

Hacia una cultura química



Aquí se discutirá sobre la cultura, la ortodoxia de la ciencia y la herejía de la química. Ésta, como otras ciencias, trata sobre la materia. Sus tres “ejes”, que han constituido el quehacer químico, son el método, una forma de medir y el lenguaje.

José Antonio Chamizo

La química crea su objeto

M. Berthelot (1827-1907)

cultas según las normas de la cultura tradicional, y que con sumo placer expresaban su incredulidad ante la ignorancia de los hombres de ciencia. Una o dos veces me he incomodado y he preguntado a los presentes cuántos de ellos podrían decirme cuál era la segunda ley de la termodinámica. La respuesta fue fría, y también negativa.

Sin embargo, yo estaba preguntando algo que es el equivalente científico de “¿ha leído usted alguna obra de Shakespeare?”

C. P. Snow, 1956

INTRODUCCIÓN

El término “herejía” sugiere una afirmación contraria a principios comúnmente aceptados. Herejía significa elección, opción. Cuando hay una fuerte adhesión por parte de las sociedades humanas a ciertos saberes generales, y por tanto culturales, se habla de “ortodoxia”. No hay herejía si no hay ortodoxia; es en su enfrentamiento donde se reconocen y caracterizan.

En este artículo se discutirá brevemente sobre la cultura, la ortodoxia de la ciencia y la herejía de la química.

ACERCA DE LA CULTURA

...y sin embargo su propia ignorancia y su propia especialización son igualmente pasmosas. Muchas veces he estado en reuniones de gentes consideradas muy

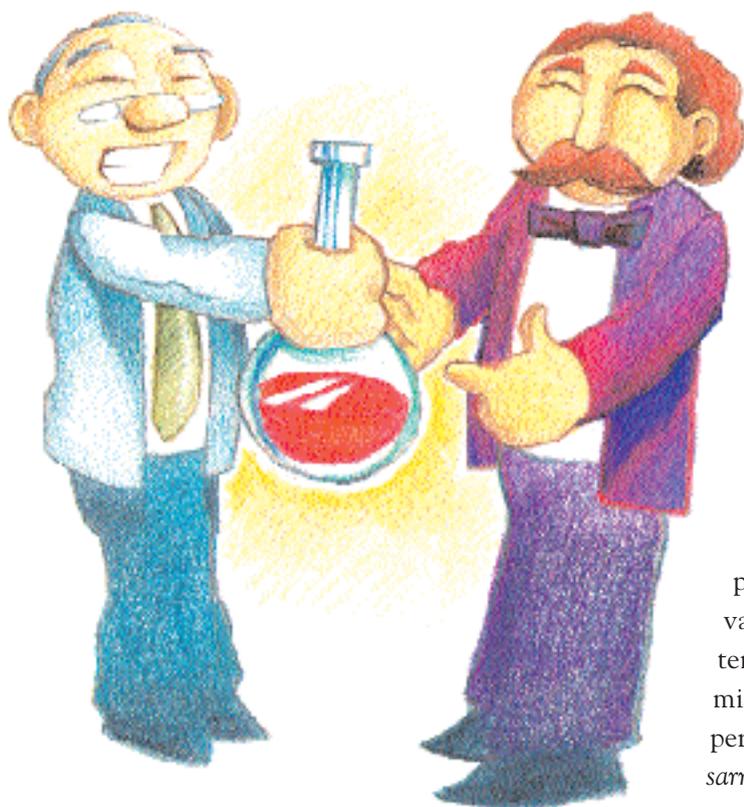
Desde la antropología, la cultura es la forma en que viven los individuos al interior de las diferentes sociedades humanas. Esta interpretación es diferente a la que presenta Snow, que le da a cultura su acepción “humanista-occidental”, y es la que la mayoría de nosotros entiende. Una vez hecha esta aclaración, podemos decir que las culturas están vivas en la medida que los individuos que la comparten interactúan entre sí y con otras culturas, algu-

