño por tanto que resulte tan difícil desembarazarse de ellas en la enseñanza, ya que conforman buena parte de nuestro *sentido común* e incluso de nuestra tradición cultural. Sin embargo la enseñanza de la ciencia, si pretende que los alumnos compartan esas otras producciones culturales tan elaboradas que son los modelos y teorías de la ciencia, requiere superar o trascender esas representaciones de primera mano, un tanto superficiales, que nos ofrecen el sentido común y la cultura cotidiana. Para ello es necesario conocer algo más sobre cómo están organizadas esas concepciones alternativas y qué es lo que hay que cambiar en el llamado cambio conceptual. ¿Se trata de ideas o concepciones aisladas, inconexas, o forman parte de un entramado conceptual más compacto, de una *teoría*? ¿Son todas las ideas igualmente persistentes o resistentes al cambio o unas lo son más que otras? ¿Qué es exactamente lo que hay que cambiar en la "ciencia intuitiva" de los alumnos? ¿Y cómo?

Al igual que sucede en otros ámbitos, al analizar las relaciones entre el conocimiento científico y cotidiano en un dominio dado (por ej., Pozo, 1994; Rodrigo, 1997, Rodrigo y Correa, 1998) conviene diferenciar entre diversos niveles de análisis representacional. La Figura 4.2 ilustra esos diferentes niveles de análisis. En un nivel más superficial, y por tanto metodológicamente más accesible y más fácil de explicitar por el propio sujeto, se hallarían las creencias, predicciones, juicios, interpretaciones, etc., que ese sujeto realiza sobre las situaciones y tareas a las que se enfrenta.

FIGURA 4.2. Niveles de análisis de las representaciones



Si preguntamos a un alumno por la trayectoria de un objeto en su caída, las causas de la flotación de los objetos en el agua o le pedimos que elija entre las diversas opciones de respuesta sugeridas en la tarea de la Tabla 4.5, estamos activando predicciones, creencias, verbalizaciones, etc., en respuesta a la demanda planteada en esa situación concreta. El alumno puede generar con relativa facilidad una representación, en forma de imagen o explicitada a través del lenguaje, puede acceder con relativa facilidad a esa interpretación, y nosotros, como educadores o investigadores, también. Nos hallamos en un primer nivel de análisis de las representaciones, más accesible o inmediato, más fácil de conocer.

TABLA 4.5. Un ejemplo de ítem de química diseñado para estudiar las creencias de los alumnos sobre el estado de movimiento de las partículas constituyentes de una sustancia. (Tomado de Pozo y Gómez Crespo, 1997a)

Tenemos un vaso lleno de agua, quieto encima de una mesa. ¿Cómo crees que estarán, en el vaso, las partículas que forman el agua?

- A. Están siempre quietas, inmóviles.
- B. Sólo se mueven si agitamos el vaso.
- C. Están moviéndose siempre.
- D. Se mueven cuando el aire disuelto en el agua las empuja.

De hecho, la mayor parte de la investigación sobre las concepciones de los alumnos se ha centrado en este nivel de análisis: plantear una tarea o un problema que induzca a los alumnos la activación de una representación y asumir que esa representación constituye una concepción alternativa con los rasgos que veíamos unas páginas atrás (generalidad, estabilidad y resistencia al cambio, cierta coherencia, etc.). Sin embargo, un rasgo esencial de estas representaciones, según ha señalado Rodrigo (1997, Rodrigo y Correa 1998), es su carácter situacional. Se trata de representaciones activadas para una situación específica, que, en muchos casos, se construyen o elaboran *ad hoc*, en respuesta a esas demandas contextuales, sin que necesariamente estén almacenadas de modo permanente o explícito en el sistema cognitivo del sujeto. En este sentido responderían a los rasgos representacionales de los modelos mentales (Rodrigo, 1997), representaciones inestables, activadas en la memoria de trabajo. Por tanto aunque son relativamente accesibles a la conciencia del sujeto, son en muchos casos representaciones aún implícitas, ya que ni siquiera han llegado a constituirse, por su uso reiterado, en representaciones presentes explícitamente en el sistema cognitivo del sujeto. De hecho, no podemos asumir que toda representación activada por los sujetos en respuesta a la demanda de una tarea o un problema escolar es una concepción alternativa con los rasgos y el origen que antes se han descrito. Algunas de ellas tienen un carácter contextual, situacional, mientras que otras, por su mayor funcionalidad, por uso reiterado ante contextos bien diferentes, tienen ese carácter estructural al que aludíamos antes. Estas últimas son las que, para su modificación, requieren un verdadero cambio conceptual.

Para conocer cuáles de esas ideas, predicciones o acciones tienen un verdadero significado, constituyen auténticas alternativas conceptuales al conocimiento científico, hay que estudiarlas no como ideas aisladas, sino como parte de un sistema de conocimiento más amplio, constituido por las relaciones entre esas concepciones. Tanto en la historia de la ciencia como en su aprendizaje, el cambio no implica tanto sustituir unas ideas por otras, como modificar las relaciones entre esas ideas que son las que determinan su significado. La nueva teoría científica no abandona todas las ideas de las teorías precedentes, sino que las reestructura, cambia su sentido en el marco de la teoría (Estany, 1990; Thagard, 1992). Igual sucede en el aprendizaje de la ciencia: lo que cambia no son tanto las ideas aisladas como las teorías de las que forman parte (Benlloch, 1997; Benlloch y Pozo, 1996). Las verdaderas concepciones alternativas son producto de una *teoría de dominio*, constituida por el conjunto de representaciones de diverso tipo activadas por los sujetos ante contextos pertenecientes a un dominio dado.³

³ Aunque la definición o delimitación de un *dominio* es también un asunto complejo, y varía en función de que se utilicen criterios epistemológicos, psicológicos o educativos, para no complicar más las cosas al lector, que ya bastante complicadas están de por sí, aquí asumiremos que un dominio está constituido por un área científica de conocimiento, que a su vez se divide en subdominios (dentro de la física se podría diferenciar entre mecánica, termodinámica, electromagnetismo, etc.). Obviamente esa delimitación de los dominios no coincidirá con la organización de las concepciones alternativas de los alumnos, que estarían basadas en criterios distintos. Para un análisis más detallado del concepto de dominio véanse Hirschfeld y Gelman (1994), Karmiloff-Smith (1992), Pozo (1994).

Estas teorías de dominio serían menos accesibles tanto para el investigador como para los propios procesos de explicitación del sujeto. Así, a partir de una serie de tareas en las que pedimos a un alumno que prediga la trayectoria de diversos objetos en movimiento, podemos concluir que mantiene una teoría para el dominio de la cinemática según la cual "todo movimiento implica una fuerza equivalente" o, aún más, podemos llegar a afirmar que esos alumnos mantienen una teoría aristotélica sobre el movimiento de los objetos (Driver y cols., 1994; Hierrezuelo y Montero, 1991; Pozo, 1987; véase también más adelante Capítulo VII). Pero ello no quiere decir que el alumno mantenga de modo explícito esa teoría de dominio, que pueda hacer explícita esa regularidad conceptual que nosotros inferimos a partir de sus acciones y predicciones. En este sentido las teorías de dominio requieren un mayor esfuerzo cognitivo y una mayor cantidad de práctica para su explicitación.

Se trataría sin embargo de representaciones más estables que los modelos mentales situacionales (Rodrigo, 1997), ya que, como producto de la práctica repetida con situaciones similares, las teorías de dominio se hallarían representadas de modo explícito en la memoria permanente del sujeto, en forma de un conjunto de reglas o regularidades a partir de las cuales se constituirían esos modelos mentales situacionales. En este sentido, adoptando el modelo desarrollado por Karmiloff-Smith (1992) sobre los procesos de explicitación del conocimiento, diríamos que las teorías de dominio, si bien son implícitas en el sentido de no ser aún accesibles a la conciencia del sujeto, se hallan ya explícitamente representadas en la memoria (Karmiloff-Smith, 1992). La explicitación sería un proceso continuo que implicaría diversos niveles de redescrición representacional basados en códigos de creciente abstracción o formalización. Un conocimiento puede ser explícito sin ser consciente, y puede ser consciente sin ser verbalizable, pero las formas superiores de explicitación implican la capacidad de redescibir fenómenos o situaciones en términos de lenguajes y códigos con notable nivel de abstracción o descontextualización, como los lenguajes de las ciencias (Lemke, 1993; Mortimer y Machado, 1998). En el próximo capítulo analizaremos con mayor detalle los procesos de explicitación o redescrición del conocimiento en el aprendizaje de la ciencia.

Por tanto si bien las teorías de dominio son menos accesibles a la conciencia, más difíciles de explicitar, ya que requieren tomar conciencia de distintas representaciones activadas en contextos diferentes, son representaciones más estables y persistentes que los modelos mentales. Por supuesto, dentro de un mismo sujeto pueden coexistir diversas teorías para un mismo dominio, o si se prefiere para subdominios diferenciados, con grados distintos de consistencia interna y estabilidad. En general cuanto más estable es una teoría de dominio mayor es su consistencia (Pozo y Gómez Crespo, 1997a), de forma que la consistencia de las teorías alternativas mantenidas por los alumnos puede ser un buen índice de su resistencia al cambio.

Además, según la Figura 4.2, las teorías de dominio determinarían las concepciones que activaría cada sujeto en respuesta a las demandas específicas de cada situación concreta, cuyos rasgos esenciales, estructurales, vendrían dados por la estructura de sus teorías en ese dominio. De esta forma, las teorías de dominio vendrían a proporcionar, o a consistir en, los rasgos invariantes de los modelos mentales activados en diferentes contextos dentro un mismo ámbito de conocimiento. ¿Pero de dónde provendría la regularidad de las teorías de dominio? Tal como establece también la Figura 4.2, a su vez las teorías de dominio se organizarían o estructurarían a partir de una serie de supuestos implícitos, que constituirían una teoría-marco (Vosniadou, 1994a) o una *teoría implícita* (Pozo y cols., 1992; Pozo y Scheuer, 1998).

