



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**MAESTRIA EN DOCENCIA PARA LA EDUCACIÓN MEDIA
SUPERIOR**

**“LA DOCENCIA DE LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA EN
EL BACHILLERATO UNIVERSITARIO A TRAVÉS DE UN
ENFOQUE HISTÓRICO”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO PARA LA
EDUCACIÓN MEDIA SUPERIOR, QUÍMICA.**

P R E S E N T A:

Q. JORGE MEINGUER LEDESMA

TUTOR(A): DRA. PILAR RIUS DE LA POLA

JUNIO DEL 2011

FACULTAD DE QUÍMICA





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

“Bienaventurado aquel que en un libro sabe poner más que puro texto. Aquel que junto a lo discursivo y complejo de su disciplina puede, y no como añadidura sino por fino y depurado arte, colocar lo no discursivo, el sentimiento, el amor por el saber...”

A Familia mi por su incondicional apoyo.

Pequeñísima
estrella,
parecías
para siempre
enterrada
en el metal: oculto,
tu diabólico
fuego.
Un día golpearon
en la puerta
minúscula:
era el hombre.
Con una descarga
te desencadenaron,
viste el mundo,
saliste
por el día,
recorriste
ciudades,
tu gran fulgor llegaba
a iluminar las vidas,
eras
una fruta terrible,
de eléctrica hermosura,
venías
a apresurar las llamas
del estío,
y entonces
llegó
armado
con anteojos de tigre
y armadura,
con camisa cuadrada,
sulfúricos bigotes,
cola de puerco espín,
llegó el guerrero
y te sedujo:
duerme,
te dijo,
enróllate,
átomo, te pareces
a un dios griego,
a una primaveral
modista de París,
acuéstate

en mi uña,
entra en esta cajita,
y entonces
el guerrero
te guardó en su chaleco
como si fueras sólo
una píldora
norteamericana,
y viajó por el mundo
dejándote caer en
Hiroshima(...)
(...)Oh chispa loca,
vuelve
a tu mortaja,
entiérrate
en tus mantos minerales,
vuelve a ser piedra ciega,
desoye a los bandidos,
colabora
tú, con la vida, con la
agricultura,
suplanta los motores,
eleva la energía,
fecunda los planetas.
Ya no tienes
secreto,
camina
entre los hombres
sin máscara
terrible,
apresurando el paso
y extendiendo
los pasos de los frutos,
separando
montañas,
enderezando ríos,
fecundando,
átomo,
desbordada
copa
cósmica,
vuelve
a la paz del racimo,
a la velocidad de la alegría,

vuelve al recinto
de la naturaleza,
ponte a nuestro servicio,
y en vez de las cenizas
mortales
de tu máscara,
en vez de los infiernos
desatados
de tu cólera,
en vez de la amenaza
de tu terrible claridad,
entrérganos
tu sobrecogedora
rebeldía
para los cereales,
tu magnetismo
desencadenado
para fundar la paz entre los
hombres,
y así no será infierno
tu luz deslumbradora,
sino felicidad,
matutina esperanza,
contribución terrestre.

“Oda al átomo”
(fragmentos)
Pablo Neruda, 1954

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dra. Ana María Martínez Vázquez

Vocal: Dr. Felipe León Olivares

Secretario: Dra. Margarita Flores Zepeda

1er Suplente: Dra. María del Pilar Rius de la Pola

2do Suplente: Dra. Benilde García Cabrero

Sitio donde se desarrollo el tema:

Facultad de Química, Departamento de Física y Química Teórica, UNAM.

Tutor(a):



Dra. Ma. del Pilar Rius de la Pola

Sustentante:



Q. Jorge Meinguer Ledesma

AGRADECIMIENTOS

Agradezco fraternal y notablemente a la Dra. Ma. del Pilar Rius de la Pola por el apoyo brindado en la elaboración de este trabajo. También por su reflexiva y fraternal formación en importantes aspectos de la vida.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (**DGAPA**), por la beca otorgada en el programa para la formación de profesores para el bachillerato universitario PFPBU-MADEMS, en el período comprendido entre agosto de 2008 - julio de 2009.

A los Doctores Ana María Martínez Vázquez, Felipe León Olivares, Margarita Flores Zepeda y Benilde García Cabrero por la supervisión y atención mostrada a este trabajo.

A los Docentes Mariana Muñoz Galván, Lilia Gasca Pineda y Felipe León Olivares por su entusiasta y sincera colaboración en este proyecto.

A las Mtras. Lilia Gasca Pineda y Patricia Peláez Cuate por su atenta supervisión en las prácticas docentes del programa de MADEMS en el plantel No. 1 “Gabino Barreda” de la ENP-UNAM. A la directora de esta institución la Dra. María de Lourdes Pastor Pérez.

Al Dr. Javier Miranda Martín del Campo del departamento de *física experimental* del IFUNAM, por permitirme formar parte de su equipo, un año más, durante los semestres 2008-1 y 2008-2 respectivamente. Así como por el apoyo económico brindado a través del proyecto: PAPIIT IN103307. A los Mtros. Valter A. Barrera y Alberto A. Espinosa por su colaboración en dicho proyecto.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Introducción | 1 |
| Objetivo | 3 |
| Justificación | 3 |
| Síntesis de la metodología empleada | 6 |
| | |
| Capítulo I: El conocimiento pedagógico del contenido en la enseñanza de los nanosistemas a través de un enfoque histórico | |
| 1.0 Al lector | 7 |
| 1.1 El conocimiento pedagógico del contenido (CPC) | 7 |
| 1.1.1 Generalidades | 7 |
| 1.1.2 El conocimiento pedagógico del contenido en la química | 11 |
| 1.1.3 Documentación del CPC de los profesores | 14 |
| 1.1.4 CoRe: La Representación del Contenido | 15 |
| 1.2 La historia en la enseñanza de las ciencias | 18 |
| 1.2.1 Perspectivas: El papel de la historia de la ciencia en el contexto escolar | 20 |
| 1.3 Metodología: El CPC de profesores en el bachillerato universitario | 23 |
| 1.3.1 Diseño del Instrumento de Análisis (CoRe) | 23 |
| 1.3.2 Descripción de los participantes y su institución | 25 |
| 1.3.3 Tendencias docentes recabadas | 26 |
| 1.3.4 Conclusiones | 32 |
| 1.4 Bibliografía | 34 |
| | |
| Capítulo II: Concepciones clásicas de la materia | |
| 2.0 Al lector | 36 |
| 2.1 Dimensión histórica: El pensamiento clásico de la materia | 36 |
| 2.1.1 Presocráticos (600-300 a.C.) | 36 |
| 2.1.2 Los Cuatro Elementos y el Éter: “Aristóteles” (300 a. C.) | 40 |
| 2.1.3 El período alquímico | 42 |
| 2.2 Dimensión didáctica: El discurso como recurso pedagógico | 44 |
| 2.2.1 Reflexiones docentes | 44 |
| 2.2.2 El discurso. Una herramienta imprescindible en la enseñanza de la química | 45 |
| 2.2.3 Figuras discursivas en la enseñanza de la química | 46 |
| 2.2.4 Propuesta de una analogía, una metáfora y una alegoría en la enseñanza de los nanosistemas | 51 |
| 2.3. Bibliografía | 58 |

Capítulo III: Las nuevas luces del atomismo, la materia en el siglo XIX

| | |
|--|----|
| 3.0 Al lector | 60 |
| 3.1 Dimensión histórica. Los átomos pesan: el modelo atómico de Dalton | 60 |
| 3.1.1 ¿Cómo se pensaba la materia después de la primera revolución química? | 60 |
| 3.1.2 John Dalton. Los átomos pesan | 61 |
| 3.1.3 Contribución del trabajo de Dalton al lenguaje y la modelación química | 65 |
| 3.2 Dimensión didáctica: El modelo de Dalton | 67 |
| 3.2.1 Reflexiones docentes | 67 |
| 3.2.2 Propuesta didáctica: “Los átomos pesan” | 71 |
| 3.3 Dimensión histórica. El desarrollo del modelo cinético molecular (MCM) | 77 |
| 3.4 Dimensión didáctica: El modelo cinético molecular (MCM) | 84 |
| 3.4.1 Reflexiones docentes | 84 |
| 3.4.2 Identificación de concepciones alternativas sobre el MCM | 88 |
| 3.4.3 Propuesta didáctica en la enseñanza del MCM | 89 |
| 3.5 Bibliografía | 94 |

Capítulo IV: La estructura de la materia en el siglo XX

| | |
|--|-----|
| 4.0 Al lector | 95 |
| 4.1 Dimensión histórica | 95 |
| 4.1.1 El descubrimiento del electrón y el modelo atómico de Thompson | 95 |
| 4.1.2 El modelo Atómico de Rutherford | 98 |
| 4.1.3 El descubrimiento del protón y el neutrón | 101 |
| 4.1.4 El primer modelo cuántico del átomo | 102 |
| 4.1.5 El Modelo actual: El átomo cuántico ondulatorio | 113 |
| 4.2 Dimensión didáctica | 122 |
| 4.2.1 Reflexiones docentes | 122 |
| 4.2.2 Identificación de concepciones alternativas: partículas y modelos atómicos | 127 |
| 4.2.3 Propuesta didáctica | 129 |
| 4.3 Bibliografía | 143 |
| Comentarios Finales | 145 |

Apéndices

| | |
|---|-----|
| Apéndice 1: Respuestas recabadas por profesores del bachillerato universitario en el instrumento CoRe | 148 |
| Apéndice 2: Concepciones alternativas de los estudiantes sobre la estructura de la materia | 154 |
| Apéndice 3: Reactivos para la evaluación del MCM | 157 |
| Apéndice 4: El uso de modelos en la enseñanza de la química | 161 |
| Apéndice 5: Respuestas obtenidas por los estudiantes en el experimento: <i>Análisis de la luz emitida por sales metálicas al ser sometidos al efecto de una llama</i> | 164 |

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo intenta contribuir a mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje (EA) de la estructura de la materia en el bachillerato universitario, a partir de la elaboración de una propuesta docente basada en el conocimiento pedagógico del contenido (CPC) y de una revisión histórica del tema.

La estructura de la materia constituye un eje temático en todos los programas de química en el nivel medio superior. A lo largo de las últimas décadas, la orientación, el lenguaje y el estilo de los cursos de química en lo relativo a los sistemas atómico-moleculares han cambiado considerablemente. Ejemplo de ello, son las preferencias en su denominación a través del tiempo: *sistemas atómico-moleculares* en los años 40, *microsistemas* o *partículas elementales* un par de décadas después y actualmente *nanosistemas*. La importancia de su estudio radica en que los cursos de química en el nivel medio superior consideran como temas medulares al cambio químico, el enlace químico y la modelación atómica de la materia, contenidos que están sustentados en el estudio del comportamiento de los electrones, distribuciones de carga, absorción y emisión de energía. Estos modelos y conceptos han sufrido en las aulas toda clase de aberraciones, omisiones, contradicciones e inexactitudes¹. Atendiendo a esta problemática, en este trabajo se realiza un análisis crítico de los modelos y el lenguaje que los docentes utilizan para la enseñanza de estos temas, considerando como crucial el contexto histórico que les precede, ya que con ello se fomenta una comprensión de la dimensión humana de nuestra disciplina.