Para adquirir una cultura científica no es suficiente almacenar datos de resultados de investigaciones científicas pasadas o recientes

nas de ellas heréticas, comunicándose, prestándose o inventándose significados, para que los mismos individuos adquieran, a través de ella, sentido y pertenencia. Aquí cohabitan tanto la tradición como la ortodoxia, pero también la ruptura, identificada sociológicamente como el frente cultural donde se tiene la posibilidad de entender y construir diversos modos de convergencia simbólica e integración. La herejía propone frentes culturales; es un asunto de fronteras. Aquí la ciencia se presenta de manera paradójica. Fue y es, todavía, frente a la mayoría de los saberes de una determinada sociedad, una herejía; también es una ortodoxia, en la medida de la concepción que esa sociedad tiene de la ciencia. Sólo hasta hace muy poco se discute ampliamente el impacto de la ideología en la configuración social de la ciencia (Norman, 1998):

Dado el enorme prestigio que tiene la ciencia en nuestra cultura, es esencial que los ciudadanos de una sociedad democrática no sólo sean conscientes del papel de la ideología en la configuración de la ciencia, sino que aprendan también a evaluar críticamente las implicaciones ideológicas de las aspiraciones y las realizaciones de los científicos como individuos. Este nivel de alfabetización científica es crucial tanto para los consumidores como para los productores del saber científico.

La ciencia es poderosa, además de su capacidad para transformar al mundo (lo cual le ha dado ese enorme prestigio), por su capacidad de abstracción. Su manera de abordar los problemas dividiéndolos en partes más pequeñas, para luego integrar sus resultados en un todo mayor, requiere de un esfuerzo cognitivo importante. Por ello, para adquirir una cultura científica no es suficiente almacenar datos de resultados de investigaciones científicas pasadas o recientes; hay que articularlos alrededor de una forma de ver el mundo, una forma que privilegie la curiosidad (concretada a través del hecho de preguntar), la tolerancia (al reconocer que hay más de una respuesta para la misma pregunta), el consenso (particularmente en la validación de las respuestas por los expertos en el tema) y el escepticismo informado (o lo que es lo mismo, la duda razonada). Siguiendo la línea de pensamiento establecida en el *Informe sobre el desarrollo humano* de las Naciones Unidas, una cultura científica aumenta la libertad efectiva de quie-



nes se benefician de ella para llevar adelante cualquier actividad a la que le atribuyen valor.

ACERCA DE LAS CIENCIAS

Todos estamos de acuerdo que la química se refiere a los procesos de transformación de la materia y que el estudio de la materia en sí, en la medida que no cambie, pertenece a la física. Cuando estudiamos a una molécula por sí misma la estudiamos físicamente. La química considera el cambio que le sucede cuando reacciona y se convierte en otra molécula y debe describir el proceso por el cual ese cambio se lleva a cabo. Hay muchas evidencias de que el tiempo es necesario para la acción química, pero de hecho, hasta ahora, no se ha incorporado en la explicación de los fenómenos.

A. Williamson, 1851

La ciencia no empieza en los hechos, sino en las preguntas. Los hechos no son independientes de los observadores y de sus maneras de ver el mundo. Por ello, en un momento y en una cultura determinados, es posible que todos los observadores coincidan respecto a un cierto hecho. Hoy, cuando se cuentan más científicos vivos que todos los que ha habido a lo largo de la historia, las ideas derivadas de su trabajo de investigación cambian y cambiarán nuestra concepción de prácticamente todo lo que conocemos. Esto es un hecho inevitable en el inicio del tercer milenio: la ciencia modifica la manera en que vemos al mundo y a nosotros mismos.

La sociedad en que viven día a día los científicos determina o limita el tipo de preguntas que se hacen o que pueden responder ellos mismos, además de influir en sus conclusiones. Esto se logra a través de la presencia o ausencia de programas educativos o de investigación científica, de reconocimientos o castigos a la misma actividad y de tolerancia o imposición de áreas de investigación... En pocas palabras, muchas veces las preguntas que los científicos se hacen corresponden a las que tradicionalmente las sociedades aceptan.

Una de las tradiciones más profundamente implantadas, la que podría reconocerse como la ortodoxia (no sólo entre la comunidad científica, sino al interior de las sociedades) es que la ciencia puede explicarse a través de la lógica positivista.