Las teorías implícitas estarían constituidas de hecho a partir de un conjunto de reglas o restricciones en el procesamiento de la información que determinarían no sólo la selección de la información procesada sino también las relaciones establecidas entre los elementos de esa información. Podríamos decir que estas teorías serían una especie de *sistema operativo* del funcionamiento cognitivo (Riviere, 1997), que a través de las restricciones impuestas, formatearía las representaciones elaboradas por el sujeto para un dominio dado, sus teorías de dominio, y en suma determinarían la forma en que procesa un escenario concreto. Según Vosniadou (1994b) esas teorías-marco, o supuestos implícitos al procesamiento de información en ciertos dominios, se constituirían de forma muy temprana en la infancia. Así, en el dominio físico, Spelke (1991, Carey y Spelke, 1994) identifica tres principios perceptivos (cohesión, contacto y contigüidad) que subyacen al procesamiento que los bebés hacen del movimiento de los objetos y que seguirían guiando también las teorías intuitivas de la física adulta. Estos principios darían forma, *formatearían*, a las representaciones que todas las personas tenemos sobre el movimiento de los objetos y acabarían por entrar en colisión con los *principios* que subyacen a los principales conceptos de la mecánica newtoniana. Si, tal como se indicó al comienzo de este capítulo, la enseñanza de conceptos científicos debe ayudar a comprender a los alumnos los principios en los que éstos se fundan, será necesario cambiar los principios, o supuestos implícitos, en los que a su vez se funda el conocimiento cotidiano o alternativo, que constituirían las teorías implícitas de los alumnos.

Un rasgo importante de las teorías implícitas es que tendrían un carácter más general que las propias teorías de dominio, ya que las representaciones activadas por los sujetos en diversos dominios podrían compartir las mismas restricciones de procesamiento, el mismo sistema operativo. De hecho esos principios de contacto, contigüidad y cohesión pueden rastrearse en otros dominios distintos, ya que en realidad son producto de reglas generales en el aprendizaje implícito, como las que señalamos unas páginas más atrás al analizar el origen sensorial de algunas concepciones (ver también Pozo, 1987, sobre las relaciones entre esas reglas y el pensamiento causal). Además, las teorías implícitas serían aún más estables que las propias teorías de dominio. Distintas teorías de dominio pueden sustentarse en los mismos supuestos implícitos. Por ejemplo, los alumnos pueden mantener diferentes teorías sobre la naturaleza de la materia, pero todas ellas asumen, como supuestos implícitos, el carácter continuo y estático de la materia, determinado por la interpretación de esas situaciones en forma de relaciones causales lineales —en las que todo cambio debe responder a la acción inmediata de un agente— y de una analogía entre el modelo (la estructura corpuscular de la materia) y la realidad que representa (la apariencia macroscópica de esa misma materia) (véase el Capítulo VI).

El alumno puede cambiar su teoría de dominio pero manteniendo los mismos supuestos implícitos. Por ejemplo, un alumno puede abandonar la teoría aristotélica sobre el movimiento de los objetos y en su lugar asumir una versión de la teoría medieval del ímpetu, sin que ello suponga superar las restricciones implícitas al procesamiento del movimiento de los objetos, consistentes de nuevo en asumir una causalidad lineal entre fuerza y movimiento —lo que le sigue impidiendo asumir la explicación newtoniana del movimiento como el producto de la interacción entre un sistema de fuerzas— y la analogía entre modelo y realidad (cuando un objeto está inmóvil no existe ninguna fuerza actuando sobre él ya que no percibe ningún efecto visible). El cambio conceptual radical, concebido como una reestructuración profunda en un dominio dado, se produciría únicamente cuando cambiasen también esos supuestos implícitos que subyacen a las teorías de dominio, superando las fuertes restricciones al procesamiento impuestas por el propio sistema cognitivo (Chi, Slotta y De Leeuw, 1994; Pozo, en prensa b; Vosniadou, 1994a).

Esas restricciones estarían muy vinculadas al sistema operativo que regiría los mecanismos de aprendizaje implícito, por oposición al aprendizaje explícito necesario para la adquisición de conocimientos académicos, un sistema muy antiguo en la filogenia y en la ontogenia, poco flexible y con escaso control cognitivo, pero muy robusto y con una gran economía de recursos cognitivos en su funcionamiento (O'Brien-Malone y Maybery, 1998; Pozo, 1996 a; Reber, 1993). Aunque, como veremos en el próximo capítulo, el cambio conceptual no tendría por qué implicar el rechazo de un sistema con tanto valor pragmático y adaptativo, sí permitiría superar sus restricciones en dominios específicos, generando nuevas teorías para esos dominios que trascendieran las restricciones impuestas por esas teorías implícitas. ¿Pero cuáles son exactamente esas restricciones que deben superarse para lograr el cambio conceptual? ¿Cuáles son las diferencias entre los *principios subyacentes* a las teorías científicas y a las teorías implícitas?⁴ Existen diversas posiciones o teorías sobre las diferencias entre el conocimiento cotidiano y el conocimiento científico (por ej., Claxton, 1984; Chi, 1992; Pozo y Carretero, 1987; Pozo y cols., 1991, 1992; Rodrigo, 1997, RODRIGO Y CORRI A, 1998; VOSNIADOU, 1994a), de las cuales podemos extraer tres grandes diferencias en los principios que subyacen a las teorías intuitivas y científicas, que sería necesario cambiar para lograr una comprensión de estas últimas. El conocimiento intuitivo o cotidiano se apoya en supuestos epistemológicos, ontológicos y conceptuales radicalmente distintos a los que subyacen a las teorías científicas.

PRINCIPIOS EPISTEMOLÓGICOS

Según Vosniadou (1994a), entre las teorías científicas y las teorías de dominio mantenidas por los sujetos existe una incompatibilidad básica debida a ciertos supuestos epistemológicos impuestos por la teoría-marco, o teoría implícita, al sistema de creencias de los alumnos, que no serían compatibles con los supuestos subyacentes a la teoría científica. Estos supuestos tendrían una función similar en el conocimiento cotidiano a los paradigmas de Kuhn (1962) o a los programas de investigación de Lakatos (1978). Es decir

⁴ Obviamente aunque aquí no nos detengamos en ello, el análisis que hemos hecho de las concepciones alternativas en tres niveles representacionales diferentes, pero conectados entre sí, puede aplicarse también al propio conocimiento científico, donde cabría diferenciar entre modelos, teorías y principios. Aunque sin duda el conocimiento científico tiene un nivel de explicitación y estabilidad mayor que el conocimiento intuitivo también aquí cabría diferenciar entre la estabilidad y explicitación de las representaciones en cada uno de estos niveles del conocimiento científico.

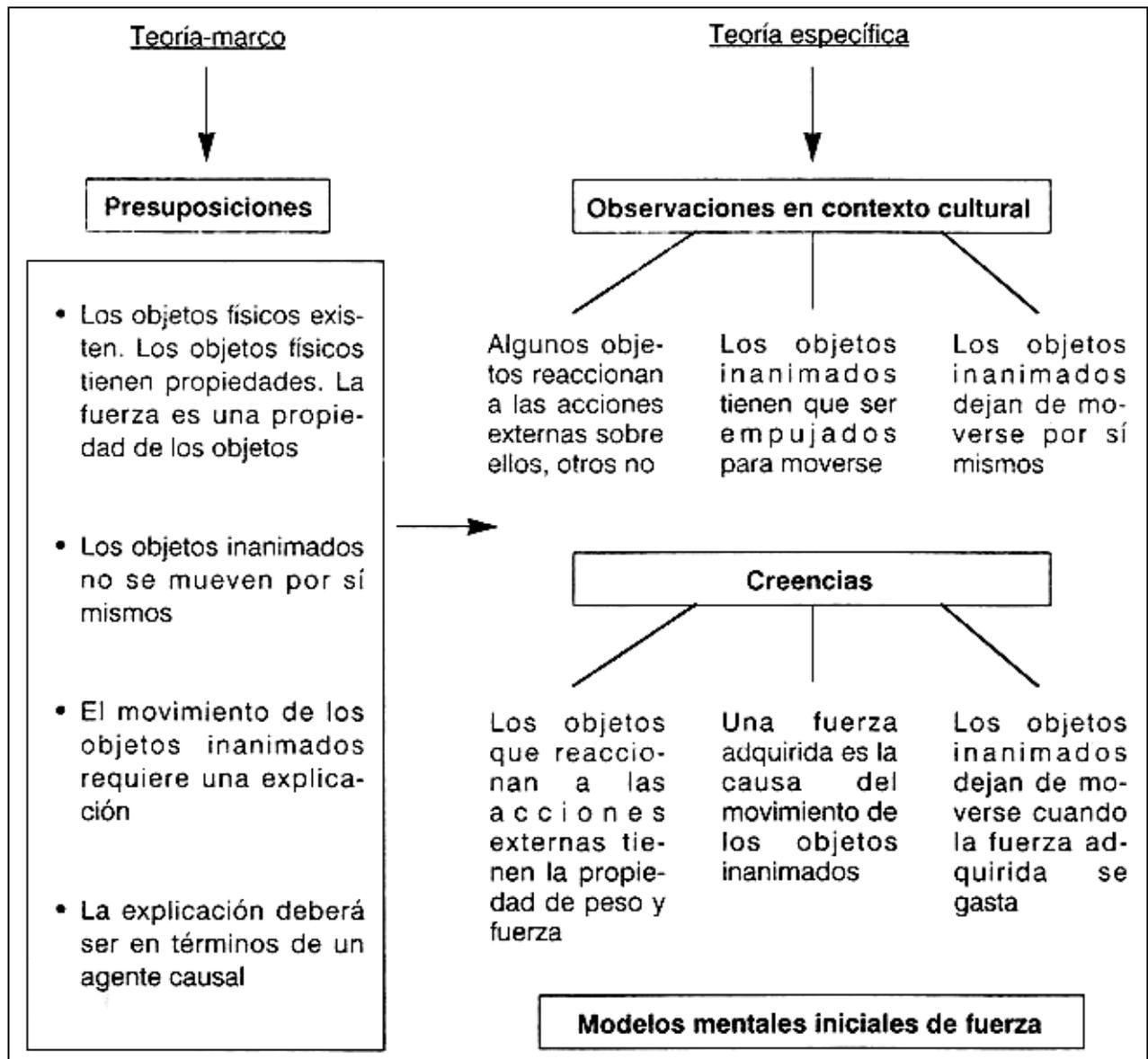
que, a la hora de generar representaciones específicas para predecir o explicar cualquier fenómeno cotidiano —sea la evaporación del agua cuando hierve, la trayectoria de un balón en movimiento o la mejor manera de cuidar una planta— nuestro conocimiento intuitivo *asume* de forma implícita ciertos principios sobre la naturaleza de la realidad y actúa conforme a ellos (por ej., que la realidad existe, hay un objeto real ahí fuera que es un balón y tiene propiedades, es rojo, grande, pesado y se está moviendo, y que el mundo es tal como aparece ante nuestros sentidos, el balón es rojo, no es que yo lo vea rojo, se está moviendo, no es que yo lo vea moverse, etc.). O en otras palabras, las teorías de dominio generadas en cada uno de esos ámbitos adoptarían, de forma implícita y por tanto acrítica, la forma de esos principios, se *formatearían* de acuerdo con ellos.