Es muy importante citar que esta tesis pretende ser una herramienta de consulta que fomente la reflexión docente, estableciendo criterios que favorezcan la selección y secuenciación de contenidos disciplinares. El trabajo fue estructurado en cuatro capítulos, en el primero de ellos se presenta una justificación del uso del conocimiento pedagógico del contenido (CPC) como recurso de análisis didáctico y de la orientación histórica del mismo. En este apartado se muestra también la exploración del CPC realizada a docentes del bachillerato universitario. Con base a las tendencias obtenidas sobre el CPC y una investigación histórica-didáctica emprendida, en los capítulos siguientes se presenta una propuesta docente secuenciada en tres períodos históricos: el pensamiento clásico, el siglo XIX y la estructura de la materia en el siglo XX. Cada período histórico constituye un capítulo en este trabajo la elección de estos periodos obedece a la riqueza docente que ofrece su tratamiento.

¹Garofalo, A. (1997). *Housing electrons: Relating quantum numbers, energy levels, and electron configurations*. Journal of Chemical Education. 74(6), 709-710

Lo que se busca en este trabajo es dotar de sentido a los contenidos disciplinares a través de una reconfiguración que considere como ejes las siguientes dimensiones:

- ❖ **Dimensión histórica y humanística.** Por medio de la investigación histórica que se presenta sobre la evolución del concepto “materia” desde la óptica de nuestra disciplina, se pretende que el profesorado que enseña estos temas se auxilie en estudios de la historia de la ciencia, para que le ayuden a tomar decisiones respecto al qué enseñar. Los estudios sobre la historia y la filosofía de la ciencia dan luces de cómo organizar los contenidos en la programación curricular, la formación docente y el aprendizaje².
- ❖ **Dimensión didáctica.** La didáctica es la ciencia o el arte de enseñar. Uno de sus fundamentos teóricos es la reflexión; en nuestro caso concreto, esta reflexión está guiada por la identificación teórica de las concepciones alternativas que presentan los estudiantes sobre contenidos disciplinares en cuestión, así como un análisis objetivo de los mismos. Esta reflexión permitirá identificar fallas y aciertos que consideraremos relevantes en su tratamiento, adecuándolos a la profundidad que exige el nivel medio superior. Las secuencias didácticas que se presentan son estrategias validadas e investigadas cuidadosamente en la literatura.
- ❖ **Dimensión lingüística.** Consideramos que es didácticamente inadecuado conducir un curso de química con un uso excesivo de fórmulas y de modelos abstractos, por lo que pretendemos hacer uso de un discurso analógico que permita una mediación simbólica entre el lenguaje común y el científico. Por su naturaleza procedimental se sabe que el uso de analogías y metáforas en el aula permite el desarrollo de importantes habilidades cognitivas como analizar, comparar, relacionar y diferenciar, todas ellas clave dentro del repertorio de habilidades que persigue un programa escolar de ciencias. Aunado a ello, proporcionan a los jóvenes el nivel de seguridad que les permite conectar su mundo al mundo de las teorías y las abstracciones proporcionando un soporte afectivo y motivacional para el aprendizaje.

Finalmente es importante resaltar que la propuesta docente que se presenta en esta tesis, se espera que sea puesta en marcha en el trabajo por emprender después de la obtención del grado, y que como se mencionó anteriormente, sea una fuente de consulta útil para otros compañeros profesores de química.

² Quintanilla, M., Luigi., F y Camacho, J. “Aportes de la historia de la química a una didáctica de la teoría atómica en libros de texto”, Universidad Católica de Chile, 2006

OBJETIVO

Elaborar una propuesta docente dirigida al profesorado que contribuya a mejorar la enseñanza de la estructura de la materia en el nivel medio superior. Dicha propuesta será el resultado de una investigación que comprende un análisis histórico-didáctico sobre el tema, y el uso del CPC (conocimiento pedagógico del contenido) como herramienta educativa para situar y dimensionar la docencia de estos contenidos en el bachillerato de la UNAM.

JUSTIFICACIÓN

La enseñanza de la ciencia en todo el mundo está en crisis, hecho que se manifiesta principalmente por la disminución de alumnos en las facultades de ciencia, un déficit de la opinión pública sobre su relevancia y una mala formación científica en la ciudadanía³. Un aspecto que agudiza esta crisis en el nivel medio superior es el ideal positivista que aún se reproduce en las aulas. Se enseña ciencia, específicamente química con la finalidad implícita de formar futuros profesionales de la disciplina, lo que constituye un grave error. El contexto actual exige concebir una enseñanza de la ciencia dirigida a ciudadanos cultos no a futuros científicos. La razón de este posicionamiento es evidente, la mayor parte de la población estudiantil en el bachillerato optara por una formación profesional distante de la actividad científica. Sin embargo, es importante señalar que en todas las esferas educativas se considera a la alfabetización científica⁴ como un componente prioritario.

El reto de la educación química en el contexto actual es presentar a esta disciplina como una ciencia razonable, es decir, una disciplina generadora de opinión que pueda contribuir al desarrollo técnico, cultural y humano de la sociedad. Para ello, la literatura recomienda reorientar los contenidos con miras a consolidar un proceso educativo donde se articule lo teórico, lo experimental y lo lingüístico –lo que puede ser pensado, lo que puede ser hecho, lo que puede ser dicho⁵–, para que en conjunto, se aprendan las ideas fundamentales de la química gracias a una coherencia discursiva y disciplinar. La reconfiguración didáctica de las ciencias necesita profesores que estén actualizados en el devenir de su disciplina y la educación, es decir, docentes conscientes de la dimensión investigativa que implica su labor.

³ Izquierdo M., “Nuevos contenidos para una nueva época: Aportaciones de la didáctica de las ciencias al diseño de las nuevas ‘ciencias para la ciudadanía’”, *Anais do XVI SNEF*, Sociedad Brasileña de Física, 2005. p.3

⁴ La **alfabetización científica** debe ser concebida, como un proceso de “investigación orientada” que, superando el reduccionismo conceptual permita a los alumnos participar en la aventura científica de enfrentarse a problemas relevantes y reconstruir los conocimientos científicos, que habitualmente la enseñanza transmite ya elaborados, lo que favorece el aprendizaje más eficiente y significativo (Sabariego, J. y Manzanares M., “alfabetización científica”, *Memorias: I congreso de Ciencia Tecnología y Sociedad*, México, 2006)

⁵ Izquierdo, M., “Nuevos contenidos para una nueva época: Aportaciones de la didáctica de las ciencias al diseño de las nuevas ‘ciencias para la ciudadanía’”, cit., p. 6

Por su parte, el estudio del comportamiento de la materia constituye un tema toral en la enseñanza de la química y de la ciencia en general. La razón es la fuerte vinculación que tiene con todas las disciplinas científicas y el contexto tecnológico actual. Se vale de la estructura de la materia la biología para explicar la conformación de las proteínas, DNA o la datación de ciertos fósiles, es inherente a la física en el estudio de la luz, la radiación electromagnética o el análisis nuclear, la ingeniería utiliza la modelación molecular para explicar las propiedades de los materiales gigantes y pequeños usados en la construcción y en la telefonía celular respectivamente, es esencial para nuestra disciplina la química en la comprensión de su objeto de estudio: la creación de nuevas sustancias. Culturalmente es un argumento científico básico, para comprender fenómenos cotidianos como la difusión del olor, la combustión o el funcionamiento de una luz láser por citar algunos.

En la actualidad la docencia del comportamiento químico de los nanosistemas –sistemas atómico-moleculares– en el nivel medio superior reviste una añeja problemática de naturaleza didáctica. Los profesores de química en este nivel educativo escasamente dan un tratamiento formal a modelos o conceptos vigentes sobre el tema. Hecho que origina una enseñanza anacrónica y distante no sólo del panorama actual de la ciencia, sino del entorno socio-cultural y tecnológico que viven los estudiantes. La literatura reporta que cuando estos contenidos son abordados generalmente se presentan de forma desarticulada y errónea generando severos problemas cognitivos en el estudiantado⁶. La química que se construye en el nivel básico y medio superior descansa sobre cimientos frágiles e inestables que no permiten un aprendizaje cabal de la disciplina.⁷ En la literatura sobre didáctica de las ciencias se citan algunas de las razones de esta crisis: la falta de formación académica del profesorado sobre el tema, la complejidad matemática que implica su tratamiento, la necesidad de utilizar modelos que resulten antiintuitivos, las dificultades para llevar a cabo experiencias de laboratorio por su alto costo y la enorme cantidad de conocimientos previos necesarios para poder comprender la naturaleza cuántica de la estructura atómica⁸.

En cuanto al aprendizaje es bien conocido que una cantidad alta de estudiantes no consigue una comprensión adecuada sobre el tema en general. La principal dificultad que tienen los alumnos al respecto es de naturaleza ontológica, no son capaces de advertir que los electrones, fotones, etc., no son ni ondas, ni partículas clásicas, sino objetos nuevos con un comportamiento nuevo, el cuántico que no tiene similitud alguna con lo que puede ser percibido o medido directamente⁹. Esta reflexión señala un camino para hacer frente a esta problemática, reforzar el estudio de temas clásicos y adecuar algunos contenidos cuánticos. El dominio de un sistema conceptual permitirá al estudiantado usarlo como contrastación en la comprensión de la naturaleza cuántica de las partículas químicas. En

⁶ Tsarpalis, G. y Papaphotis, G., “High –school Students’ Conceptual Difficulties and attempts at conceptual Change: The case of basic quantum chemical concepts”, *International Journal of Science Eduacations*, vol. 31 (7), pp. 895-930, 2009

⁷ Chamizo, J., Nieto E. y Sosa, P.,” La enseñanza de la química tercera parte. Evaluación de los conocimientos de química desde secundaria hasta licenciatura”, *Educación química*, vol 15 (2), pp. 60-65, 2004. p. 64

⁸ De la Fuente. A., Perrotta, M. y Dima, G., “Estructura atómica: análisis y estudio de las ideas de los estudiantes (8^o EGB)”, *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 23 (1), pp. 123-134, 2003. p. 130

⁹ Solbes, J. y Sinarcas, V., “Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica”, *Didáctica de las ciencias sociales y experimentales*, No. 23, pp. 123-151, 2009. p. 149

consecuencia, si se considera de interés pedagógico la enseñanza de contenidos actualizados sobre el tema, convendría hacerlo de forma secuenciada y a través de una didáctica que posibilite su tratamiento en el nivel requerido.