La lógica positivista (o también empiricista) asume que las teorías pueden partir de axiomas. Este argumento descansa en que la explicación de un evento puede derivarse de una ley, y ésta a su vez de una teoría. Así una teoría es una serie de afirmaciones de las cuales pueden ser derivadas las leyes. La lógica positivista asume que con la axiomatización de las teorías unifica todas las ciencias en una sola. Este proceso de unificación

de la ciencia en el que se derivan principios de una ciencia a otra, comúnmente se conoce como *reduccionismo*. La lógica positivista asume que las leyes de una determinada ciencia, como la química, pueden en principio derivarse de otras leyes más básicas, en este caso de la física. Resumiendo, la ciencia es vista como la acumulación de conocimiento incorporado en un determinado marco teórico y las teorías pueden ser entendidas como sistemas axiomáticos para los cuales pueden aplicarse los métodos del análisis lógico.

Esta visión acumulativa y reducida de la ciencia fue severamente cuestionada desde los años sesenta, particularmente por Thomas Kuhn, cuya interpretación del avance de la ciencia a partir de procesos revolucionarios en los que una comunidad científica abandona un paradigma para asumir otro resultó impactante. Desde entonces se ha dado una intensa discusión, aún no resuelta, sobre la naturaleza

Muchas veces
las preguntas
que los científicos se hacen
corresponden a las que
tradicionalmente
las sociedades aceptan

de la ciencia y de la misma actividad científica, una de cuyas consecuencias ha sido que los filósofos de la ciencia no han podido demostrar que las leyes pueden ser axiomatizadas ni que pueden derivarse de una disciplina a otra. De hecho hay propuestas de explicación de la ciencia sin leyes (Giere, 1999).

En esta dirección, el intento de reducir la química a la física, particularmente a la mecánica cuántica, ha sido imposible. La química no puede deducirse de la mecánica cuántica, entre otros muchos factores por la ausencia de resolución del problema de varios cuerpos, y la química es finalmente el resultado de la interacción sincronizada de muchos cuerpos. La química considera macrosistemas que en

última instancia están compuestos de microcomponentes que pueden ser descritos (cuando están aislados) por la mecánica cuántica; sin embargo, el conocimiento “completo” de estos microcomponentes no permite conocer las propiedades del macrosistema (Cuadro 1). El conocimiento “completo” de un átomo de hidrógeno y otro de oxígeno no nos dice nada de las propiedades del agua líquida. En este sentido, el filósofo de la ciencia E. Scerri se pregunta, ¿la ley periódica es una ley de la misma importancia que las leyes de Newton? Argumenta que el arreglo de los elementos en la tabla periódica dio lugar a varias de las predicciones más importantes en la historia de la ciencia. Mendeleiev anticipó las propiedades de los entonces desconocidos elementos galio, germanio y escandio. Este tipo de predicciones no podrían hacerse hoy empleando únicamente la mecánica cuántica.

Desde otro punto de vista, Roald Hoffman, premio Nobel de química por sus aportaciones al entendimiento de las reacciones químicas empleando la mecánica cuántica, indica:

Por otra parte, la adhesión a la filosofía reduccionista es un peligro potencial. Una forma de comprensión vertical, si se rigiere como la única, crea una brecha entre nosotros y nuestros amigos en las artes y las humanidades. Ellos saben muy bien que no existe una forma única de “comprender” o de enfrentar la muerte de un padre, o el problema de drogas en nuestro país, o un grabado de Ernst Ludwig Kirchner. El mundo exterior no permite que se le subordine a la reducción, y si insistimos en que debe ser reducible, lo que hacemos es encajonarnos. El cajón es la clase limitada de problemas susceptibles de una comprensión reduccionista. Es un cajón pequeño.

La química,
como las otras ciencias
naturales y muchas otras
actividades no científicas,
estudia los objetos empíricos,
especialmente los aspectos
materiales de dichos objetos

ACERCA DE LA QUÍMICA

Demasiado a menudo, cuando se reflexiona sobre la relación de la síntesis y del análisis, uno se limita a no ver allí sino una mera dialéctica de reunión y de separación.

Es olvidar un matiz importante. En efecto, el proceso mismo de la invención, el proceso de la creatividad racional por el cual el plan racional de una sustancia no hallada todavía es planteado, como problema para su realización.

G. Bachelard, 1976

La química, como las otras ciencias naturales y muchas otras actividades no científicas, estudia los objetos empíricos, especialmente los aspectos materiales de dichos objetos. De acuerdo con el filósofo de la ciencia J. Schummer, una propiedad material es un comportamiento reproducible en determinadas condiciones, es decir, en un contexto particular.

Así, el contexto es el aspecto central a través del cual se pueden caracterizar las propiedades materiales. A la materia se

CUADRO 1.