Según Vosniadou (1994a) algunos de estos principios diferirían de los aceptados por las teorías científicas, que, como veíamos en el Capítulo III, no tratan tanto de la realidad como de los modelos elaborados para dar sentido a la realidad. La energía, la fuerza o el movimiento no serían tanto propiedades absolutas de los objetos sino relaciones atribuidas por los modelos a esos objetos, de forma que los modelos pueden diferir, y de hecho difieren, de la realidad percibida. Así, el movimiento y el reposo no son propiedades absolutas de los objetos, aunque sensorialmente lo parezca, sino que dependen de las relaciones entre objetos; de hecho, aunque aparentemente suceda lo contrario, todos los objetos del Universo están en movimiento continuo, el libro que el lector tiene en sus manos, e incluso el propio lector, se está moviendo imperceptiblemente en este momento, navegando a una velocidad estimable pero inapreciable en *la realidad* sensorial.

Estos diferentes principios epistemológicos —o supuestos implícitos sobre las relaciones entre nuestro conocimiento y el mundo— dan lugar de hecho a diferentes teorías de dominio. Por ejemplo, la Figura 4.3 presenta los supuestos en que se basan las teorías de los alumnos sobre la fuerza, en contraposición con las teorías científicas. En nuestro conocimiento cotidiano suponemos (como veremos en el Capítulo VII) que la fuerza es una propiedad absoluta de los objetos, igual que asumimos que el color o el peso son también propiedades absolutas de esos objetos, y no el producto de la relación entre esos objetos y otros objetos. Igualmente, los alumnos asumen que el reposo es el estado “natural” de los objetos y que por tanto todo movimiento requiere ser explicado a través de un agente causal y que los objetos inanimados sólo pueden moverse por la acción de un agente externo. De esta forma, están estableciendo restricciones a sus teorías de la fuerza que van a hacer imposible la asimilación del modelo newtoniano como un sistema de interacción y equilibrio dentro de un modelo formal. En la mecánica newtoniana, movimiento y reposo son dos estados dependientes de la interacción entre diversas fuerzas, mientras que para el conocimiento cotidiano se trata de dos situaciones aparentemente distintas. En la vida diaria cuando vemos que un objeto se mueve buscamos una explicación en términos de un agente externo, una fuerza, que ha causado ese movimiento y, cuando el movimiento termina, asumimos que es porque se ha agotado la fuerza que lo impulsaba. Esta relación causal directa entre fuerza y movimiento hará imposible la comprensión, por ejemplo, del principio de la inercia o la propia diferenciación entre fuerza y movimiento. De la misma forma, no concebimos el color como una *relación* entre la luz que ilumina el objeto y el ojo que lo percibe, sino que atribuimos el color como una propiedad absoluta, real, de ese objeto: ese libro tiene las tapas rojas y ese sillón es azul. Sin embargo, para una persona daltónica ese libro *no es rojo*. Tendemos a atribuir a la realidad propiedades y atributos que no son sino el producto de nuestra interacción cognitiva, de nuestra construcción mental, de esa realidad.

Vosniadou (1994a) presenta otros ejemplos de los supuestos subyacentes a las teorías de los alumnos en otros dominios, como el calor o el ciclo día/noche. Aunque no queda claro si se trata de una lista cerrada de supuestos, comunes a todos esos dominios, o si los supuestos incompatibles difieren de un dominio a otro, parece haber ciertos rasgos globales comunes a los supuestos epistemológicos del conocimiento cotidiano en diferentes dominios, como una cierta *fe realista*, según la cual el mundo es tal como lo vemos, y lo que no vemos (por ej., las fuerzas equilibradas que actúan sobre un objeto en reposo aparente) no existe o al menos resulta muy difícil de concebir. De hecho, Vosniadou (1994b) mantiene que esos supuestos son parte de una “teoría global” de la física ingenua, producto tanto de ciertas predisposiciones innatas al sistema cognitivo humano como del aprendizaje en los contextos culturales en la vida cotidiana. Esa teoría implícita diferiría de la científica no sólo en su forma de concebir el conocimiento, sino también en el tipo de entidades que forman parte de la teoría, en su ontología.

Figura 4.3. Estructura conceptual hipotética que subyace a los modelos mentales iniciales de fuerza según VOSNIADOU (1994a)



Principios ontológicos

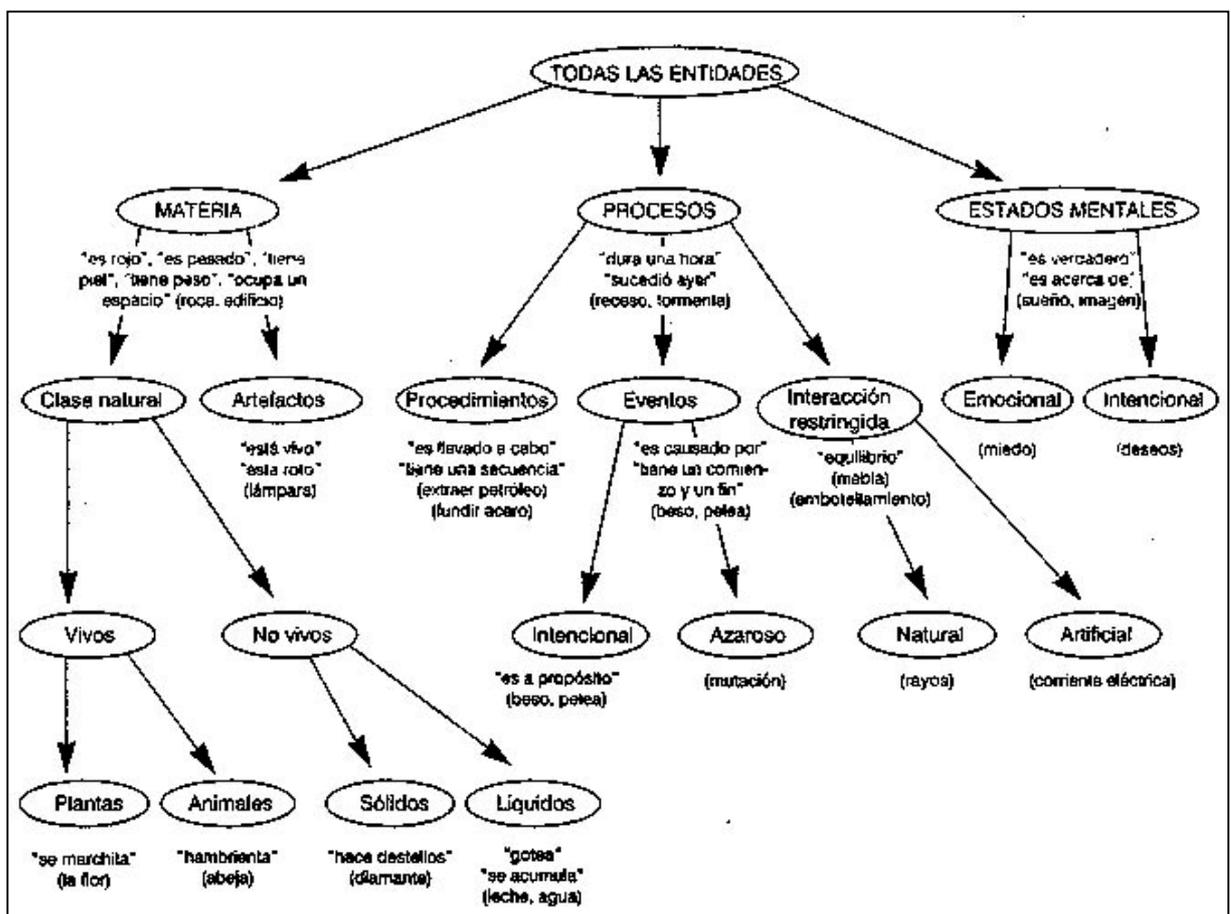
Otra teoría del cambio conceptual, desarrollada por Chi (1992; Chi, Slotta Y De Leeuw, 1994) propone unos rasgos más precisos y detallados, al concebir que el cambio conceptual se hace necesario cuando existe una incompatibilidad ontológica entre la teoría científica y la teoría mantenida por el alumno. Según este modelo, las personas clasificamos todos los objetos del mundo en un número limitado de categorías ontológicas, a las que atribuimos unas propiedades determinadas. Cada vez que interpretamos que un hecho o un objeto pertenece a una determinada categoría ontológica (es una enfermedad, un proceso de evaporación o un pájaro), por el simple hecho de categorizarlo así, tenderemos a atribuirle una serie de características (si es un pájaro tendrá alas y volará, tendrá pico y plumas, se reproducirá mediante huevos, etc.). Keil (1992) ha demostrado que los niños de 3-4 años utilizan ya estas categorías ontológicas para interpretar el mundo que les rodea con bastante eficiencia y poder predictivo, ya que les permiten atribuir y predecir muchas propiedades a objetos o situaciones nuevas a partir de su adscripción o categorización en entidades conocidas. De hecho ésta es la utilidad fundamental de las categorías y conceptos: hacer más previsible el mundo, asimilando los fenómenos nuevos a entidades ya conocidas. Ahora bien, esta funcionalidad de las categorías y los conceptos proviene de su organización jerárquica. Buena parte de las características que pueden atribuirse a un pájaro proviene de su inclusión en otras categorías más amplias (ser vivo, animal, vertebrado, etc.). Ante un animal nuevo, desconocido para ellos, los niños de 3-4 años