La historia de la ciencia es un recurso de gran utilidad en la secuenciación de contenidos, porque permite la comprensión de aspectos significativos sobre la evolución y consolidación de un paradigma o teoría científica en estudio, favoreciendo la elaboración de situaciones problemáticas simplificadas que se precisan en la enseñanza¹⁰. En lo referente a la didáctica, es fundamental pugnar por una actividad escolar integral constituida por aspectos disciplinares, afectivos, y discursivos. La literatura en didáctica de las ciencias vincula a los aspectos disciplinares con el “qué enseñar”, es decir, los modelos, conceptos, leyes y formulaciones empíricas que configuran un tema disciplinar. La dimensión afectiva con el “por qué enseñar”, destacando la relación del tema con otras esferas del conocimiento como la historia, la filosofía, la economía, el medio ambiente, etc. Finalmente el discurso educativo se vincula con el “cómo enseñar” –en este punto se recomienda considerar las ideas previas o alternativas del estudiantado–, cuestión que implica la articulación crítica de un discurso escolar, que establezca el uso de analogías y metáforas como vehículos de mediación simbólica entre el mundo de los estudiantes y el mundo de la ciencia.

La elaboración de una propuesta docente que considere los aspectos anteriormente mencionados, requiere contextualizar el proceso de enseñanza aprendizaje sobre el tema o contenidos en estudio. Para ello, es fundamental contar con el testimonio del profesorado en una institución académica determinada. El conocimiento pedagógico del contenido (CPC) es una categoría de investigación educativa –establecida por L. Shulman en los años ochentas– que considera el conocimiento disciplinar y pedagógico que articula un profesor para enseñar de forma regular un tema en estudio¹¹. El CPC como herramienta de investigación educativa permite identificar cómo los profesores conciben un tema o contenido disciplinar y qué tipo de estrategias educativas ponen en marcha para hacerlo enseñable. El reconocimiento del CPC en el profesorado es un recurso muy valioso, ya que pugna por la reorientación crítica del trabajo educativo, hecho que favorece tanto el proceso de enseñanza como el de aprendizaje (EA). Específicamente en este trabajo se explora el CPC de algunos docentes de la ENP (Escuela Nacional Preparatoria) para conocer, analizar y dimensionar la enseñanza de contenidos sobre la estructura de la materia en los cursos de química del nivel medio superior.

¹⁰ Solbes, J. y Sinarcas, V., “Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica”, cit., p.124

¹¹ Garriz, A y Trinidad R., “El Conocimiento Pedagógico del Contenido”, *Educación química*, vol. 15 (2), pp. 2-15, 2004. p. 3

SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

En el primer capítulo de este trabajo se presentan los antecedentes teóricos del conocimiento pedagógico del contenido y de la relevancia del enfoque histórico asumido. En este mismo apartado se muestra el método emprendido para explorar el CPC del profesorado sobre el tema y las tendencias docentes encontradas. El análisis de estas últimas es la base de la propuesta docente que se muestra en capítulos posteriores, la cual tiene como punto de partida una breve secuenciación histórica de los contenidos y como cierre la reflexión y acción didáctica de los mismos.

Sostenemos que la reflexión histórica es importante porque permite extraer los problemas significativos que suscitaron el desarrollo de la teoría atómica, favoreciendo la selección de contenidos en su tratamiento. Se elaboraron mapas conceptuales para cada periodo histórico en estudio, con el propósito de ser usados como material didácticos en la práctica docente. Partimos del hecho de que la teoría atómica tiene que ver con el desarrollo y diferenciación de las ideas en la propia historia de la química.

Por otro lado, el análisis pedagógico o dimensión didáctica como le hemos llamado en el trabajo tiene la finalidad de propiciar un aprendizaje significativo en el estudiantado sobre el tema. Este apartado está articulado por un agudo análisis disciplinar de los contenidos en cuestión, la identificación (teórica en su mayoría) de las ideas alternativas de los estudiantes sobre los mismos y la propuesta de estrategias concretas para abordarlos.

La propuesta docente está secuenciada en tres periodos históricos, cada uno de ellos constituye un capítulo en este texto: concepciones clásicas de la materia (capítulo II), las nuevas luces del atomismo: siglo XIX (capítulo III) y la materia en el siglo XX (capítulo IV). La elección de estos periodos obedece a la utilidad docente que ofrece su exposición en la enseñanza de la química en el nivel medio superior. Hecho que fue identificado en las entrevistas docentes realizadas.

CAPÍTULO I

EL CONOCIMIENTO PEDAGÓGICO DEL CONTENIDO EN LA ENSEÑANZA DE LOS NANOSISTEMAS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE HISTÓRICO

1.0 Al lector:

En la primera parte de este capítulo se presenta, de forma resumida, los antecedentes correspondientes al conocimiento pedagógico del contenido (CPC) y el papel de la historia en la enseñanza de las ciencias. Posteriormente se muestra el método empleado en la exploración del CPC a profesores del bachillerato universitario. Finalmente se explicitan las tendencias docentes encontradas y las conclusiones de su análisis. Estas últimas son la base de la labor histórica-didáctica emprendida en capítulos posteriores.

1.1 El conocimiento pedagógico del contenido (CPC)

1.1.1 Antecedentes

El conocimiento pedagógico del contenido (CPC) es una categoría de investigación educativa que considera el conocimiento disciplinar y pedagógico, articulados por un profesor al enseñar de forma regular un tema específico. El CPC tiene su origen en la segunda mitad de la década de los ochenta del siglo anterior, es a Lee S. Shulman¹ a quien la literatura atribuye su difusión en el campo de la enseñanza de las ciencias. Según Shulman es fundamental distinguir tres tipos de conocimientos para ubicar el conocimiento que se desarrolla en la mente de los docentes:

- a) El conocimiento del contenido temático (CD). Se refiere a la cantidad y organización del conocimiento de un tema específico en la mente de un profesor. Para pensar apropiadamente acerca del contenido se requiere ir más allá del conocimiento de los hechos o conceptos de un dominio, se requiere comprender las estructuras sustantivas y semánticas de un tema². Por estructuras semánticas la literatura señala que son aquellas formas en las cuales los conceptos y principios básicos de una disciplina son organizados para incorporar sus hechos. La estructura sintáctica de una disciplina es el conjunto de formas en las cuales son establecidas la validez o invalidez de afirmaciones sobre un fenómeno dado.
- b) El conocimiento pedagógico del contenido (CPC). Es el conocimiento que va más allá de la materia *per se* y que llega a la dimensión del conocimiento del tema de la materia para la enseñanza³.

¹ Lee S. Shulman es investigador emérito de la Universidad de Stanford y presidente de la “Carnegie Foundations for the Advancement of Teaching”.

² Schwab, J. J., *Science, curriculum and liberal education*, Chicago, University of Chicago Press, 1978

³ Shulman, L. S., “Knowledge and Teaching: Foundations of the New Reform”, *Harvard Educational Review*, 57(1), 1-22, 1987. p.9

- c) El conocimiento Curricular (CC). Este conocimiento, según Shulman: “está representado por el abanico completo de programas diseñados para la enseñanza de temas particulares que se encuentra disponible en relación con estos programas, al igual que el conjunto de características que sirven como indicaciones o contraindicaciones para el uso de currículos particulares o materiales de programas en circunstancias particulares”⁴.

De estos tres tipos de conocimiento, el conocimiento pedagógico del contenido es el que ha recibido mayor atención tanto en el campo de la investigación docente como en su práctica. El CPC representa la amalgama del contenido y la pedagogía dentro de una comprensión del “cómo”: temas, problemas o situaciones particulares son organizados, representados y adaptados para la enseñanza⁵. Bajo esta óptica, en 1999 Carlsen, a través de un diagrama, esquematiza al CPC como una fusión del conocimiento pedagógico general y el conocimiento del contenido e incluye al mismo currículo científico dentro del CPC⁶.

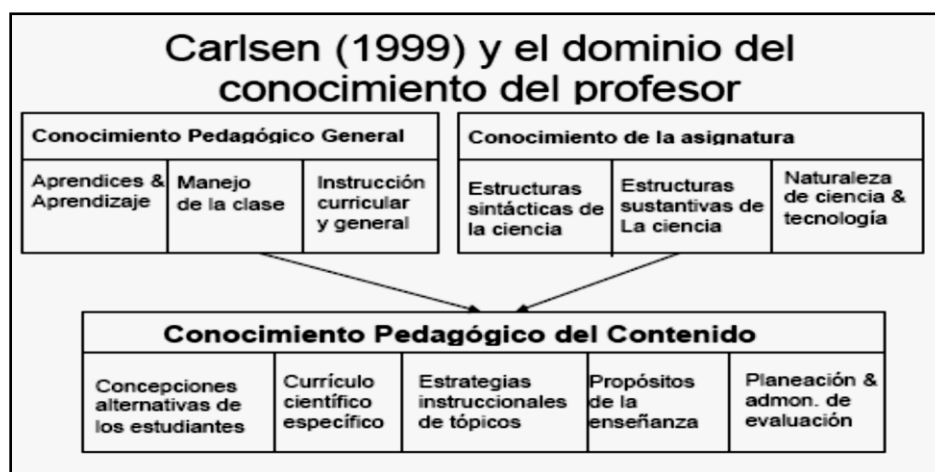


Figura 1. El CPC según Carlsen⁷.

El CPC incluye, para los temas regularmente enseñados en el área disciplinar del profesor, lo que lo habilita para responder preguntas tales como: “¿Qué analogías, metáforas, ejemplos, símiles, demostraciones, simulaciones o similares, son las más efectivas para comunicar los entendimientos apropiados o las actitudes de este tópico a estudiantes con antecedentes particulares?”⁸. El CPC también incluye un entendimiento de lo que hace fácil o difícil el aprendizaje de tópicos específicos: “Las concepciones y preconcepciones que los

⁴ Op. cit., p.9

⁵ Velazquez, P., *El conocimiento pedagógico de la biotecnología: Repertorios de experiencia profesional y pedagógica de dos profesoras, una del nivel medio superior y otra del superior*, Tesis-MADEMS, Facultad de Química, UNAM, 2008, p.8

⁶ Garritz, A. y Trinidad, R., “El conocimiento pedagógico de la estructura corpuscular de la materia”, *Educación Química*, vol.17, No. extra 1, pp. 114-141, 2006, p. 117

⁷ Este esquema es presentado en el libro editado por J. Gess-Newsome y Norman Lederman, fue tomado del artículo publicado sobre CPC por Garritz y Trinidad en 2006.

⁸ Shulman, L. S. y Sykes, G. “*A national board for teaching? In search of a bold standard: A report for the task force on teaching as a Profession*”. New York: Carnegie Corporation, 1986, p.9

estudiantes de diferentes edades y antecedentes traen al aprendizaje de los tópicos y lecciones más frecuentemente enseñados”. Los profesores necesitan el conocimiento de las estrategias más probables de ser fructíferas en la reorganización del entendimiento de los aprendices⁹.