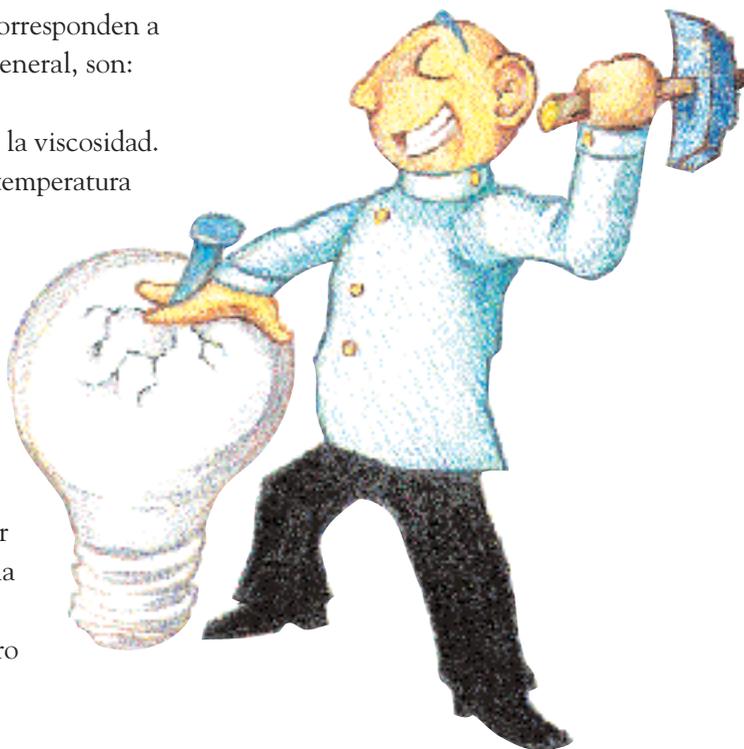
Requerimientos teóricos mínimos necesarios para predecir la velocidad o la constante de equilibrio de una reacción química (Jensen, 1980).

1. Cálculo de la energía potencial electrónica del arreglo estático de los átomos correspondientes a los reactivos y a los productos, empleando métodos de la mecánica cuántica "ab initio".
2. Calcular los movimientos vibracionales y rotacionales del sistema.
3. Para muchos de estos movimientos la energía cinética no es cero. Conocer su valor es necesario para corregir el valor total de energía, de manera que éste sea el menor posible.
4. Con el conocimiento de los modos normales de movimiento se calcula la función de partición Z de cada especie en función de la temperatura y de allí se puede obtener la energía libre y la entalpía estándar de cada especie en forma gaseosa.
5. La energía libre y la entalpía estándar es corregida como resultado de la transferencia de las especies del estado gaseoso al estado líquido.
6. Se calculan los valores de ΔG° y ΔH° y ΔG^* y ΔH^* para el máximo punto de energía en la superficie de menor energía que conecta los reactivos con los productos. Con estos valores se puede calcular la constante de equilibrio y la de velocidad de reacción.
7. Finalmente, para acercarse a una situación real hay que calcular las anteriores constantes considerando los coeficientes de actividad para todas las especies a la temperatura y en el disolvente adecuado.

Otras propiedades de la materia son las mecánicas, termodinámicas, electromagnéticas, químicas, biológicas y ecológicas

le pueden hacer varias preguntas diferentes que corresponden a otras tantas propiedades. Éstas, de manera muy general, son:

- *Propiedades mecánicas*: como la elasticidad, o la viscosidad.
- *Propiedades termodinámicas*: por ejemplo, la temperatura y la capacidad calorífica.
- *Propiedades electromagnéticas*: como la susceptibilidad magnética, o la conductividad eléctrica.
- *Propiedades químicas*: en este caso, la capacidad de una sustancia para oxidarse, o bien disolverse en determinado disolvente.
- *Propiedades biológicas*: las que tienen que ver con la materia viva, como la dosis letal media o la anestesia.
- *Propiedades ecológicas*: por ejemplo el agujero de ozono y el efecto invernadero.



Las propiedades químicas de la materia pueden a su vez caracterizarse a través de tres “ejes” que han constituido y constituyen a lo largo del tiempo el quehacer químico. Estos ejes son: método, medida y lenguaje

Así, de entre todas las propiedades, hay una propiedad particular, aquella que se refiere a la reacción química, que diferencia a esta disciplina de las demás.