estudiados por Keil (1992) asumían, que al ser animal comerá, beberá, dormirá, tendrá padres, etc. Aunque algunas de estas atribuciones puedan resultar erróneas en casos concretos (de hecho, la ingeniería genética puede acabar con algunas de nuestras creencias ontológicas más acervadas), en términos generales nuestra jerarquía ontológica, en gran medida implícita en el procesamiento, nos ayuda a poner orden en el mundo.

¿Pero cómo tenemos organizado ontológicamente el mundo? Según Chi (1992) en la parte más alta de nuestra jerarquía ontológica habría tres categorías fundamentales, subdivididas a su vez en otras categorías menores. Esas tres grandes categorías ontológicas, en la teoría de Chi, serían las de *materia*, *procesos* y *estados mentales* (ver Figura 4.4). Si consideramos que algo es materia, le atribuiremos ciertas propiedades “materiales” (peso, volumen, densidad, color, etc.); le estamos atribuyendo una naturaleza ontológica *objetiva*, estamos suponiendo que se trata de un objeto existente en el mundo. Así consideramos que las mesas, las nubes o los perros son materia de distinta naturaleza, es decir que diferenciamos su naturaleza material en otras subcategorías (vivo/no vivo, etc.). En cambio interpretar algo como un proceso implica concebirlo como un hecho o un suceso, algo que ocurre en el tiempo, y que puede a su vez tener diferente naturaleza, como puede ser la evaporación, la rotura de un cristal o una tormenta. Finalmente si consideramos algo como un estado mental es que se lo atribuimos a un “objeto con mente” (Riviere, 1991) que tiene el deseo o la intención de hacer algo.

Para Chi (1992) nuestra comprensión del mundo está determinada por las categorías ontológicas (materia, procesos o estados mentales) desde las que lo interpretamos. Y cambiar nuestra comprensión del mundo es cambiar nuestras atribuciones ontológicas. Si los alumnos, como veremos en el Capítulo VII, interpretan la energía como materia —es decir la sustancializan, la convierten en un objeto— difícilmente podrán entender el principio de conservación de la energía, que requiere interpretarla como un proceso de interacción. Interpretar la energía o la fuerza como propiedades materiales es bien diferente de interpretarlas como procesos. Asumir que la motivación de los alumnos es un “estado mental” es distinto que concebirla como un proceso, resultado de las interacciones producidas en el aula.

Figura 4.4. Un posible esquema de categorización del mundo según CHI (1992). Las categorías separadas en forma horizontal son ontológicamente diferentes. El cambio conceptual implicaría el paso de una rama principal a otra.



En general, el cambio conceptual radical se requerirá, según el modelo de Chi (1992), cuando fuese preciso cambiar una entidad de una categoría principal a otra. Así, se requeriría una reestructuración ontológica para el peso no como una propiedad de la materia sino como un proceso, una relación entre la masa de dos cuerpos, de forma que el peso de un objeto no sólo depende de sí mismo, no es un estado, sino el producto de la relación entre dos masas. Cuando en un artículo que narra una expedición al Himalaya se dice que cada *sherpa* cargaba con “50 kilos” de equipaje parece asumirse que el peso del equipaje es un estado y no un proceso, es decir una propiedad material, absoluta, y no una relación. Lo mismo sucede con otros muchos conceptos científicos, como la energía, el calor, la fuerza, etc., que tienden a aceptarse, por los alumnos; pero también en el conocimiento cotidiano, como entidades materiales, tienden a *sustancializarse* o materializarse, de forma que se les atribuyen las propiedades de la materia. Como ha mostrado Viennot (1996), mientras que en el conocimiento cotidiano el color es una propiedad material atribuida a los objetos, la física del color requiere entenderlo como un proceso, una relación, la respuesta perceptiva a una excitación. Otro tanto podríamos decir de la fuerza, la energía o incluso los distintos estados de agregación de la materia, que para ser comprendidos en un significado próximo al de la ciencia, deben entenderse no como propiedades estáticas, sino como procesos, y más concretamente como procesos de interacción. De esta manera, la evolución en la comprensión de un concepto implicaría diferentes cambios en su adscripción ontológica. Así, por ejemplo, los niños al principio ni siquiera atribuyen al aire propiedades materiales (peso, densidad, volumen, etc.) (Benlloch, 1997; Carey, 1991; Seré, 1985), por lo que para ellos sería una no-entidad, algo de hecho inexistente. Más adelante consiguen comprender la naturaleza material del aire, con lo que al adscribirlo a la categoría materia, le asignan ciertas propiedades materiales como pesar, ocupar espacio, etc. Para alcanzar una mejor comprensión de la estructura material del aire y de los gases en general, deberán realizar una nueva atribución ontológica, pasando a concebir esas diferentes propiedades como el resultado de un proceso de interacción entre las partículas. Así, esas diversas propiedades (peso, densidad, volumen, temperatura) formarían parte de un sistema complejo de relaciones de cambio y conservación (Benlloch, 1997; Benlloch y Pozo, 1996).

Por tanto, aunque según Chi (1992) el cambio conceptual sería necesario siempre que fuera preciso reasignar un fenómeno u objeto de una categoría ontológica principal a otra (o sea, en el caso de la física y la química, en las que a partir de cierta edad en general puede excluirse la interpretación en términos de estados mentales, pasar de concebirlo como materia a entenderlo como un proceso, o viceversa), lo cierto es que la mayor parte de los cambios conceptuales radicales que analizan Chi, Slotta y De Leeuw (1994) se deben a la dificultad para reinterpretar ciertos fenómenos en términos de una única categoría ontológica subordinada, la de interacción. Según Chi, Slotta y De Leeuw (1994, pág. 32), esta categoría implicaría interpretar un fenómeno en términos de situaciones de equilibrio, sin principio ni fin, en las que no puede identificarse una causa y en las que varios sistemas están interactuando simultáneamente (como por ejemplo, comprender la materia en términos de partículas en continua interacción o interpretar el calor como un problema de transferencia y equilibrio energético). Frente a la tendencia cotidiana a interpretar los procesos dentro de relaciones causales lineales y unidireccionales, tal como se ha descrito en un apartado anterior de este capítulo, al referirnos al origen de las concepciones alternativas, las teorías científicas suelen concebirlos más bien como un sistema de interacciones en búsqueda de estados de equilibrio. Los esquemas de interacción desempeñarían una función muy importante en las teorías científicas, donde conceptos como energía o fuerza se entienden en el marco de una interacción dentro o entre sistemas, uno de los esquemas formales analizados al final del Capítulo III. No es que la manta produzca calor es que reduce el intercambio de energía, produciendo un estado de aparente equilibrio térmico. La fuerza que pone en movimiento un balón no se consume, sino que la acción de otras fuerzas reduce la velocidad hasta llevar al balón a un estado de reposo, es decir de fuerzas en *equilibrio*. O incluso, las relaciones entre (des)motivación y aprendizaje no son unidireccionales y simples, sino que forman parte de un complejo sistema de interacciones sociales en el aula, como vimos en el Capítulo II.

De hecho, es difícil pensar en una adecuada comprensión de la mayor parte de los conceptos científicos si éstos no se interpretan en el marco de sistemas en interacción. La tendencia a sustancializar o materializar buena parte de los conceptos científicos se basa por tanto en principios no sólo epistemológicos y ontológicos, sino también conceptuales. O, en otras palabras, las diferencias en los principios epistemológicos y ontológicos entre las teorías científicas y las teorías alternativas se traducen finalmente en diferencias, más operativizables o cercanas a la práctica docente, en la *estructura conceptual* de unas y otras teorías.

Principios conceptuales

Una diferencia esencial entre las teorías cotidianas y científicas reside en la forma en que están estructurados los conceptos en unas y otras. Mientras que las teorías científicas utilizan esquemas o estructuras conceptuales próximos a los esquemas operatorios formales de Inhelder y Piaget (1955), descritos en el capítulo anterior (págs. 78-79), las teorías implícitas se basan en estructuras conceptuales mucho más simples, que se oponen en buena medida a esos esquemas formales subyacentes a las teorías científicas, por lo que el aprendizaje de la ciencia requerirá, además del cambio epistemológico y ontológico que acabamos de ver, un cambio en las estructuras conceptuales, o reestructuración de los conocimientos. Dicho de otra manera, el alumno no logrará asimilar el conocimiento científico que se le presenta en el aula a menos que logre interpretar la tarea mediante un esquema conceptual más complejo, cuyas características están próximas a las del pensamiento formal piagetiano. La Tabla 4.6 resume las tres principales restricciones estructurales de las teorías implícitas que impiden la asimilación de aquellos conceptos científicos basados en esquemas o estructuras formales, que son la mayoría. A continuación describiremos brevemente estas tres grandes diferencias estructurales entre teorías implícitas y científicas, que el lector puede encontrar desarrolladas con detalle en los Capítulos VI, para el aprendizaje de la química, y VII, en el caso de la física (para una justificación más detallada de estas diferencias véanse también Pozo y cols., 1991; Pozo, 1996a).