El estudio del CPC ofrece la oportunidad de analizar y entender cómo los profesores llegan a hacer enseñables los contenidos, permite al docente tener la habilidad de convertir sus comprensiones acerca de un tema, en distintas estrategias de enseñanza que le faciliten el logro de los aprendizajes en sus estudiantes. Como bien lo señala el doctor Talanquer: “*Más allá de saber su ciencia y contar con sólidas bases en pedagogía, el buen docente parece poseer un tipo de conocimiento que le permite transformar pedagógicamente el contenido en actividades de aprendizaje significativas para el estudiante. Este tipo de conocimiento ha recibido el nombre de conocimiento pedagógico del contenido (CPC)*”¹⁰. El CPC ha demostrado ser complejo, no sólo como conjunto de conocimientos y habilidades, sino también en las diversas interpretaciones que ha suscitado. Actualmente el CPC está incluido en los Estándares de Desarrollo Profesional de los Profesores de Ciencias en los Estados Unidos y se ha tomado en ese país como una guía para la reforma educativa en los programas de formación de profesores de ciencia¹¹. En la didáctica de la ciencia el CPC ha sido usado como una herramienta de investigación que permite documentar “cómo los profesores novatos aprenden poco a poco a interpretar y transformar su contenido temático del área en unidades de significados comprensibles para un grupo diverso de estudiantes”¹². El conocimiento pedagógico del contenido es referenciado como una integración de diversos componentes formativos que debe poseer un profesor, siendo los más aceptados cuatro: el conocimiento pedagógico, el conocimiento temático o de contenido, las características de los estudiantes y el contexto ambiental del aprendizaje.

Al inicio del presente siglo Gess-Newsome y Norman G. Lederman¹³ desarrollaron dos modelos teóricos que explican al CPC como una acción formativa producto de la interacción articulada de tres esferas de conocimiento: la de la pedagogía, la de la disciplina y la del contexto. A tales modelos los denominé integrativo y transformativo. El primero hace referencia a un marco de conocimiento donde cada esfera es desarrollada de forma individual y se articulan en la práctica docente, mientras que el segundo no se ocupa de estos saberes sino de cómo son transformados éstos en CPC, es decir, en un conocimiento que permita documentar e identificar la efectividad de esta acción docente. Estos modelos son un importante punto de partida para analizar los planes de formación docente.

⁹ Garritz A. y Trinidad, R. “El conocimiento pedagógico del contenido”, *Educación Química*, vol. 15 (2), pp. 2-6, 2004, p.2

¹⁰ Talanquer, V., “¿Qué conocimientos distingue a los buenos maestros de química?”, *Educación Química*, vol. 15 (1), pp. 60-66, 2004, p. 64

¹¹ Garritz y Trinidad, “El conocimiento pedagógico de la estructura corpuscular de la materia”, cit., p. 117

¹² Van Driel, J., Veerloop, N., y De Vos, W., “Developing Science Teachers Pedagogical Content Knowledge”, *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 35 (6), pp. 673-695, 1998

¹³ Gess-Newsome, J. y Lederman, N. G., "Examining Pedagogical Content Knowledge. The Construct and its Implications for Science Education", Dordrecht, The Netherlands, *Kluwer Academic Publishers*, xii + 306 pp, 1999.

De esta forma, el CPC como categoría de investigación educativa adquiere una acepción de un todo, puesto que su carácter transformativo y dinámico, lo convierte en un modo de comprensión particular para quienes nos dedicamos a la docencia. Sin embargo, los gestores educativos que diseñan los planes y programas de estudio en ciencias parecen seguir considerando los procesos de formación docente como elementos fraccionados sin una posibilidad real de síntesis, en la actualidad esto es un tema que apenas comienza a ser investigado en profundidad. Lo que es un hecho es que los modelos de Newsome y Lederman constituyen el primer intento sistemático para sintetizar las investigaciones recientes sobre el CPC, el modelo del cual fue derivado y para trazar sus implicaciones para la investigación y la práctica¹⁴.

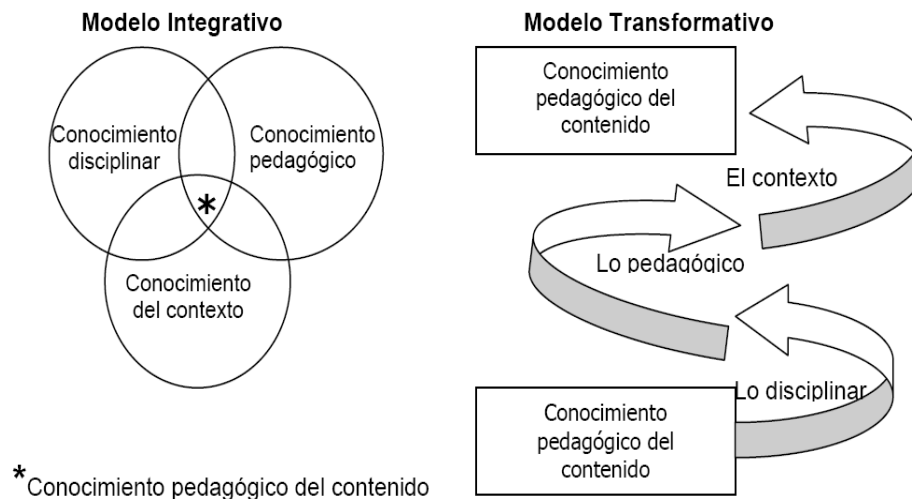


Figura 2. Modelos del conocimiento docente: Modelo Integrativo y Transformativo.

La literatura reporta que un profesor con alto CPC es aquel que se acerca al perfil del docente ideal, es decir, el profesional crítico, reflexivo y capacitado en diversas y complejas áreas del conocimiento, más allá del conocimiento requerido por la disciplina a impartir. Es un docente que cuestiona sus creencias y el pensamiento espontáneo propio que deviene de esta actividad, es un educador que conceptualiza a su alumnado como aprendices situados en un contexto sociocultural bien determinado, hecho que le posibilita la organización de su enseñanza de una manera más efectiva, puesto que enfoca sus estrategias pedagógicas hacia una mejor representación del contenido¹⁵. El reconocimiento del CPC en el profesorado es un recurso muy valioso ya que pugna por la reorientación crítica del trabajo educativo, cuestión que favorece el aprendizaje significativo en los estudiantes, es decir, la identificación y aplicación de una disciplina científica en la comprensión e intervención de la problemática que permea el mundo actual.

¹⁴ Garritz y Trinidad, "El conocimiento pedagógico de la estructura corpuscular de la materia", cit., p.118

¹⁵ Velazquez, P., *El conocimiento pedagógico de la biotecnología: Repertorios de experiencia profesional y pedagógica de dos profesoras, una del nivel medio superior y otra del superior*, cit., p. 9

1.1.2 El conocimiento pedagógico del contenido en la química

Se puede asumir como lo señala Talanquer que el CPC de un buen docente de química es el resultado de “pensar en química” con el propósito de motivar, sorprender, generar interés y dar sentido al conocimiento químico. Es la consecuencia de una ardua y constante reflexión sobre la naturaleza de los temas, ejemplos, explicaciones, analogías, metáforas, representaciones, actividades, experiencias, preguntas, problemas que son apropiados para distintos tipos de estudiantes y pueden favorecer aprendizajes¹⁶. Por ejemplo, si se considera la complejidad que demanda la estructuración de un curso típico de química en el bachillerato, se encontrará que para el maestro principiante o novato, este trabajo resulta relativamente sencillo, pues basta con apegarse lo más posible al programa de estudios que sigue la institución académica donde labora o seguir la secuencia de un libro de texto seleccionado. Mientras que para el maestro experimentado esta misma labor se convierte en un verdadero desafío intelectual, pues el docente experto es sabedor que sus decisiones determinarán el éxito o fracaso del curso. La tarea de estructurar los ejes temáticos de un curso es una labor que ejemplifica la relevancia del CPC en el profesorado, pues representa una habilidad que va más allá de su formación didáctica disciplinar y pedagógica.

En la enseñanza de la química, específicamente, los estudios sobre CPC han sido pocos. El doctor Andoni Garritz¹⁷ los menciona hábilmente en un artículo publicado en la revista *Educación química* en 2004; a continuación se citan en forma resumida los más significativos:

- A. “Clermont, Krajcik, y Borko (1993), en el cual realizan una exploración de la naturaleza del crecimiento del CPC que ocurre a profesores de ciencias de nivel medio que participan en un taller intensivo de capacitación sobre enseñanza usando demostraciones para dos conceptos básicos en física y química: la densidad y la presión del aire. Estos autores encuentran que el CPC de los profesores de ciencias puede crecer a través de talleres intensivos, orientados a desarrollar habilidades. Sin embargo, aunque hubo un crecimiento en los repertorios representacional y adaptacional de estos profesores, en otros dos aspectos del CPC parece haber ocurrido mucho menos avance; esto es, en el conocimiento asociado con la evaluación crítica y del contenido y con la selección instruccional. Estos hallazgos indican que el CPC es un sistema de conocimiento complejo y sugieren que sus diferentes componentes pueden mostrar diferentes velocidades de crecimiento en una actividad de capacitación.

Estos mismos autores, en 1994, examinan en otro artículo el CPC de profesores de química, tanto con experiencia como principiantes, que usan como estrategia la enseñanza por demostraciones, ya que ésta se considera un componente importante del repertorio pedagógico de los profesores de ciencias y es un área que no está bien desarrollada. Los hallazgos sugieren que los profesores con experiencia, comparados con los novatos, poseen un mejor repertorio a representacional para la enseñanza de conceptos fundamentales en química. También parecen ser más conocedores de la complejidad de las demostraciones químicas, cómo de dicha complejidad puede interferir con el aprendizaje y de cómo las demostraciones químicas más simples pueden promover mejor el aprendizaje de conceptos.