Las propiedades químicas de la materia pueden a su vez caracterizarse a través de tres “ejes” que han constituido y constituyen a lo largo del tiempo el quehacer químico. Estos ejes son:

- *Método*, que en química se reduce al análisis y la síntesis.
- *Medida*, a través del mol, la unidad química de cantidad de materia del sistema internacional de unidades.
- *Lenguaje*, al nombrar químicamente a una sustancia se indica su composición y estructura.

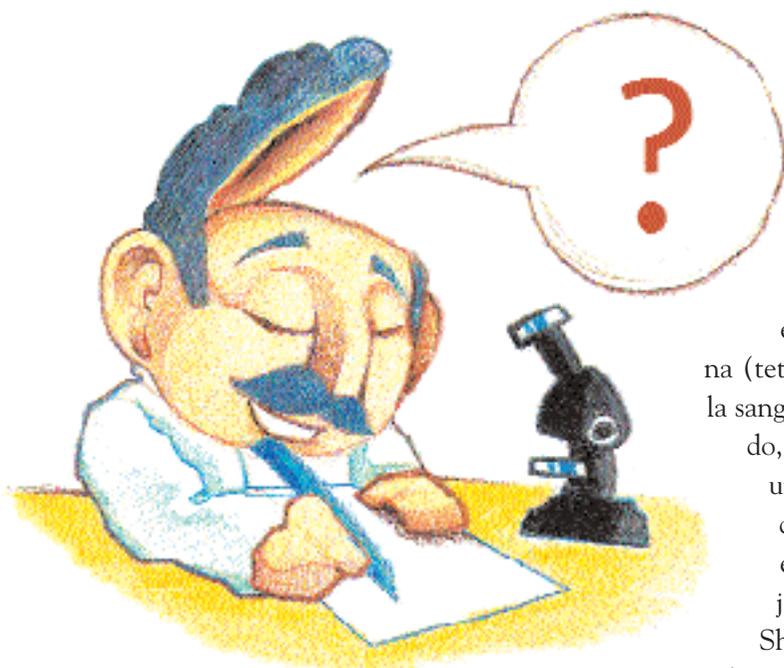
Método: análisis

En el diccionario se puede encontrar, para la palabra análisis, la siguiente definición: “Distinción y separación de las partes o elementos constituyentes de una sustancia, con objeto de determinar su composición”.

Desde el principio, el análisis de las sustancias, asociado permanentemente al concepto de pureza, ha sido una obsesión para los químicos. Toda vez que las sustancias “naturales” no son puras, la separación de las partes que las constituyen, el aislamiento de lo que se quiere hasta donde sea posible, ha sido una constante del quehacer químico incluso desde que éste era alquímico. Una buena parte de la historia de la química ha sido la de las técnicas de separación y purificación.

Hasta hace poco, una sustancia desconocida podía ser identificada mediante espectrometría de masas, teniendo solamente una diezmilésima de gramo de ella. Si la sustancia es conocida, se requiere menos cantidad para identificarla: una billonésima de gramo. Por ejemplo, el ingrediente activo de la marihuana (tetrahidrocanabinol) puede ser encontrado en la sangre después de una semana de haberse ingerido, y en concentraciones tan pequeñas como una cienmillonésima de gramo por mililitro de sangre. Ésta es la misma relación que hay entre un gramo y un poco más de 10 jumbos-jets cargados.

Sherwood Rowland, ganador del premio Nobel de química en 1995 (con Mario Molina) por su



trabajo sobre el adelgazamiento de la capa estratosférica de ozono, ha dicho que la química atmosférica “apareció” con el advenimiento de las técnicas de análisis capaces de detectar una parte en mil millones, es decir, cuando se estuvo en posibilidad de distinguir una molécula específica entre mil millones de moléculas distintas.

Método: síntesis

La química es la ciencia más productiva. Considerando únicamente los resúmenes de la revista *Chemical Abstracts*, los químicos (aproximadamente tres millones en todo el mundo) escriben más artículos (un poco más de 700 mil al año) que todas las demás ciencias juntas, incluidas las sociales.