Tabla 4.6. Restricciones estructurales de las teorías implícitas frente al conocimiento formal o científico

RESTRICCIONES ESTRUCTURALES (TEORIAS IMPLICITAS)	ESQUEMAS FORMALES (TEORIAS CIENTIFICAS)
Causalidad lineal y simple en un solo sentido (agente → objeto)	Interacción de sistemas Causalidad compleja
No cuantificación o estrategias de cuantificación erróneas	Proporción Probabilidad Correlación
Transformación sin conservación	Conservaciones no observables Sistemas en equilibrio

a) Causalidad lineal frente a interacción de sistemas

Los alumnos tienden a recurrir a un esquema causal muy simple para explicar los acontecimientos según el cual la relación entre la causa y el efecto es lineal y en un solo sentido, derivado del uso de esas reglas simplificadoras para el aprendizaje implícito cotidiano que veíamos anteriormente al referirnos al origen sensorial de las concepciones alternativas (también Andersson, 1986; Pozo, 1987). Sin embargo, la mayor parte de las teorías científicas requieren entender las situaciones como una interacción de sistemas en las que, como mínimo, se produce una de las dos situaciones siguientes:

- La relación causa/efecto no es en un solo sentido, sino que implica una relación recíproca. No es que un agente actúe sobre un objeto modificándolo, sino que dos sistemas interactúan modificándose mutuamente

- La relación implica no sólo una causa sino la interacción entre varias causas que se coordinan para producir un efecto dado. Además esa relación puede tomar a veces la forma de una compensación multiplicativa, en la que dos factores se compensan entre sí para producir un efecto constante. Estas compensaciones adoptan la forma habitual de una proporción inversa, implicando por tanto el uso de un esquema cuantitativo, al que luego nos referiremos.

Frente a la interpretación de los fenómenos en términos de sistemas en interacción, el conocimiento cotidiano restringe el procesamiento en forma de esquemas de causalidad lineal simple, según la cual la relación es lineal y en un solo sentido: agente-efecto (Andersson, 1986). Sin embargo, la mayor parte de las teorías científicas, o del conocimiento disciplinar complejo, requiere entender las situaciones como una interacción. En los Capítulos VI y VII veremos cómo este esquema de interacción es esencial para entender el principio de conservación de la energía, el principio de inercia o la propia estructura corpuscular de la materia. La tendencia a simplificar las situaciones, un rasgo usual y necesario en nuestro conocimiento cotidiano, dadas las limitaciones de nuestro sistema cognitivo de aprendizaje, restringe la posibilidad de concebir los problemas en términos de interacciones entre variables o sistemas conceptuales. Como veremos

más adelante en el Capítulo VI, nuestra concepción de la materia nos dice que, cuando una camisa se seca al sol, el viento se lleva las partículas de agua que hay en la camisa, en lugar de, como haría la química, concebir la materia como una continua interacción entre partículas, de forma que la energía proporcionada por el viento o por el sol modifica la estructura de las moléculas de agua, convirtiéndolas en vapor. Del mismo modo, un profesor que se encuentra en el aula con alumnos poco interesados por el aprendizaje de la ciencia tenderá a hacer una interpretación lineal según la cual los alumnos no aprenden porque no están interesados, sin llegar a concebir la interacción entre ambos factores dentro de un sistema de relaciones en el aula como la que hemos intentado presentar en el Capítulo II (posiblemente no estén motivados porque tampoco aprenden).

b) Cambio y transformación frente a conservación y equilibrio

Otra restricción estructural en las teorías implícitas de los alumnos, muy vinculada a la anterior, es la tendencia del pensamiento causal cotidiano a centrarse en el cambio más que en los estados (Driver, Guesne y Tiberghien, 1985; Pozo y cols., 1991).

- En la terminología empleada por el propio Piaget, diríamos que las teorías implícitas de los alumnos se centran en lo que se transforma pero no en lo que se conserva. Sin embargo, la mayor parte de los conceptos científicos implican una conservación. Cuando la conservación es directamente observable, es asequible para los niños del período operacional concreto. Pero cuando se trata de una conservación no observable, sólo puede alcanzarse por vía conceptual, es decir tomando conciencia de las relaciones entre conceptos.

- Comprender la naturaleza como un sistema de equilibrio en diversos parámetros es quizá uno de los logros más sustantivos del conocimiento científico. Sin embargo, a los alumnos les resulta muy difícil entender el equilibrio, ya sea mecánico, físico, químico, o ecológico, es decir como un sistema dinámico, un ciclo sin principio ni fin en el que la interacción de diversos sistemas produce cambios en otros elementos del sistema.

La idea de que los efectos se producen en un solo sentido implica centrarse en el cambio (acción), olvidando los efectos recíprocos (reacción), que aseguran la conservación (Inhelder y Piaget, 1955). Interpretar el mundo como un sistema de equilibrio dinámico es quizá uno de los logros más sustantivos del conocimiento científico. Las teorías científicas se organizan en torno a equilibrios cíclicos, sin principio ni fin (Chi, Slotta y De Leeuw, 1994), como la circulación de la sangre, el equilibrio térmico, el funcionamiento de la economía o el propio proceso de equilibración cognitiva según Piaget, mientras que las teorías implícitas se estructuran en torno a la cadena de sucesos que están en su origen, sucesos con principio/agente (la manta “da” calor; el alumno no está motivado) y fin/efecto (calor “transmitido” por la manta al cuerpo; el alumno no aprende), de forma que se centran en esos cambios coyunturales más que en la estructura permanente, el estado de equilibrio dinámico que hace posible que las cosas sean como son. En los Capítulos VI y VII veremos cómo estas restricciones en funcionamiento cognitivo limitan las posibilidades de comprender algunos principios básicos de la química y la física, traducidos en leyes de conservación, que se alejan bastante de los esquemas simplificadoros de gasto y consumo propios del conocimiento cotidiano en nuestra cultura, y que requieren concebir las relaciones y procesos científicos en el marco de sistemas complejos, que exigen además una cuantificación precisa y rigurosa.

c) Relaciones cualitativas frente a esquemas de cuantificación

En nuestra vida cotidiana tendemos a establecer relaciones cualitativas entre los hechos que escasamente somos capaces de cuantificar. Sin embargo, la ciencia se caracteriza por el uso de operaciones cuantitativas precisas, que determinan no sólo si existe una relación entre dos hechos sino también en qué cantidad existe. Esta necesidad de cuantificar se traduce, en el caso del pensamiento científico, en el uso combinado de tres esquemas de cuantificación, cuyo uso dista mucho de ser general entre los adolescentes e incluso los adultos universitarios (Pérez Echeverría, 1990):

- La proporción: la mayor parte de los conceptos científicos implican, como decíamos anteriormente, una relación entre dos conceptos. Pero en el caso de las ciencias físico-naturales esa relación suele adoptar además la forma de una proporción. Sin embargo, las investigaciones muestran que, ante tareas que requieren un cálculo proporcional, los alumnos, universitarios incluidos, tienden a utilizar estrategias simplificadoras, que se basan en análisis cualitativos o en reglas más simples, como la regla aditiva o las correspondencias.

- La probabilidad: aunque la mayor parte de la ciencia que se les puede enseñar a los adolescentes no corresponde a la ciencia del siglo XX y por tanto es más bien determinista, existen numerosas nociones científicas que requieren la comprensión de la probabilidad y el azar. Y sin embargo, nuevamente, los estudios muestran que el azar y la probabilidad están lejos de ser nociones intuitivas y que su comprensión es limitada entre los adolescentes y también entre los adultos.

- La correlación: se trata de un esquema útil para el análisis de datos probabilísticos, muy utilizado en las ciencias sociales y en el análisis de series numéricas en las ciencias físico naturales, basado en todos los casos en el dominio de técnicas estadísticas de complejidad diversa. Es sin duda el menos intuitivo y el más difícil de emplear, incluso por adultos especializados, ya que en su lugar tendemos a usar reglas de covariación simple como las señaladas en el apartado anterior.

De nuevo, donde el conocimiento cotidiano recurre a reglas simplificadoras o aproximativas, la ciencia usa estructuras precisas y complejas, en este caso de cálculo. Como veremos en los capítulos VI y VII, otra dificultad añadida en el aprendizaje de la química y de la física es la necesidad de cuantificar de modo preciso las complejas relaciones establecidas entre las variables o conceptos, lo cual requiere a su vez dominar estructuras de cómputo como la proporción, la probabilidad o la correlación que están lejos de ser intuitivas y fáciles de dominar (Pérez Echeverría, 1990)

En suma, las teorías científicas difieren del conocimiento cotidiano en el tipo de relaciones cualitativas (conservación, equilibrio, interacción sistémica) y cuantitativas (proporción, probabilidad y correlación) que establecen entre los conceptos componentes. Utilizar este tipo de relaciones, más complejas y elaboradas, requeriría adquirir nuevas estructuras conceptuales o, si se prefiere, aplicar unos nuevos principios conceptuales que estarían, de hecho, estrechamente ligados a los principios epistemológicos y ontológicos que hemos presentado unas páginas más atrás. De hecho, para concluir el análisis de las diferencias entre el conocimiento cotidiano y el científico, retomaremos los distintos niveles de análisis emprendidos (epistemológico, ontológico y propiamente conceptual) como aspectos o dimensiones complementarias en ese paso del conocimiento cotidiano al científico.

De las teorías implícitas a las teorías científicas: ¿qué cambia en el cambio conceptual?