¹⁶ Talanquer, V., “¿Qué conocimientos distingue a los buenos maestros de química?”, cit., p. 61

¹⁷ Garritz A. y Trinidad, R. “El conocimiento pedagógico del contenido”, *Educación Química*, vol. 15 (2), pp. 2-6, 2004

- B. Veal (1998) realiza un estudio sobre la evolución del CPC de futuros profesores de química de secundaria sobre aspectos de termodinámica, y encuentra básicamente lo siguiente:
- i. Los futuros profesores desarrollan diferentes tipos de CPC: general, de dominio específico y de tópico específico, los cuales difieren en sus propósitos, usos y aplicaciones (Veal, 1999); la velocidad y el grado de desarrollo de cada uno de estos tipos de CPC se encuentra en función de su formación y experiencia anterior.
 - ii. El desarrollo del CPC de tópico específico ocurrió antes del de dominio específico.
 - iii. Las futuras profesoras demostraron y desarrollaron un entendimiento fundamental de la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias que servirá como base para el desarrollo de un CPC de dominio específico mayor.
- C. Dawkins y Butler (2001) analizan el CPC de siete estudiantes del profesorado de ciencias del segundo año universitario respecto al concepto de mol. Encuentran que las estrategias empleadas por ellos para la enseñanza tienen marcada influencia de los libros de texto de química, en los cuales no siempre se manejan los conceptos como los manejan los científicos (no usan, por ejemplo, el término “cantidad de sustancia”). Asimismo, hallan que un entendimiento claro del concepto no necesariamente implica que se usen las estrategias más adecuadas para la resolución de problemas relativos a la proporción entre masa y moles.
- D. Recientemente, De Jong, Veal y Van Driel (2002) realizan una recopilación de los estudios llevados a cabo con un enfoque sobre el conocimiento básico de los profesores de química, centrándose sobre el CA (conocimiento de asignatura) y el CPC, esto es, los dos tipos de conocimiento que están determinados por la naturaleza del tópico específico enseñado. Estos autores resumen la variedad de aspectos del CPC de los profesores de química de la siguiente manera:
- i. Los profesores de química con insuficiente CPC de tópicos específicos pueden, en ocasiones, realizar demostraciones de tópicos específicos que pueden reforzar las concepciones alternativas de los estudiantes.
 - ii. Un excelente CA, el conocimiento de cómo aprenden los estudiantes y el conocimiento de representaciones alternativas, son requisitos para la selección y uso de explicaciones analógicas apropiadas y efectivas.
 - iii. La selección, por parte de los profesores de química, de una estrategia para la enseñanza de cálculos estequiométricos con frecuencia no es muy adecuada desde la perspectiva del aprendizaje del estudiante.

En su último trabajo, Van Driel, de Jong y Verloop (2002) analizan el crecimiento del CPC relativo a la relación macro-micro en la enseñanza de la química, de 12 profesores en formación durante el primer semestre de su año formativo como posgraduados. Evalúan su conocimiento de la materia, su experiencia docente con respecto a tópicos específicos, el conocimiento de las concepciones y las dificultades de aprendizajes estudiantiles, y su participación en talleres de trabajo específicos.

- E. Un trabajo reciente sobre este tema en el bachillerato es el de Treagust y Mamiala (2003), en el que analizan, con ejemplos, los cinco tipos de explicaciones que emplean los profesores durante sus clases introductorias de fisicoquímica y de química orgánica, acerca de los tres niveles de representación usados en la química: el macroscópico, el submicroscópico y el simbólico:
- i. Analógicas (un fenómeno o experiencia familiar se emplea para explicar algo poco familiar).
 - ii. Antropomórficas (a un fenómeno que se le dan características humanas para hacerlo más familiar)

- iii. Relacionales (una explicación que es relevante dada las experiencias personales de los aprendices)
 - iv. Basadas en problemas (una explicación demostrada a través de la resolución de algún problema).
 - v. Basadas en modelos (utilizar un modelo científico para explicar un fenómeno)¹⁸.
- F. “Vicente Talanquer (2004) dice que hasta la aparición del concepto de CPC sólo se hemos dado bandazos en el proceso de formación de profesores. Insiste en que transformar el conocimiento disciplinario en formas que resulten significativas para los estudiantes requiere que el docente posea el CPC suficiente para que:
- 1. Identifique las ideas, conceptos y preguntas centrales asociados con un tema;
 - 2. Reconozca las probables dificultades conceptuales;
 - 3. Identifique preguntas, problemas o actividades que obliguen al estudiante a reconocer y cuestionar sus ideas previas;
 - 4. Seleccione experimentos, problemas o proyectos que permitan que los estudiantes exploren conceptos centrales;
 - 5. Construya explicaciones, analogías o metáforas que faciliten la comprensión de conceptos abstractos, y
 - 6. Diseñe actividades de evaluación que permitan la aplicación de lo aprendido en la resolución de problemas en contextos realistas y variados¹⁹.
- G. “Hofstein (2003, 2004) nos presentan el desarrollo de liderazgo entre los profesores de química en Israel a consecuencia de la implantación de nuevos contenidos y de estándares pedagógicos en la educación científica en ese país. Las características de liderazgo que asumen en su trabajo tienen que ver con motivación, autoconfianza, creatividad, integridad, responsabilidad y carisma, logradas por el desarrollo personal, el desarrollo profesional y la dimensión social de los profesores. En los aspectos profesionales describen tanto el desarrollo del CD como del CPC, a lo cual se dedican durante todo el primer año del programa de liderazgo.
- Con relación al crecimiento del CPC sobre enseñanza experimental, el mismo Hofstein y Lunetta (2004) apuntan que acrecentar en los profesores de ciencias el conocimiento del contenido y su conocimiento pedagógico del contenido puede ayudar a que éstos desarrollen más altos niveles de conocimiento, habilidades y confianza para construir ambientes de aprendizaje efectivos, lo que incluye experiencias científicas de laboratorio más sustantivas y significativas. En esta era de expansión exponencial del conocimiento de ciencia y pedagogía, tal desarrollo debería ser un proceso continuo a lo largo de la vida profesional de un profesor.
- H. Reyes y Garritz (2006) documentaron el CPC de cinco profesores universitarios para el tema de reacción química, de donde destacan los siguientes puntos:
- i. Un problema que presenta la enseñanza de este tema es que en ocasiones, para muchos alumnos, la aparición de sustancias no es visible; así mismo, se les dificulta comprender la aparición de nuevas sustancias y la conservación de la materia.
 - ii. El alumno debe llegar a cabo reacciones reales, inclusive en la balanza, y debe intentar escribirlas con lenguaje simbólico, aunque falle al principio.
 - iii. Se recomienda que el estudiante observe y analice varias RQ (reacciones químicas) hasta que saque sus propias conclusiones acerca de lo que una RQ

¹⁸ Óp. cit. pp. 4-5.

¹⁹ Garritz y Trinidad, “El conocimiento pedagógico de la estructura corpuscular de la materia”, cit., p.118-119

representa. Resulta importante que el profesor presente algunos ejemplos como demostraciones de cátedra.

iv. En cuanto a las concepciones alternativas de los alumnos, el CPC de los profesores entrevistados contiene gran cantidad de información, particularmente en cuanto a los conceptos centrales “sustancia” y RQ.

I. Garritz y Trinidad (2006-2007) escribieron un par de artículos que versan sobre el conocimiento pedagógico de la naturaleza corpuscular de la materia; su impacto en el proceso formativo de profesores; las aplicaciones más importantes que se han mencionado en el campo de la química; las formas que existen de documentarlo; sus expresiones implícitas en cinco proyectos renovadores sobre la estructura corpuscular de la materia; y su captura en diez profesores mexicanos sobre este mismo tema, comparando los datos de esta captura con los datos de profesores australianos previamente obtenidos²⁰.

Finalmente, el Dr. Garritz señala que la comprensión cabal del CPC de los profesores sobre la química es un proceso complejo y difícil de caracterizar, sin embargo, sugiere que esta tarea se puede facilitar si se emprende investigación del CPC sobre temas específicos, es decir, estudios sobre estructura de la materia, equilibrio químico, reacción química, enlace químico, etcétera. El autor recomienda también hacer más estudios sobre el conocimiento básico con que cuentan los profesores de química de nuestros países, ya que esto redituará en el mejoramiento de la enseñanza de la química.

1.1.3 Documentación del CPC de los profesores

Reconocer y documentar el CPC es una labor difícil de emprender porque:

- ✓ No está asociado con la impartición de una determinada lección. Las actividades de la buena docencia pueden contribuir al CPC, pero por lo general no son ejemplos explícitos del CPC por sí mismos.
- ✓ Es una noción compleja que resulta ser reconocible sólo para un periodo largo de tiempo, al menos el tiempo requerido para completar la totalidad de una unidad de trabajo. En muchas ocasiones el profesor no utiliza toda su potencial con un grupo dado de estudiantes.
- ✓ Involucra, entre otras cuestiones, el conocimiento de las dificultades específicas de aprendizaje de los estudiantes con algún tópico, cuestión que en ocasiones no es clarificada al escuchar de viva voz a los profesores.

En 1990, Pamela Grossman²¹ reporta cuatro fuentes en la documentación del CPC en los docentes: la observación de las clases, la formación disciplinar, los cursos específicos adquiridos durante la formación como profesor y el tiempo de experiencia en la praxis

²⁰ Velazquez, P., *El conocimiento pedagógico de la biotecnología: Repertorios de experiencia profesional y pedagógica de dos profesoras, una del nivel medio superior y otra del superior*, cit., pp. 19-21.

²¹ Grossman, P., *The making of a teacher: Teacher Knowledge and teacher education*, New York: Teachers College Press, 1990

educativa. En la actualidad, la metodología que se ha consolidado en la recopilación y documentación del CPC en el profesorado es la reportada por Loughran, Mulhall y Berry en 2004²². Esta metodología hace uso de dos herramientas para estudiar el conocimiento pedagógico del contenido:

- i. *CoRe* (*Content Representation* o Representación del Contenido) y
- ii. *PaP-eRs* (Repertorios de la Experiencia Pedagógica y Profesional)

Mediante el *CoRe* se logran documentar las ideas centrales usadas por los docentes, –durante la enseñanza de un tema determinado– a través de la aplicación de una serie de preguntas específicas, como las que se muestran a continuación:

- A. ¿Qué intentas que los estudiantes aprendan alrededor de esta idea?
- B. ¿Por qué es importante para los estudiantes aprender esta idea?
- C. ¿Qué más sabes sobre esta idea?
- D. ¿Cuáles son las dificultades y limitaciones conectadas a la enseñanza de esta idea?
- E. ¿Qué conocimiento acerca del pensamiento de los estudiantes influye en tu enseñanza de esta idea?
- F. ¿Cuáles otros factores influyen en la enseñanza de esta idea?
- G. ¿Qué procedimientos empleas para que los alumnos se comprometan con la idea?
- H. ¿Qué maneras específicas utilizas para evaluar el entendimiento o confusión de los alumnos sobre la idea?²³

Los Repertorios de Experiencia Profesional y Pedagógica (*PaP-eRs*), por su parte, son explicaciones narrativas del CPC de un profesor para una pieza particular de contenido científico²⁴. Los *PaP-eRs* están enraizados en la observación de las clases y tienen como función primordial relatar de forma concreta, clara y significativa, la forma como un profesor elabora e interactúa en su clase al abordar un tema. Procuran informar en un texto lo que un profesor toma como acciones primordiales al dar su clase, abriendo la reflexión sobre su práctica, generando así la posibilidad de un cambio progresivo. Es importante mencionar que ambos instrumentos son complementarios, ya que aspectos del *CoRe*, son tratados en los *PaP-eRs* e ilustran cómo cierto conocimiento pudo realizarse en una práctica eficaz.