Algunas precisiones sobre lo anterior:

- Se deben de leer 20 revistas todos los días para alcanzar 1 por ciento de toda la información química que se produce mundialmente.
- Para saber de toda la química, hay que leer dos mil revistas por día, o si sólo se leen los resúmenes, se necesita leer 200 páginas al día (hasta un total de 70 mil páginas al año). Más aún: como el número de revistas relacionadas con la química se está también incrementando, habrá que duplicar nuestra capacidad de lectura para el año 2015.
- Los químicos hacen nuevas sustancias. De algunos cientos en 1800 a 19 millones hoy, el número se ha venido duplicando cada 13 años, por lo que podemos extrapolarlo a cerca de 80 millones en 2025 y 300 millones en 2050.
- Hoy, cada resumen del *Chemical Abstracts* presenta en promedio dos nuevas sustancias, mientras que en 1950 sólo informaba en promedio de 0.5.
- El número de nuevas sustancias crece más rápido que el de patentes. En promedio, los químicos sintetizan el doble de nuevas sustancias que las que se patentaban en 1980.

De lo anterior resulta que los químicos hacemos materia que no necesariamente es “utilizable”. Hacerla es un fin en sí mismo. Por ello la química no sólo crea objetos; crea su propio objeto. No existe previamente, es inventada en la medida que progresa.

Medida

El concepto de mol, la unidad que los químicos utilizan para medir cantidad de sustancia, es el eje vertebral de la cuantifi-

cación de esta ciencia. El mol es el puente entre el mundo macroscópico y el microscópico propios de la química. En el extremo microscópico tenemos a los tan pequeños cien mil billones (100 000 000 000 000 000) de átomos contenidos en un diminuto pedazo de polvo de cobre metálico, detectable apenas con una buena balanza, en lo que es el extremo inferior del mundo macroscópico. El mol nos permite relacionar ambos mundos.

Muchas de las propiedades materiales son propiedades derivadas de la enorme cantidad de partículas que juntas “construyen esa propiedad”. Una molécula del triestearato de glicerilo (que en una gran cantidad conocemos como la grasa proveniente del ganado vacuno) no tiene viscosidad. Una o dos moléculas de agua no tienen punto de ebullición. Uno, dos o tres átomos de cobre no tienen conductividad eléctrica. Aquí surgen preguntas que todavía no tienen respuestas exactas: ¿cuántos individuos se requieren para formar una colectividad que tenga propiedades colectivas? O, por ejemplo y más específicamente, ¿cuántos átomos de oro forman oro metálico?

La química es la ciencia más productiva. Considerando únicamente los resúmenes de la revista *Chemical abstracts*, los químicos escriben más artículos (un poco más de 700 mil al año) que todas las demás ciencias juntas, incluidas las sociales

Para solucionar las dificultades del lenguaje de la química existe desde principios del siglo XX la IUPAC, en donde un grupo de químicos de distintos países discuten y acuerdan la forma de nombrar a la nueva materia. Las sugerencias emanadas de la IUPAC son de carácter internacional y permiten, por ejemplo, que sin saber chino, una persona pueda entender de qué trata un texto de química escrito en ese idioma

En su muy particular estilo, Bachelard nos indica:

¡Qué asombros cuando se nos enseña, en los primeros cursos de química, que bajo la forma de hoja delgada, lo bastante delgada como para perder su cualidad de sustancia opaca, el oro deja pasar una hermosa luz verde! Pero el realista ha tratado rápidamente de asimilar esta contradicción cualitativa. Dice tranquilamente: el oro es amarillo por reflexión, el oro es verde por transparencia. Y el filósofo puede incluso tomar como pretexto esta contradicción cualitativa para enriquecer el carácter concreto del oro. No hay más que una sustancia eminentemente concreta que pueda recibir así caracteres divergentes.

(...) Pero he aquí que desde hace diez años los descubrimientos se multiplican en ese campo: las láminas delgadas no tienen un color bien definido si precisamente no se les da un espesor muy regular, un espesor bien definido. Por transparencia, según los espesores de la hoja son menores, el oro es verde amarillento, azul verdoso, azul y finalmente rosa violáceo (...)

Dicho de otra manera, la definición del color está ligada a una definición meticulosa del espesor de la materia. El color de una materia es un fenómeno de la extensión material o, más exactamente, de la extensión de la materia.

A diferencia de las anteriores propiedades materiales, un solo átomo de azufre es capaz de reaccionar con dos de oxígeno para formar una molécula de dióxido de azufre. Lo mismo pasa con 100 átomos, un millón o una mol de azufre. Producen, al reaccionar con la parte correspondiente de oxígeno, cien, un millón o una mol de moléculas de dióxido de azufre. Las propiedades químicas de la materia no pasan necesariamente por la cantidad de materia involucrada.