Como hemos ido viendo, si asumimos que las “concepciones alternativas” son de algún modo el resultado del “sentido común” —es decir el funcionamiento del sistema cognitivo humano como producto biológico y cultural— aplicado a la predicción y control de los fenómenos científicos, cambiar esas concepciones alternativas requiere algo más que sustituir las ideas de los alumnos por otras científicamente más aceptables. Requiere de hecho modificar sustancialmente los principios en los que está basado, de modo implícito, ese procesamiento y ese conocimiento. Requiere en suma *reformatear* la mente de los alumnos o al menos incorporarle un nuevo sistema operativo que sea compatible con los principios en que se basa el conocimiento científico.

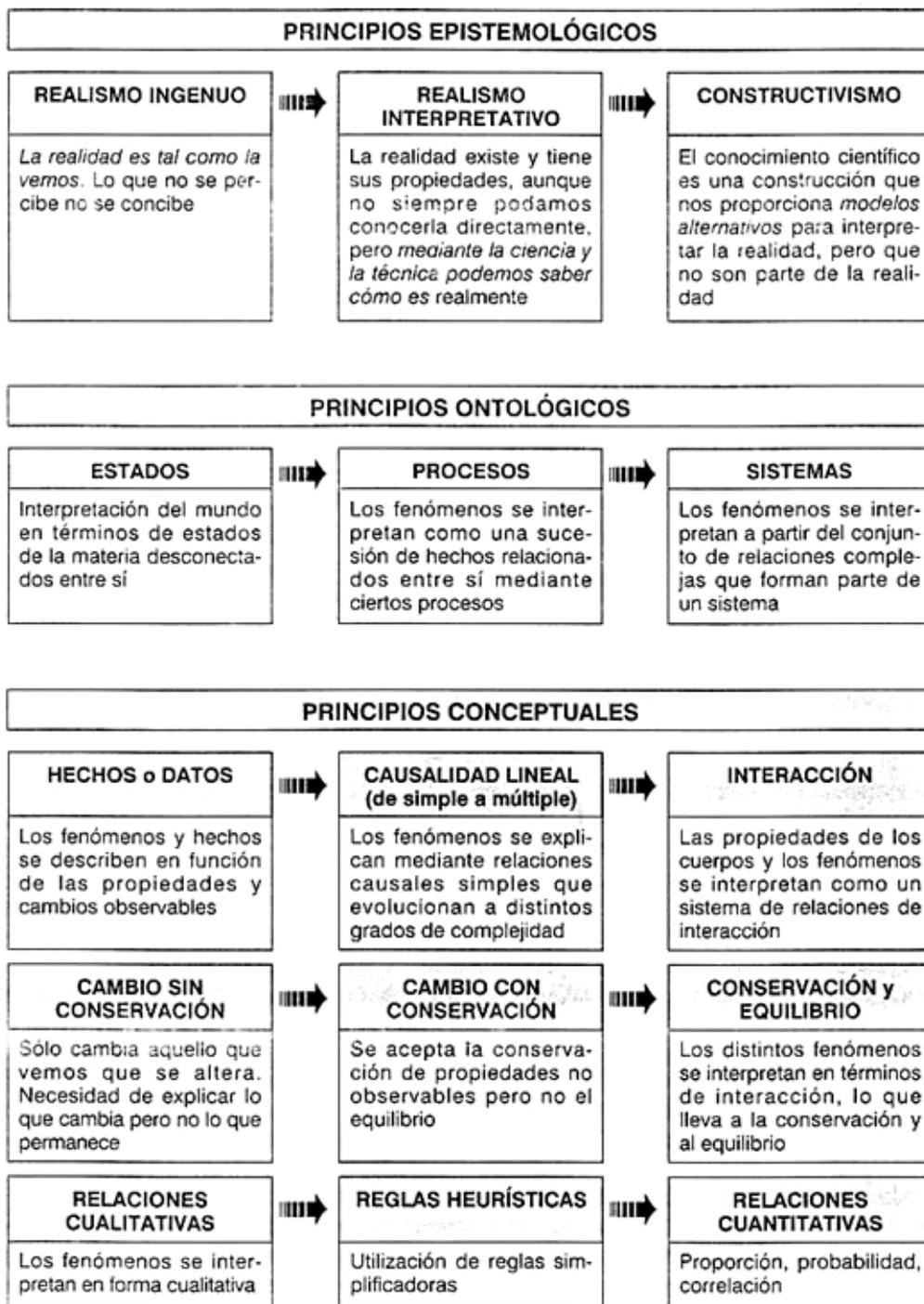
En el apartado precedente hemos visto cómo los supuestos epistemológicos, ontológicos y conceptuales de las teorías científicas y cotidianas difieren entre sí. Sintetizando esas diferencias ya presentadas, la Tabla 4.7 muestra cada una de esas diferencias como una *dimensión de cambio* en el aprendizaje de la ciencia. En vez de ante una comparación dicotómica entre formas cotidianas y científicas de conocer el mundo, nos hallaríamos ante un continuo a lo largo del cual habría que ir profundizando con el fin de acercarse al sentido del conocimiento científico. Se trataría de ejes que definen una secuencia de construcción de los principios subyacentes al conocimiento científico. O dicho de otro modo, cada uno de estos principios implicaría restricciones o tendencias del procesamiento cognitivo *natural*, en el sentido de espontáneo, que es preciso superar en dominios y situaciones concretas si queremos lograr interpretarlas desde un punto de vista cercano al científico.

Se trataría de tendencias que no sólo aquejarían al pensamiento de los alumnos, sino al de todos nosotros en numerosas situaciones en las que tendemos a usar el conocimiento cotidiano. Como veremos en el próximo capítulo, ese conocimiento cotidiano, y los supuestos en que se basa, se puede reestructurar o reinterpretar a partir de otras formas de conocimiento más complejas, pero raramente se abandona o se elimina de la mente del alumno, ya que resulta de una gran eficacia cognitiva y adaptativa. Por tanto, aunque esos diversos principios se reconstruyen de modo relacionado y solidario, ya que se exigen mutuamente, cambiar esos principios en un dominio dado no necesariamente implica abandonar las formas

más simples, intuitivas, de conocimiento en ese dominio, y menos aún que el cambio se generalice o transfiera automáticamente a otros principios o a otros dominios de conocimiento.

Por tanto, como se verá con detalle en el próximo capítulo, construir los principios epistemológicos, ontológicos y conceptuales del conocimiento científico, tal como se proponen a modo de síntesis en la Tabla 4.7, no implica de ningún modo abandonar los principios del “sentido común” sino trascenderlos o superarlos en dominios concretos de conocimiento, sin que necesariamente esa superación se traslade o transfiera a otros dominios, aunque sin duda pueda favorecer su actualización en otras áreas próximas. Resumiremos a continuación los principales rasgos de esas tendencias de cambio propuestas en la Tabla 4.7 a partir de lo explicado en páginas precedentes, ya que constituirán el eje de los análisis de las dificultades de aprendizaje en la Química y la Física presentados en la Segunda Parte del libro.

Tabla 4.7. Tres dimensiones de cambio en el aprendizaje de la ciencia



CAMBIO EPISTEMOLÓGICO

Desde el punto de vista epistemológico, en nuestro conocimiento cotidiano solemos asumir una posición *realista*, según la cual, el mundo es tal como lo percibimos o se muestra ante nosotros. Así, como mostraba el ejemplo de Vosniadou (1994 a) que presentamos unas páginas más atrás, tendemos a concebir la acción de una fuerza sólo cuando tiene un efecto perceptible sobre los objetos (causar un movimiento), pero nos resulta poco verosímil que las fuerzas actúen del mismo modo sobre los objetos en reposo (véase el Capítulo VII para un análisis más detallado de este ejemplo). Igualmente, en aplicación de este principio, los alumnos tienden a atribuir a las partículas que componen la materia las mismas propiedades que ésta tiene a nivel macroscópico, por lo que nos hablan de las “partículas mojadas del agua” o creen que cuando se hincha un globo por acción del calor se hincha también cada una de las moléculas de aire que hay en su interior (la comprensión de la química se analiza con detalle en el Capítulo VI). Este supuesto realista, según el cual *las cosas se conciben tal como se perciben*, estaría en la base del uso de ciertas reglas heurísticas que hemos mencionado anteriormente al estudiar el origen sensorial de las concepciones alternativas (como por ejemplo la regla de semejanza), y de hecho podría tratarse de un principio muy general y básico que regiría nuestro procesamiento y conocimiento en numerosos dominios, no sólo vinculados al conocimiento de la naturaleza, sino también al conocimiento social, psicológico, etc. De hecho, esta tendencia realista resulta, al menos en nuestra cultura, bastante dominante y difícil de superar incluso en el ámbito científico, en el que durante mucho tiempo ha dominado una concepción positivista entre los propios científicos, y también entre los profesores de ciencias, según la cual la función de la ciencia era *descubrir* la estructura y el funcionamiento de la naturaleza, *en vez de construir* modelos para interpretarla.