1.1.4. *CoRe*: La Representación del Contenido

El uso de la Representación del Contenido (*CoRe*) permite conocer, de forma general, cómo es que los profesores conceptualizan y desarrollan un contenido particular de una unidad temática. La *CoRe* es un instrumento en forma de matriz, en cuyas columnas aparecen las ideas centrales seleccionadas para identificar la enseñanza de un contenido o eje temático y,

²² Loughran, J., Mulhall, P. y Berry, A., “In Search of Pedagogical Content Knowledge in Science: Developing Ways of Articulating and Documenting Professional Practice”, *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 41(4), 370–391, 2004

²³ Garritz y Trinidad, “El conocimiento pedagógico de la estructura corpuscular de la materia”, cit., p.120

²⁴ *Ibíd.* p.120

en las filas, cada una de las preguntas sugeridas anteriormente, permitiendo documentar las reflexiones del profesorado sobre su práctica docente.

| IDEAS/ CONCEPTOS CENTRALES | | | |
|--|--------|---------|------|
| PREGUNTAS | IDEA I | IDEA II | Etc. |
| 1.0 ¿Qué intentas que los estudiantes aprendan alrededor de esta idea? | | | |
| 2.0 ¿Por qué es importante que los estudiantes aprendan esta idea? | | | |
| 3.0 ¿Qué más sabes sobre esta idea? | | | |
| Etc. | ... | ... | ... |

Figura 3. Estructura matricial de la CoRe

La Representación del Contenido es un instrumento educativo que requiere una amplia inversión de tiempo cuando es contestado con toda seriedad, responsabilidad y sinceridad por parte de los docentes entrevistados. Es una herramienta fértil para recopilar ideas centrales, objetivos de enseñanza, concepciones alternativas de los estudiantes, dificultades en el aprendizaje, formas de evaluación, entre otras. La CoRe, es pues, una forma de generalizar sistemáticamente el CPC de los profesores, ya que se vincula con el cómo, por qué y el para qué del contenido que se enseña, tomando en consideración lo que es significativo en la formación de los estudiantes y la experiencia docente. La profesora *Patricia Velázquez* en su trabajo de tesis para obtener el título de la MADEMS,²⁵ citado con anterioridad, explica cada aspecto que conforma al instrumento CoRe, cuestión que parece apropiado citar.

- **Ideas/ Conceptos centrales.** Constituye el eje horizontal de la CoRe contiene los temas centrales, que se refiere a las ideas que la ciencia según el profesor ve como cruciales para que los estudiantes desarrollen su comprensión del tema. Si las ideas o conceptos son pocas, significa que el conocimiento de este tema puede ser englobado en uno sólo, si son demasiadas, esto sugiere que el tema pueda ser desglosado en trozos de información que parezcan ajenos. Por lo tanto, el desarrollo de las ideas centrales puede tomar un buen tiempo y requiere una considerable reflexión y debate.
- **Lo que se pretende que los estudiantes aprendan acerca de esta idea.** Se sugiere que sea una de las primeras preguntas del eje vertical ya que representa un punto de partida para abordar las ideas de un docente. Los creadores de la CoRe han encontrado que los profesores con experiencia tienen dificultades para ser específicos sobre lo que un grupo particular de estudiantes debe ser capaz de aprender, mientras que los profesores novatos tienden a mostrar gran seguridad sobre lo que los alumnos son capaces de aprender.
- **¿Por qué es importante que los estudiantes la aprendan?** En la multitud de definiciones curriculares a las que los docentes se enfrentan, decidiendo lo que van a enseñar, los contenidos deben estar vinculados a lo significativo que puede ser para el

²⁵ Velazquez, P., *El conocimiento pedagógico de la biotecnología: Repertorios de experiencia profesional y pedagógica de dos profesoras, una del nivel medio superior y otra del superior*, Tesis-MADEMS, Facultad de Química, UNAM, 2008.

alumnado. Se sugiere que el éxito de los profesores se basa en su experiencia y dominio del tema, así como en el conocimiento de la pertinencia de este conocimiento en la vida cotidiana del estudiante.

- **¿Qué más sabes acerca de esta idea? (lo que no tratarás con los estudiantes).** Los profesores a menudo toman decisiones difíciles acerca de lo que debe ser incluido o excluido, a fin de que los estudiantes comiencen a desarrollar una comprensión del tema. La literatura apunta que un docente crítico es aquel que reconoce el valor de no ser simplista en la enseñanza del contenido ni tampoco complejo en extremo, sino mantener un equilibrio entre ambos, con el fin de evitar una confusión innecesaria.
- **Dificultades y limitaciones relacionadas con la enseñanza de esta idea.** Cómo Shulman (1986) y muchos otros han señalado, los profesores llegan a desarrollar y responder más fácilmente los puntos anteriores que acerca de las posibles dificultades a la hora de enseñar, ya que esto último requiere investigar sobre las concepciones alternativas de los estudiantes, así como las limitaciones de los modelos y las analogías empleadas en la explicación de ciertos fenómenos. Sin esta función del CPC, se podría sostener que la enseñanza no es congruente con la teoría educativa hegemónica: el constructivismo en el aprendizaje.
- **Conocimientos acerca del pensamiento de los estudiantes que influyen en la enseñanza de esta idea.** Este aspecto de la CoRe es importante para ayudar a hacer explícito lo que los maestros han llegado a conocer a través de su experiencia en la enseñanza del tema, la manera en que esos conocimientos influyen en su forma de pensar acerca de su enseñanza. Un buen profesor de química debe considerar la teoría del cambio conceptual en la planificación de sus sesiones.
- **Otros factores que influyen en su enseñanza de esta idea.** Este punto está dirigido a desempaquetar los conocimientos del docente acerca de los estudiantes, así como sus conocimientos pedagógicos en general, con el fin de explorar la forma en que estos podrían influir en la construcción de su enseñanza.
- **Procedimientos de enseñanza (y razones particulares de su uso).** En general, la familiaridad con una serie de procedimientos de enseñanza es un aspecto importante del CPC, porque la experiencia en la enseñanza guiará la elección de los procedimientos que se ajusten a las condiciones de aprendizaje. Además, permitirá como hacer los ajustes y adaptaciones necesarios, con el fin de satisfacer las necesidades del contexto de la época o de las circunstancias.
- **Evaluación de la comprensión de las ideas por los estudiantes.** Se refiere a un control constante, de manera formal e informal, que elaboran los profesores sobre la comprensión y el progreso de los estudiantes. Éste punto está diseñado para explorar cómo los docentes abordan este aspecto en la enseñanza del tema, con el objetivo de recoger las distintas perspectivas sobre la eficacia de su enseñanza, así como de los ajustes en su forma de pensar acerca de las mismas o similares situaciones en el futuro.

Es importante señalar que los resultados que pueden recabarse al aplicar una CoRe a un grupo de profesores no deben ser conceptualizados de forma estática, es decir, como una representación única del contenido. Los resultados son solamente una generalización necesaria e incompleta que guarda relación con un contexto específico, es decir, es el resultado de un grupo particular de profesores en un momento y espacio particular. También es importante reconocer que al trabajar este instrumento en algunas secciones de este se obtendrá más precisión y detalle en la información que en otras, esto puede atribuirse a la formación,

parcialidad y diversidad representacional de los profesores participantes sobre el contenido y los diversos aspectos de su enseñanza que se pretende explorar.

1.2 La historia en la enseñanza de la ciencia

El conocimiento científico se ha ido construyendo a través de varios siglos atrás con el transitar de diversas culturas, su desarrollo ha sido trastocado por creencias, prejuicios, mitos, conflictos de poder, crisis políticas y, por qué no decirlo, también por la espontaneidad azarosa que hizo posible que las rutas de sistematización y difusión de las ciencias tomaran determinados caminos y no otros. De la misma forma, los lenguajes, instrumentos y estrategias que dirigen su enseñanza se han transformado en las últimas décadas, dando origen a una visión constructiva de ellas, que invita a incorporar aspectos socioculturales tales como su historia, lenguaje y filosofía, con el objetivo de hacer más significativo el aprendizaje del conocimiento científico para la ciudadanía. La justificación teórica que se presenta a continuación sobre el uso de la historia en la enseñanza de la química, es en su mayoría una síntesis de un artículo publicado por J. Solbes²⁶ en el año de 1996 para la revista española: Enseñanza de las ciencias. La razón de su elección es que es un texto sólido, completo, ampliamente citado sobre el tema en los últimos años y, lo más importante, está dirigido al profesorado hispanoamericano.

La historia de la ciencia y sus implicaciones en la enseñanza de la misma es una línea de investigación e innovación en educación científica con una larga tradición. Se puede citar su origen en la universidad de Harvard por Conant con la primera edición en 1952 del libro de Holton y en 1958 del libro de Holton y Roller, los cuales marcaron un hito en el uso de la historia y la filosofía en la enseñanza de la ciencia, pero que fueron traducidos al español en fechas tardías (1963 y 1978, respectivamente). Posteriormente se publicó *The Project Physics Course (1970)*, con el mismo enfoque histórico para alumnos del nivel medio superior. También hay que destacar los trabajos de Schwab (1962) sobre “la narrativa de la investigación”, que presenta a los alumnos datos reales históricos que no pueden obtenerse en el laboratorio escolar y la descripción de las situaciones problemáticas con que se enfrentan los investigadores.

Sin embargo, hoy en día esta línea de investigación ha influido poco en la práctica docente y en la elaboración de textos y materiales didácticos. ¿Por qué sucede esto? Cabe señalar, algunas de las razones. En primer lugar, la imagen de la ciencia que se transmite en la universidad a los futuros profesores es la de una ciencia vertical con contenidos ya hechos, como una serie de leyes que se deducen lógicamente a partir de unos cuantos principios. No existían en los planes de estudios universitarios, hasta hace algunos años, asignaturas de historia de las ciencias que pudiesen contrarrestar esa imagen y mostrar una imagen horizontal de la ciencia, es decir, un saber que se construye para resolver problemas específicos de la

²⁶ Solbes, J. y Traver, M.J., “La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química”, *enseñanza de las ciencias*, vol. 14 (1), 1996, pp. 103-112.

sociedad. En resumen, la mayoría de las instituciones universitarias presenta a la ciencia pública, no la privada. En segundo lugar, cuando algunos profesores llegan a tener conocimientos de historia de la ciencia, en la mayoría de los casos por afición, esfuerzo personal, etc., perciben que el desarrollo de la ciencia es un proceso extraordinariamente complejo e integral, sobre todo en lo concerniente al cambio de modelos o paradigmas, por lo que su tratamiento a menudo origina serios problemas didácticos que imposibilitan su introducción en la enseñanza. Gran parte de los trabajos que se han realizado en los últimos años, son bastante teóricos y muestran poco datos referidos en la investigación en el aula en donde se detecten problemas en el proceso de aprender bajo una orientación histórica.