Lenguaje

El lenguaje de la química, como todo lenguaje, tiene dos características: a pesar de su imprecisión permite que las personas se comuniquen a través de él; además inevitablemente produce complicaciones, ambigüedades y riqueza por su uso y manejo. Para solucionar estas dificultades existe desde principios del siglo XX la IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), algo así como la Academia de la Lengua Española para el castellano, en donde un grupo de químicos de distintos países discuten y acuerdan la forma de nombrar a la nueva materia. Las sugerencias emanadas de la IUPAC son de carácter internacional y permiten, por ejemplo, que sin saber chino, una persona pueda entender de qué trata un texto de química escrito en ese idioma.

En el lenguaje de la química se utilizan, además de los símbolos de los elementos, representaciones moleculares. Éstas son fórmulas, dibujos o inclusive modelos tridimensionales que son interpretados al interior de un determinado marco de

referencia para obtener la información que son capaces de proporcionar.

Cada fórmula estructural representa no sólo una determinada sustancia, sino también, muchas veces, su historia; es decir de dónde viene (cómo se obtuvo) y a dónde va (cómo puede reaccionar). Una fórmula informa sobre composición y estructura. No sólo de lo que se conoce, sino de lo que todavía está por hacerse. Así, el lenguaje de la química nos permite representar y nombrar moléculas no existentes. En eso estriba una buena parte de su poder. El lenguaje de la química es un modelo predictivo de las sustancias. Con él se puede predecir materia, materia que todavía no existe.

HACIA UNA CULTURA QUÍMICA

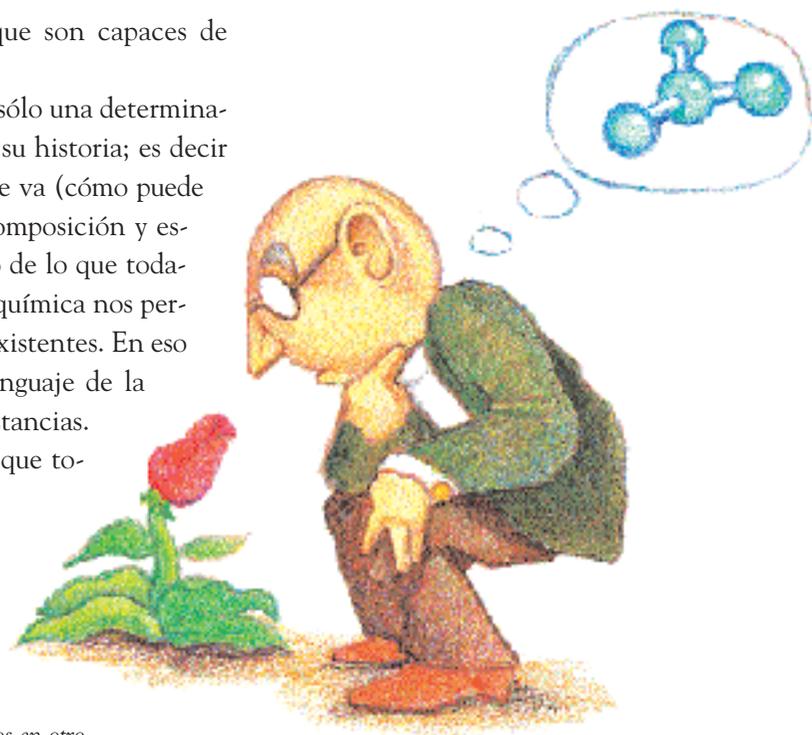
En su forma más rudimentaria, una reacción química es una nueva ordenación de átomos. Los átomos en un determinado orden constituyen una especie determinada de moléculas, y los átomos en otro orden, con adiciones quizás o supresiones, constituyen otra. En unas reacciones una molécula sólo cambia su configuración; en algunas, una molécula se apropia los átomos que otra le suministra, los incorpora y logra una estructura más compleja. En otras, una molécula compleja es engullida, bien en su totalidad, bien en parte, y se convierte en fuente de átomos para otra molécula.