Esta tendencia realista parece estar muy arraigada en el sistema cognitivo humano. De hecho, las primeras concepciones sobre el conocimiento y su adquisición que surgen en la infancia, a una edad tan temprana como los 3-4 años, parecen tener ya un fuerte componente realista, según el cual nuestro conocimiento es una copia o un reflejo directo de cómo son las cosas, y aprender no es sino reproducir o repetir lo que vemos (Pozo y Scheuer, 1998). En sus versiones más primitivas e ingenuas, esta concepción realista da lugar a teorías de la copia directa, según las cuales basta con ver algo para saber hacerlo. Así un niño de 4 años nos dirá que para aprender a dibujar basta con ver un dibujo bien hecho. Pero esta concepción realista parece evolucionar y complicarse con la edad y la instrucción hacia lo que podríamos llamar un “realismo interpretativo”, según el cual, aunque la meta del aprendizaje sigue siendo copiar la estructura del mundo, y nuestro conocimiento no es sino el reflejo de la realidad, sería casi siempre un reflejo inexacto o sesgado de la estructura del mundo y no una copia fiel del mismo, ya que diversos procesos de aprendizaje y condiciones prácticas podrían interferir en ese aprendizaje o descubrimiento de la estructura real del mundo. O dicho de otra forma, el *verdadero* conocimiento, por ejemplo en este caso el conocimiento científico, debería ser una copia exacta —cuanto más exacta la copia, mejor el conocimiento— pero esa fidelidad casi nunca se consigue, ya que existen numerosos obstáculos en su logro (cognitivos, perceptivos, sociales, etc.). El mundo es de una forma determinada, tiene una estructura y características dadas, y conocer es descubrirlas o acceder a ellas, aunque no siempre se puede conseguir. Según esta concepción, un conocimiento es mejor cuanto más exacto es, es decir, cuanto más se aproxima a la verdadera naturaleza del mundo. Y obviamente, el conocimiento científico es más exacto y verdadero que otras formas de conocer el mundo, como el conocimiento cotidiano.

Así parecen concebir numerosos profesores la adquisición del conocimiento científico por parte de sus alumnos, que se vería obstaculizada por sus concepciones alternativas, su falta de motivación, su poco desarrollo cognitivo, etc., que les impediría aprender verdaderamente la ciencia (Pozo y cols., 1998; Strauss y Shilony, 1994). Las ideas previas de los alumnos serían *concepciones erróneas*, desviadas del saber verdadero, que por lo tanto deben ser eliminadas para una comprensión correcta del mundo. Del mismo modo, muchos alumnos que superan un realismo inmediato perciben la ciencia como una interpretación de la realidad que obliga a trascender ciertas apariencias perceptivas, pero respetando la naturaleza *real* de los modelos científicos. Ciertos rasgos reales del mundo no pueden percibirse directamente en condiciones normales (como los átomos, las células o la corriente eléctrica), pero pueden interpretarse a partir de ciertas experiencias. Para esos alumnos, el átomo, la energía o la fuerza serían una parte no perceptible de la realidad, existirían realmente, aunque sólo pudieran conocerse a través del tamiz de ciertas experiencias científicas. Como veremos en el Capítulo VII, el *sustancialismo* o materialismo de los alumnos, al atribuir entidad material a buena parte de los conceptos científicos (Viennot, 1996), no es sino una manifestación más de su fe realista: si algo existe en mi mente, debe existir, como una entidad material, también en el mundo.

En cambio, desde una posición *constructivista*, como la que hemos defendido en el Capítulo Primero, en el aprendizaje del conocimiento científico, tal como se genera y difunde en la sociedad actual, se asume que todos los modelos y teorías son una construcción o invención social en respuesta a ciertas demandas o necesidades prácticas y teóricas, y que la ciencia, como señalábamos en el capítulo anterior al destacar los rasgos del pensamiento formal piagetiano, no es un discurso sobre lo real sino sobre modelos posibles. Conocer no es descubrir la realidad, es elaborar *modelos alternativos* para interpretarla. Sólo así puede entenderse el verdadero valor de la ciencia y su contribución a la comprensión del mundo que les rodea. Para muchos alumnos, la idea newtoniana del movimiento debido a la inercia en el vacío es menos realista que sus propias intuiciones, ya que en su mundo real no existe el vacío, sino que al contrario está bien lleno de percepciones y sensaciones intensas sobre cómo mover los objetos y ser movido por ellos. En nuestro mundo *real* —o sea, en el que nos proporcionan nuestros sentidos con una apariencia de realidad— para mover un objeto es necesario ejercer una fuerza. En el *modelo construido* por Newton, las fuerzas son necesarias para cambiar la cantidad de movimiento pero no para que los objetos en movimiento sigan moviéndose.

Sólo superando esas creencias realistas tan intensas es posible asumir una idea así, que conlleva adoptar una posición *relativista* o *perspectivista*, según la cual existen diversas formas de conocer una misma realidad y ninguna de ellas es necesariamente verdadera, sino que cada una es relativa al marco teórico y las necesidades prácticas a las que se enfrenta. Como ha mostrado Eduardo Mortimer (1995), frente a la concepción de muchos profesores que presentan una teoría o modelo atómico dado como verdadero, apoyado en ciertas definiciones tajantes como, por ejemplo, “*átomo es la menor cantidad de un elemento químico que tiene existencia propia*”, existen diversos modelos de átomo con una vigencia relativa en diferentes dominios y tareas. No se trata de asumir uno como verdadero y los demás como falsos, sino de comprender su eficacia relativa en diferentes contextos. Del mismo modo, afirmar que la mecánica clásica ha sido superada por la mecánica cuántica o por la relativista, no implica que sea falsa y deba ser abandonada, sino que en determinadas condiciones —no las más cotidianas a juicio de nuestros sentidos, desde luego— sus principios no se cumplen. Lo mismo sucede, en otra escala, con el conocimiento cotidiano cuando se compara con el científico. No es que sea falso, de hecho permite hacer numerosas predicciones que acaban por cumplirse, sino que es insuficiente para ciertas condiciones o contextos. Así que ninguna teoría es completa o total, ningún modelo puede ser igual a la realidad que intenta representar, del mismo modo que, retomando la precisa metáfora de Borges en aquel texto suyo significativamente titulado *Del rigor en la ciencia*, nunca un mapa puede ser físicamente igual al territorio que representa, ya que entonces sería el territorio y no sería ya útil como mapa, sino que es un modelo, un esquema incompleto y parcial de ese territorio. Además, aunque sin duda algunos mapas se parecen más que otros a los territorios que representan, no hay mapas verdaderos ni falsos en sí mismos, sino que todo depende del contexto y las metas para las que los usamos. Un mapa del metro de Nueva York será inadecuado si lo que quiero es pasear por las calles de Greenwich Village, pero un callejero será poco útil si lo que quiero es viajar en metro. O en otras palabras, por más rigor que haya, en la ciencia no se alcanza nunca el conocimiento verdadero en el sentido de que reproduzca exactamente del mundo real, sino que tenemos modelos crecientemente más complejos y potentes para predecir, explicar y simular la estructura del mundo.

Cambio ontológico

Pero este cambio epistemológico, en la propia naturaleza del conocimiento, requiere también utilizar nuevas entidades *ontológicas* de una complejidad creciente. El realismo ingenuo de los niños suele reducir los fenómenos a *estados*, las cosas son de una cierta forma porque son así. Buena parte de las explicaciones, o re-descripciones de los niños son tautológicas, se limitan a afirmar o describir el estado del mundo sin remitirlo a otras entidades conceptuales. El mundo se divide en objetos en reposo y en movimiento, sólidos, líquidos y gases, ligeros y pesados, calientes y fríos, vivos y no vivos, blandos y duros, etc., sin que cada una de esas entidades o categorías deba ser re-descrita o explicada en términos de otra categoría, ya que constituyen estados materiales, del mismo modo que para algunos profesores los alumnos se dividen en listos, vagos, desmotivados, etc., que constituyen diversos estados mentales. A partir de una cierta edad los niños tienden a superar las interpretaciones animistas, es decir la confusión entre estados mentales y materiales, por lo que en el aprendizaje de la ciencia tenderán a utilizar sobre todo interpretaciones basadas en estados materiales, nuevamente vinculadas a la mencionada sustancialización de los conceptos científicos, si bien aún persisten ciertas interpretaciones animistas en el ámbito del conocimiento biológico.

Esta interpretación del mundo en términos de estados de la materia sucesivos o desconectados entre sí es propia del conocimiento cotidiano y resulta en muchos contextos muy predictiva a partir de los rasgos concretos asociados a cada estado, pero se muestra insuficiente para explicar o dar sentido a esos estados, para lo que cual se necesita relacionarlos con ciertos procesos, que conecten esos estados entre sí y permitan explicar la transición de uno a otro (cómo un objeto *en reposo* se pone *en movimiento*, cómo un líquido se convierte en un gas, cómo se enfría un objeto caliente, etc.). El fenómeno observado ya no es sólo un estado, es un *proceso*, es decir, según la clasificación ontológica establecida por Chi (1992, Chi, Slotta y De Leeuw, 1994; véase Figura 4.4), una sucesión o encadenamiento de hechos en el que uno, el antecedente, es causa directa del otro, el consecuente. Como veremos más adelante, estos procesos suelen tener ciertos rasgos estructurales restrictivos (son unidireccionales, lineales, etc.) pero aun así, pasar de concebir los fenómenos como estados a concebirlos como procesos supone un cambio ontológico importante para el aprendizaje de la ciencia, ya que implica establecer relaciones entre los conceptos. Por ejemplo, el calor pasa de ser un estado, a ser un proceso, una relación entre dos o más estados, o los cambios entre los diversos estados de agregación de la materia se interpretan en términos de relaciones de temperatura y densidad, por lo que el cambio ya no se da entre cualidades aisladas atribuidas a ciertos estados de la materia, sino que implica un proceso que relaciona esos estados.