A pesar de la problemática anteriormente citada, no es la ausencia de la historia de la ciencia en la formación inicial universitaria la razón preponderante de la distorsión de su comprensión. Hay muchas otras razones: sus finalidades y objetivos en la enseñanza, sus contenidos (mayoritariamente conceptuales), el método tradicional tan persistente en las aulas, la forma de evaluación, sin olvidar la ausencia u omisiones de las relaciones CTS (ciencia tecnología y sociedad). Sin embargo, investigaciones recientes sobre didáctica sostienen que incorporar aspectos de la historia de la ciencia permite mejorar la imagen de esta y su aprendizaje. En consecuencia, puede asumirse que esta inclusión producirá una actitud más positiva de los alumnos hacia los conocimientos científicos. Algunas de las actitudes que pueden desarrollarse a partir de una enseñanza de las ciencias con visión histórica, son las que se relacionan con la creatividad, la solidaridad, la iniciativa, las ganas de saber más, la responsabilidad de las acciones propias y colectivas²⁷.

Asumir la incorporación de la historia de la ciencia en la enseñanza o en la formación docente permite delimitar un amplio espacio de libertad para el profesor y también para el divulgador que diseña, aplica y evalúa el currículo, las actividades, las estrategias, los medios de transmisión y comprensión del saber científico, puesto que le permite explorar de manera naturalista y no normativa la validez de las relaciones entre los modelos teóricos, los fenómenos y el lenguaje que les da sentido. Sin embargo, un gran peligro que se plantea al utilizar en el aula la historia de la ciencia es cuándo se presenta excesivamente moralizante, y con ello, se introduce una visión simplista e inadecuada de ésta. Por ejemplo, exacerbar una visión de final feliz, de progreso sin límites, de avanzar siempre mejorando, una postura que no puede inferirse de la historia. No todo lo pasado fue mejor, ni tampoco fue peor. Debe quedar claro que el progreso no queda predeterminado y que la responsabilidad humana se juega en cada momento de la historia. La ciencia, como cualquier construcción humana, no es buena o mala, ni se asegura para ella un final feliz; siempre será lo que cada sociedad decida para ella.²⁸

²⁷ Izquierdo, M., "¿Cómo contribuye la historia de las ciencias en las actitudes del alumnado hacia el aprendizaje de las ciencias?", *aula de innovación educativa*, No. 27, pp. 37-40, 1994. p. 40

²⁸ Op. cit. p. 39

1.2.1 Perspectivas: El papel de la historia de la ciencia en el contexto escolar

Dimensionar históricamente la enseñanza de la ciencia permite relacionarla con el desarrollo técnico de las sociedades, y también con sus valores, presentándola como una actividad humana en constante evolución. La historia de la ciencia confiere sentido al proceso de su enseñanza, es por ello, que en este apartado se indaga sobre los papeles que puede jugar su inclusión en el contexto escolar. Sostenemos que dotar de una orientación histórica a la labor docente es convergente con la idea de que el primer requisito para enseñar bien es conocer profundamente la materia que se enseña, lo que supone no sólo conocimientos de los contenidos, sino también de sus aspectos metodológicos, de sus aplicaciones tecnológicas y por supuesto de su historia. Solbes²⁹, identifica algunos de los papeles más relevantes que puede jugar el uso de la historia de las ciencias en el proceso educativo.

- i. Permite ser críticos con la imagen tópica de la ciencia y, en concreto, con tergiversaciones e interpretaciones históricas que aparecen en los textos y contribuyen a dicha imagen.
- ii. Aunque la idea del paralelismo entre las preconcepciones de los alumnos y las concepciones vigentes a lo largo de la historia ha sido cuestionada, aún se puede extraer de la historia información sobre las dificultades, resistencia y obstáculos conceptuales de los estudiantes respecto a contenidos disciplinares.
- iii. Favorece la selección de contenidos fundamentales de la disciplina en función de los conceptos estructurantes para introducir nuevos conocimientos y superar obstáculos epistemológicos, aunque estos aspectos sean difícilmente traducibles en forma de hilo conductor y no se puedan explicitar en determinadas actividades.
- iv. Permite extraer de la historia problemas significativos y poner al alumno en situación de abordarlos, planteando situaciones de aprendizaje que permitan a los alumnos, en cierta medida, reconstruir los conocimientos científicos. Con ello, se pretende evitar el erróneo planteamiento empirista que introduce los experimentos sin tener en cuenta el problema histórico que los motivó o las sucesivas hipótesis que se plantearon en su interpretación, etc.
- v. Muestra la existencia de grandes crisis en el desarrollo de las ciencias, los cuales, generalmente están relacionados con cambios en el interior de un paradigma (por ejemplo, del flogisto a la teoría de la combustión de Lavoisier, del calórico a la teoría cinética del calor, de la naturaleza corpuscular de la luz a la ondulatoria, de la acción a distancia a la teoría de campos, etc.). Se trata de introducir algunas ideas no vigentes, no sólo por mostrar el carácter tentativo de la ciencia, sino por su semejanza con las preconcepciones de los alumnos o por constituir obstáculos epistemológicos. Esto puede favorecer los cambios conceptuales de los alumnos, ajustándolos a los grandes cambios de conceptos, modelos y teorías en la ciencia.

²⁹ Solbes, J. y Traver, M.J., “La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química, cit., p. 111

- vi. Posibilita mostrar el carácter hipotético, tentativo de la ciencia y mostrar, asimismo, las limitaciones de las teorías, sus problemas pendientes de solución, etc. Así se presenta a los alumnos la aventura de la creación científica, evitando visiones dogmáticas. Conviene también clarificar en qué forma es acumulativa la ciencia, ya que, por una parte, la mayoría de las teorías científicas aceptadas no se han derrumbado, sino que se han desarrollado, refinado y generalizado y, por otra parte, la contribución de cada científico está basada en el trabajo de muchos otros, en la naturaleza colectiva del trabajo científico.
- vii. Facilita mostrar a los estudiantes la evolución del lenguaje o simbología en una disciplina, para la química este hecho es fundamental. La evolución de la simbología química permite comprender la creación de nuevos lenguajes cuando se han de comunicar nuevos conocimientos.
- viii. Se puede mostrar la ciencia como una construcción humana, colectiva, fruto del trabajo de muchas personas, para evitar la idea de una ciencia hecha básicamente por genios, en su mayoría hombres.
- ix. Permite presentar las contribuciones a la ciencia realizadas en nuestro país (existe ya una línea de investigación en la ENP sobre la historia de la Química en México) así como los obstáculos que se le han planteado a lo largo de la historia.
- x. Favorece la comprensión de las interacciones CTS no sólo en el presente sino a lo largo de la historia, mostrando su evolución. Así, se ha pasado de la persecución ideológico-religiosa a que fue sometida la ciencia (Galileo, Darwin, etc.) a la constitución de la ciencia como uno de los elementos de la ideología dominante (desde el optimismo cientifista decimonónico a la actual tecnocracia). También se ha pasado de una técnica que precede a la ciencia (por ejemplo, la construcción de mecanismos o de máquinas mecánico-térmicas precedió a su estudio por la mecánica o la termodinámica) a una ciencia origen de múltiples aplicaciones técnicas e, incluso, de ramas de la producción (la eléctrica y la química en el siglo XIX, la electrónica en la actualidad).

Resumiendo, asumir un enfoque histórico en el trabajo docente permite presentar a nuestra disciplina, la química, como una compleja aventura humana. La historia de la ciencia promueve una mejor comprensión de los conceptos y métodos de que se vale la química; la visión histórica conecta el desarrollo del pensamiento individual con el desarrollo de ideas científicas; la historia de la ciencia es necesaria para entender la naturaleza propia de la ciencia; la historia de la ciencia cuestiona el dogmatismo que es común reconocer en nuestras clases y textos; la historia al examinar la vida y época de científicos individuales humaniza los contenidos del saber erudito de la ciencia, haciéndola menos abstracta y más heurística³⁰, cercana a los estudiantes y a la sociedad en general³¹.

³⁰ La heurística es el arte o ciencia del descubrimiento. Se basa en la aplicación de reglas, proposiciones y estrategias que conducen a él. Es un instrumento metodológico de gran ayuda en la construcción del conocimiento. Su función es facilitar, a través de acciones mentales, las etapas de trabajo en la construcción e interpretación del conocimiento el proceso de interacción entre la teoría y un problema. (Aliseda, A., " *Heurística, hipótesis y demostración matemática*", Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencia y Humanidades, UNAM, 2000)

En concreto, nuestra propuesta al respecto consiste en presentar a manera de síntesis un recorrido histórico donde se analizan las diferentes concepciones que han existido sobre la naturaleza de la materia en tres etapas históricas donde sufrió cambios conceptuales radicales: el pensamiento clásico de la Grecia presocrática, su concepción química en el siglo XIX y la construcción del modelo atómico vigente. Partimos del hecho de que la teoría atómica tiene que ver con el desarrollo y diferenciación de las ideas en la propia historia de la química. Trataremos de extraer de dicha historia los problemas significativos por cuanto favorecen la selección de contenidos, hecho que es fundamental en la elaboración de situaciones problemáticas simplificadas que se precisan en la enseñanza³².

Pretendemos que la semblanza histórica que en este trabajo se presenta sirva como herramienta de consulta a profesores en servicio con el propósito de fomentar un conocimiento disciplinar más completo sobre el tema. En vista de lo extenso que son los planes de estudio de química en el nivel medio superior, no pretendemos que los profesores retrasen su accionar al incluir aspectos históricos en su tratamiento, sino más bien, se invita a reorientar los contenidos que se deben impartir empleando un hilo conductor histórico o cuando menos tenerlo presente en la introducción de determinados aspectos sobre el tema. Aunado a ello, se elaboraron mapas conceptuales³³ para cada periodo histórico en estudio, con el propósito de ser usados como material didácticos en la práctica docente.



Figura 4. Destilación. Grabado alquímico de Jan Van der Straet, Florencia, 1580.

³¹ Quintanilla, M., Luigi, F y Camacho, J. *Aportes de la historia de la química a una didáctica de la teoría atómica en libros de texto*, Universidad Católica de Chile, 2006.

³² Solbes, J. y Sinarcas, V., "Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica", *Didáctica de las ciencias sociales y experimentales*, No. 23, pp. 123-151, 2009. p. 124.

³³ Los mapas conceptuales son recursos didácticos de primer orden que permiten representar esquemáticamente un conjunto de significados conceptuales, permitiendo sustentar algunas ideas en las que se debe enfocar el aprendizaje, resumir conceptos o eventos, discutir entre estudiantes y profesores relaciones entre conceptos, determinar nuevas y más complejas relaciones conceptuales, así como servir de fuente de evaluación. (Tovar, J., "el mapa conceptual como instrumento para la autoevaluación conceptual en química", revista iberoamericana de educación, Bogotá, 2004.)