P. W. Atkins, 1995

La cultura química se concreta en la compleja mezcla resultante de integrar método, forma de medir y lenguaje, es decir, el cambio de materia a través de la reacción química. De alguna u otra manera eso es lo que hacemos los químicos: así medimos, así nos comunicamos entre nosotros. Ya en la primera "Enciclopedia" publicada en 1783, Diderot escribió:

Los químicos son todavía un pueblo distinto, no muy numeroso, que tiene una lengua propia, sus leyes particulares, sus misterios y que vive prácticamente aislado en medio de un pueblo más grande, que muestra poca curiosidad por sus asuntos y que no espera casi nada de su industria.

Hoy el asunto es diferente. La industria química (y aquí hay que considerar también a la farmacéutica) ha cambiado desde el siglo XIX la faz de nuestro planeta y nos ubica en un espacio artificial. Como ejemplo, la esperanza de vida de la población mexicana en 1930 era de 37 años; en la actualidad es del doble. En términos generales somos más, vivimos más y en algunos casos mejor. Más alimentos, materiales de construcción, medici-



Cada fórmula estructural representa no sólo una determinada sustancia, sino también, muchas veces, su historia, es decir de dónde viene (cómo se obtuvo) y a dónde va (cómo puede reaccionar)

nas, combustibles, telas y colores; más objetos materiales para más y nuevas necesidades.

Por otro lado la extraordinaria complejidad del mundo material y la limitación de los modelos que tenemos para describirlo y entenderlo hacen que la más cruda clasificación química sea incomparablemente más predictiva respecto a las propiedades químicas de la materia que la mecánica cuántica. Sin embargo, la mecánica cuántica es más predictiva en cuanto a las propiedades electromagnéticas. Lo anterior nos obliga a pensar en grande y no reducir una ciencia a la otra. Más aún, a identificar y ponderar las características particulares de cada una. Ésa es, al interior de la ciencia, una de las herejías contra la ortodoxia.

La física y de la química comparten algunos temas, pero la segunda no se reduce a la primera. De la misma manera que la biología, con su extraordinaria complejidad resultado de la interacción de unos pocos átomos diferentes, no se reduce a la química, que con una gran diversidad de átomos no tiene esa complejidad. No obstante, si el centro de la actividad química es crear nuevas formas materiales, el mundo molecular de la biología es, por

ejemplo, uno de los muchos posibles universos de la química que esperan ser creados por los químicos.

Como ha dicho el premio Nobel de química, Jean Marie Lehn: “La esencia de la química no sólo es descubrir sino inventar y, sobre todo, crear. ¡El libro de química no sólo es para ser leído, sino para ser escrito! Si fuera música, ¡la pieza de química no sólo sería para ser ejecutada, sino para ser compuesta!”

Bibliografía

- Bachelard, G. (1976), *El materialismo racional*, Buenos Aires, Paidós.
- Chalmers, A. (1988), *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?*, México, Siglo XXI.
- Giere, R. (1999), *Science without laws*, Chicago, University of Chicago Press.
- Hoffmann, R. (1997), *Lo mismo y no lo mismo*, México, Fondo de Cultura Económica.
- Hoffmann, R. y P. Lazlo (1991), “Representation in Chemistry”, *Angew Chem.Int.Ed. Engl.* 30, 1-16.
- Jensen, W. (1980), *The lewis acid-base concepts*, Nueva York, Wiley.
- Lehn, J. M. (1995), *Supramolecular chemistry.concepts and perspectives*, Weinheim, VCH.
- Norman, O. (1998), “Marginalized discourses and scientific literacy”, *J. Research in Science Teaching*, 35, 365-374.
- Scerri, E. (2000), “Philosophy of chemistry-A new interdisciplinary field?”, *J.Chem.Ed.*, 77, 522-525.
- Schummer, J. (1999), “Challenges for chemistry documentation, education and working chemist”, *Educación Química*, 10, 92-101.

Como ha dicho el premio
Nobel de química,
Jean Marie Lehn:
“La esencia de la química
no sólo es descubrir sino
inventar y, sobre todo, crear”

José Antonio Chamizo Guerrero es doctor en Química Organometálica y profesor de la Facultad de Química de la UNAM. Ha publicado cerca de cincuenta libros de divulgación y de texto que se utilizan desde la primaria hasta el posgrado. En 1996 recibió el premio TWNSO que otorga la Academia Mexicana de Ciencias.
jchamizo@servidor.unam.mx