La atribución de un fenómeno a la categoría proceso puede sin embargo ir creciendo en complejidad a medida que se incorporan o suman nuevos factores causales a la explicación del hecho, que suele ser un paso previo a la comprensión de las relaciones en términos de *sistemas*, tal como hace la ciencia, donde lo relevante no son sólo los procesos inmediatos que han producido ese cambio en el estado de la materia (por ej., que un objeto se ponga en movimiento) sino el conjunto de relaciones impuestas por un determinado modelo para la explicación de ese fenómeno (por ej., el modelo newtoniano como marco interpretativo del movimiento y reposo de los objetos). De hecho, como veremos a continuación, el conocimiento científico no suele basarse tanto en relaciones lineales simples, en análisis de procesos, como en interacciones complejas dentro de sistemas de equilibrio. Así, el movimiento de un objeto o de un planeta no se explica como un proceso generado por un agente causal sino como el producto de la interacción entre todos los cuerpos que configuran el sistema al que pertenece. Igualmente, los cambios en el estado de agregación de la materia no son el resultado de un proceso lineal, unidireccional, en el que por ejemplo “el calor produce la evaporación del agua” (un proceso) sino que se explican a partir de las interacciones entre las partículas que configuran el sistema. Observamos así una característica esencial del cambio conceptual como integración de diferentes formas de conocimiento, tal como se argumentará en el próximo capítulo: al igual que los diferentes estados pasaban a relacionarse por medio de procesos, los diferentes procesos se relacionan entre sí dentro de un sistema. Cada nivel de análisis ontológico no abandonaría los conocimientos del nivel anterior, sino que los integraría, o en términos de Karmiloff-Smith (1992) los redescibiría, en nuevas categorías ontológicas, de una mayor complejidad. Por tanto, esta reatribución ontológica, debe concebirse de nuevo como una vía o secuencia de construcción de complejidad progresiva que, como veremos en el próximo capítulo, no tiene por qué suponer el abandono de las entidades ontológicas más simples, sino más bien su reinterpretación o integración en otras más complejas. A determinados niveles de análisis un fenómeno puede representarse como un proceso lineal, o incluso como un estado o un hecho dado, pero obviamente ello empobrece su significado.

Cambio en las estructuras conceptuales

La interpretación de los fenómenos en términos de sistemas, que acabamos de considerar como un rasgo propio del conocimiento científico, requiere también cambiar las *estructuras conceptuales* desde las que se interpretan, en la triple dimensión que hemos señalado con cierto detalle unas páginas más atrás, por lo que nos limitaremos aquí a resumir aquellas ideas. Por un lado, como acabamos de ver, hay una transición desde aceptar los distintos fenómenos como *hechos*, algo dado que ni siquiera requiere ser remitido a otro hecho o que, como máximo, da lugar a una explicación tautológica (“un caramelo se deshace en agua porque es blando” o “porque está hecho de sustancias solubles”) hasta comenzar a relacionarlos con ciertos procesos de *causalidad lineal*, basados en esquemas simples, unidireccionales, en los que un agente actúa de modo lineal y unidireccional sobre un objeto, produciendo un cambio en su estado (Andersson, 1986) (“el caramelo se disuelve por la acción del agua”, “porque el agua disuelve las moléculas del caramelo”). Estas interpretaciones causales lineales adoptan la forma de ciertos esquemas o reglas simplificadoras, que han sido abundantemente estudiadas no sólo en relación con el pensamiento causal cotidiano (Pozo, 1987) sino

con las propias reglas del aprendizaje asociativo, y vendrían a ser los esquemas de causalidad presentados anteriormente al estudiar el origen de las concepciones alternativas de los alumnos: reglas de semejanza, covariación y contigüidad entre causa y efecto.

Estos análisis causales lineales irían cobrando complejidad a medida que se incorporan o se suman más factores causales, pasando de una causalidad simple, de un solo factor o agente, a una causalidad múltiple, en la que la acción de varias causas se suma, pero manteniendo el esquema conceptual básico, basado en la unidireccionalidad de la acción causal. Sería necesario un cambio en las estructuras conceptuales para que esas relaciones aditivas unidireccionales, centradas en el cambio, se transformen en sistemas de interacciones (por ejemplo, remitiendo la disolución del caramelo a la interacción entre éste y el disolvente). Frente a la interpretación de la oxidación como una relación causal lineal (es un polvillo rojo que flota en el aire que se deposita sobre un clavo que hemos dejado a la intemperie) aparece una interpretación en términos de una *interacción*, es decir de una acción mutua entre dos o más factores dentro de un sistema. La comprensión de la naturaleza corpuscular de la materia, de los conceptos de movimiento intrínseco y vacío, o la transición entre los diferentes estados de la materia en términos de ese modelo requiere entender esas relaciones como interacciones (Gómez Crespo, 1996; Pozo y Gómez Crespo, 1997b; ver también Capítulo VI). Entender las nociones científicas básicas de calor, energía, fuerza y movimiento o corriente eléctrica implica también interpretarlas como relaciones de interacción dentro de un sistema físico (Gómez Crespo y cols., 1995; Viennot, 1996, véase también Capítulo VII). Igualmente, entender el funcionamiento del cuerpo humano, la salud o la enfermedad, o las relaciones dentro de un ecosistema como un sistema de interacciones es un requisito esencial para la comprensión de algunos conceptos biológicos fundamentales (ARCA, 1995). El concepto de interacción es, en nuestra opinión, uno de los esquemas conceptuales sobre los que se asienta el conocimiento científico y uno de los que más dificultades plantea a los alumnos en el aprendizaje de la ciencia, como veremos en la Segunda Parte del libro.

Otro de los esquemas conceptuales básicos de la ciencia, estrechamente vinculado a la idea de interacción, es la noción de equilibrio, cuya construcción resulta también muy laboriosa, ya que los alumnos parten de una centración en los cambios más que en los estados (Driver, Guesne y Tiberghien, 1985; Pozo y cols., 1991) por la que inicialmente atienden más a lo que cambia que a lo que permanece más allá del cambio, o si se prefiere, conectándolo con ideas desarrolladas anteriormente, tienden a concebir los estados y los cambios por separado, sin conectarlos entre sí, de forma que cuando se produce un cambio observable tienden a concebirlo como un “cambio de estado”, que implica una reascripción ontológica (lo que tenía las propiedades de un líquido pasa a tener las propiedades de un gas), pero no una constancia o permanencia de propiedades. Las célebres conservaciones piagetianas (del peso, del volumen, de la cantidad de materia, pero también del espacio o del tiempo) (véase por ejemplo, Delval, 1994; Flavell, 1985, o para un análisis de las mismas en términos de procesos de cambio conceptual, Benlloch, 1997) implican aplicar un nuevo esquema conceptual de *cambio con conservación*, por el que ciertas propiedades se conservan más allá del cambio aparente. Las conservaciones de propiedades observables o inferibles a través de la observación resultarán más simples y tempranas que las conservaciones no observables. En todo caso, con frecuencia los alumnos interpretan la conservación y el cambio de esas diversas propiedades de forma independiente, sin conectarlas dentro de un sistema. Así, por ejemplo, cuando se hincha un globo, aumenta de volumen por acción del calor, los niños pueden comprender que se conserva la cantidad de aire que hay dentro del globo pero sin que logren relacionar esa conservación con los cambios que tienen lugar en la densidad, el volumen o la temperatura del aire (Benlloch, 1997; Benlloch y Pozo, 1996). Sólo cuando comprenden todas esas relaciones de cambio y conservación dentro de un sistema pueden representarse la situación en términos de *equilibrio*. La conservación de la energía, de la cantidad de movimiento, de la materia, o la propia conservación dentro un sistema biológico requieren utilizar nociones basadas en la *conservación y el equilibrio dentro de un sistema*, otro de los esquemas conceptuales característicos del conocimiento científico, sin el cual los conceptos específicos (calor, energía, sustancia, fotosíntesis, etc.) no pueden ser interpretados en la forma en que la ciencia lo hace.

Pero usualmente el conocimiento científico requiere no sólo establecer nuevas relaciones cualitativas entre los conceptos, sino también medir y cuantificar esas relaciones de acuerdo con reglas complejas, frente a las cuales en el conocimiento cotidiano tendemos a utilizar o bien simples *relaciones cualitativas o reglas heurísticas* alternativas (Pérez Echeverría, 1990), que aunque aproximativas e imprecisas, suelen ser muy funcionales desde el punto de vista cognitivo, ya que su aplicación consume pocos recursos cognitivos y suelen tener un grado apreciable de ajuste, por lo que una vez más no cabría pensar que la educación científica conlleve el abandono de estas reglas sino más bien establecer ciertas restricciones en su uso. El uso de esquemas de *proporción, probabilidad y correlación*, propio de las teorías

científicas, requiere unas condiciones de rigor y control en su aplicación que escasamente se encuentran en contextos y problemas cotidianos, caracterizados muchas veces por su imprecisión e indefinición (Claxton, 1991; Pozo y Gómez Crespo, 1997b). Aunque la meteorología utilice complejos cálculos probabilísticos para, a partir de un escenario dado, estimar las probabilidades de lluvia, nuestra estimación se basa en apreciaciones cualitativas o en reglas heurísticas que utilizan datos parciales y usualmente sesgados. Una vez más el aprendizaje de la ciencia requerirá reinterpretar o redefinir esas situaciones y los esquemas de conocimiento cotidiano útiles en ellas en términos de otros esquemas más complejos pero también más exigentes, por lo que su uso sólo se justifica en ciertos contextos y para ciertas metas.

Por tanto, si aceptamos que existen diferencias epistemológicas, ontológicas y conceptuales entre las teorías implícitas mantenidas por los alumnos y las teorías científicas que se les pretende enseñar —algunas de esas diferencias se recogen en los análisis que nosotros hemos realizado— y que aprender ciencia requiere de algún modo superar o trascender esas diferencias, todo currículo de ciencias debe adoptar una posición explícita sobre su existencia y la forma de superarlas. En nuestra opinión, a partir del análisis que hemos descrito, una de las metas esenciales de la educación científica debe ser precisamente favorecer las relaciones entre las formas de conocimiento cotidiano y científico. Como vamos a ver en el próximo capítulo, hay también diferentes formas de concebir esas relaciones que implican a su vez distintos modos de plantear el currículo de ciencias. Aunque por nuestra parte ya hemos ido avanzando una forma de entenderlas, basada en la integración entre ambas formas de conocimiento más que en la sustitución de una por otra; para comprender mejor su naturaleza conviene repasar las diversas formas de entender las relaciones entre conocimiento cotidiano que se plantean no sólo de modo explícito en la investigación sino sobre todo de modo implícito en las aulas a través de la práctica cotidiana en el aprendizaje y la enseñanza de las ciencias.