1.3. Metodología: El CPC de profesores en el bachillerato universitario

1.3.1 Diseño del Instrumento de Análisis (CoRe)

Para documentar el CPC de los profesores que colaboraron fraternalmente en este proyecto, se diseñó una CoRe—con la estructura descrita por *Loughran, Mulhall y Berry*³⁴—. Las ideas centrales de este instrumento responden a una propuesta de secuenciación histórica, que en cierta forma, guarda relación con el orden programático en que aparecen estos temas en el curso de *Química III* del actual plan de estudios de la Escuela Nacional Preparatoria³⁵. El estudio de la materia en este curso se enfatiza en la primera unidad temática con el nombre: *la energía, la materia y el cambio*, sin embargo, existen referentes sobre esta temática en otras unidades, por ejemplo, en la segunda unidad se trata a detalle el modelo cinético molecular para estudiar los gases y en las otras unidades aparece cuando se aborda el enlace químico y la estequiometría. Ejemplo de contenidos que guardan relación con el tema en la primera unidad del plan de química III de la ENP, se presentan a continuación:

1.2. La materia y los cambios

1.2.1. Estados de agregación

1.2.3. Composición de la materia: átomos y moléculas.

1.2.4. Partículas subatómicas. Número atómico, número de masa, masa atómica e isótopos.

1.2.7. Leyes ponderales (enfazando la ley de la conservación de la materia).

1.3. El sol, horno nuclear.

1.3.1. Radiactividad y desintegración nuclear.

1.3.2. Rayos alfa, beta y gamma,

1.3.3. Espectro electromagnético.

1.3.4. Planck, la energía y los cuantos.

1.3.5. Espectro del átomo de hidrógeno y teoría atómica de Bohr.

1.3.6. Fisión y fusión nuclear.

1.3.7. Ley de la interconversión de la materia y la energía.³⁶

Como puede observarse, el programa sugiere abordar con el estudiantado una cantidad considerable de contenidos sobre el estudio de la estructura de la materia y no solamente en su primera unidad. Desde una perspectiva histórica, es claro, que estos contenidos pueden agruparse en periodos históricos bien determinados para su tratamiento. Para ello, es necesario considerar dos hechos importantes. Primero el programa de esta asignatura es extenso y sugiere no exceder las 12 semanas en el tratamiento del estudio químico de la materia, razón por la cual, los periodos históricos propuestos deben englobar la mayor parte de estos temas. Segundo esta secuenciación debe contemplar aquellos que los profesores consideren cruciales, tal como lo recomienda la literatura sobre CPC³⁷.

³⁴ Loughran, J., Mulhall, P. y Berry, A., “In Search of Pedagogical Content Knowledge in Science: Developing Ways of Articulating and Documenting Professional Practice”, cit.

³⁵ Planes Oficiales de estudio de la ENP, en: <http://dgenp.unam.mx/planesdeestudio/96/quinto/1501.pdf>, 2008

³⁶ Op.cit.

³⁷ Loughran, J., Mulhall, P. y Berry, A. (2004). “In Search of Pedagogical Content Knowledge in Science: Developing Ways of Articulating and Documenting Professional Practice”, *Journal of Research in Science Teaching*, 41(4), 370–391

Durante las prácticas docentes I y II del programa actual de MADEMS-Química, se logró identificar a través de entrevistas, recomendaciones y observaciones de clases con diferentes docentes del plantel No.1 “Gabino Barreda” de ENP, tres ejes temáticos para documentar el CPC de los docentes sobre el tema:

- I. El modelo atómico de Dalton y su relación con la estequiometría.
- II. El modelo cinético molecular en el estudio de los gases.
- III. El modelo atómico de Bohr al abordar la relación materia-energía y el espectro electromagnético.

Es importante resaltar que durante la estancia en las aulas preparatorias se pudo identificar con claridad que el modelo de Dalton y la teoría cinética molecular de los gases (MCM) desarrollados en el siglo XIX, continúan siendo en la práctica real, la base conceptual en la enseñanza de la estructura de la materia en el nivel medio superior. A estos tres ejes temáticos identificados, se anexaron dos más que nos pareció importante incluir en el trabajo, sobre todo por el enfoque histórico asumido. El primero de ellos no se encuentra en el plan de estudios corresponde a las ideas referentes a la materia antes de Dalton, mientras que el segundo corresponde al estudio del modelo atómico actual.

Consideramos que abordar las concepciones precientíficas de la materia permite mostrar a los estudiantes el carácter evolutivo, utópico y crucial que ha tenido este tema no sólo para la ciencia sino para la humanidad en general. Por otro lado, sostenemos que referenciar cualitativamente el modelo atómico actual favorece una mejor comprensión de los procesos químicos al estudiantado y permite vincular la enseñanza de la química más eficazmente con el contexto científico y tecnológico actual. El adecuado tratamiento de estos temas favorece la presentación de nuestra disciplina—la química—, como una actividad humana y creativa en constante evolución. Razón por la cual, con la CoRe se exploró sobre el posicionamiento conceptual y pedagógico del profesorado sobre cinco ideas centrales:

- 1) Ideas y contenidos sobre el concepto “materia” antes de Dalton.
- 2) El átomo de Dalton
- 3) Modelo cinético molecular
- 4) Espectro electromagnético y modelo de Bohr.
- 5) Modelo atómico contemporáneo/ noción de orbital³⁸.

En cuanto al número de preguntas del instrumento CoRe, se utilizó como base 6 de las preguntas sugeridas en la metodología descrita por *Loughran, Mulhall y Berry (2004)* y se añadieron tres más. Dos correspondientes al uso de la historia de la química en el tratamiento de los temas centrales seleccionados y otra, que explora la conexión de estos contenidos con

³⁸ En el tratamiento del último paradigma atómico se centra la atención en el concepto de “orbital”, ya que su adecuado uso en el aula centra la didáctica de los nanosistemas en el comportamiento electrónico y su representación gráfica, favoreciendo una docencia actual y razonable sobre el tema.

el contexto sociocultural. De esta forma, el instrumento CoRe utilizado quedo estructurado con 5 ideas centrales y nueve preguntas para indagar sobre su tratamiento docente³⁹. La primera versión del instrumento fue aplicada en el mes de noviembre del 2008 con el objetivo de identificar confusiones y errores de redacción. Su estructura final se obtuvo en el mes de enero de 2009 y se aplicó formalmente durante los meses de febrero-abril del mismo año.

1.3.2 Descripción de los participantes y su institución

Se entrevistaron tres profesores, todos ellos cuentan con estudios de posgrado y pertenecen a una misma institución, el plantel no. 1 “Gabino Barreda” de la ENP, una institución emblemática de la UNAM.

Tabla 1. Perfil de los profesores que participaron en el análisis del CPC

| Docente | Descripción. |
|-------------------|--|
| Docente 1. | Es químico por la facultad de Química de la UNAM y doctor en investigaciones educativas por el Cinvestav-IPN. Es profesor de la ENP de la UNAM desde hace más de 15 años, labora actualmente como profesor de tiempo completo en el plantel No.1. Sus trabajos actuales de investigación se centran en la historia de la Química en México |
| Docente 2. | Es química por la facultad de Química de la UNAM y maestra en docencia en educación media superior (MADEMS) por la misma institución. Es profesora de asignatura desde hace 8 años del plantel No.1 de la ENP. |
| Docente 3 | Es química farmacobióloga por la facultad de Química de la UNAM, labora en el IEMS-D.F., plantel Cuajimalpa, es pasante de MADEMS-Química y realizó prácticas docentes en la ENP plantel No. 1 y CCH plantel sur. |

Los tres profesores participantes se distinguen por una visión crítica, moderna y comprometida con la enseñanza de la química en el bachillerato universitario. Además, un hecho importante de mencionar es que todos ellos imparten o tuvieron relación con la asignatura de química III, la cual se cursa en el quinto año de preparatoria o segundo año de ingreso. La asignatura se imparte a grupos muy numerosos que en ocasiones llegan a rebasar los 60 alumnos, son 4 horas semanales, tres correspondientes a teoría y una a laboratorio, su duración es anual y es de carácter obligatorio. El modelo educativo del curriculum de química en el bachillerato de la UNAM, tiene un enfoque CTS muy marcado, basta revisar sus objetivos para percatarse de ello:

³⁹ La estructura del instrumento CoRe y las respuestas obtenidas se pueden consultar en el apéndice No. 1 de esta tesis.

"Tomando en cuenta que este curso, para la mayoría de los alumnos, representa la última oportunidad dentro de la educación formal para adquirir una cultura científica básica, se considera indispensable incluir los conocimientos fundamentales de química y se opta por un enfoque disciplinario en el que se enfatiza el impacto de la ciencia y la tecnología en la vida actual. Esta relación innovadora entre ciencia, tecnología y sociedad, permite promover en el alumno una ética de responsabilidad individual y social que lo llevará a colaborar en la construcción de una relación armónica entre la sociedad y el ambiente, además de tener el reto de poner en práctica sus conocimientos de química y su capacidad crítica para comprobar la coherencia y viabilidad de sus afirmaciones al confrontarlas con su vida cotidiana".⁴⁰

1.3.3 Tendencias docentes recabadas

La razón de utilizar el CPC en este apartado, es recabar tendencias docentes en la enseñanza sobre la estructura de la materia en el bachillerato universitario— identificar contenidos centrales sobre la enseñanza del tema, dominio conceptual y pedagógico en su tratamiento—, con el objetivo de presentar a través del análisis reflexivo de ellas, una propuesta didáctica para su tratamiento que parta de un enfoque histórico.

Es fundamental aclarar que no es menester en esta tesis ubicar a los profesores participantes en un perfil conceptual determinado, tampoco dar un tratamiento estadístico o cuasiexperimental a las respuestas obtenidas, sería imposible dado el número de profesores participantes. No quiere decir esto, que el estudio realizado carece de significancia, el número de profesores es representativo dentro de un contexto bien situado, es decir, en el marco de la enseñanza de la química en un sólo plantel de la ENP, el plantel No. 1 "Gabino Barreda" y en el de una sola asignatura, el curso de química III. La literatura sobre CPC sustenta que cuando el contexto de un estudio está perfectamente ubicado y no se tiene como propósito generalizar sino proponer una acción didáctica o educativa, una muestra de 3 o cuatro profesores es suficiente—siempre y cuando se lleve a cabo el análisis del instrumento (CoRe) a profundidad—.

Las tendencias encontradas, serán presentadas para cada idea central del instrumento CoRe diseñado. Las respuestas de cada profesor pueden revisarse a detalle en el *apéndice 1* de esta tesis.

A. Ideas y contenidos sobre el concepto "Materia" antes de Dalton

- i. *Importancia del contenido y conocimientos básicos enseñables.* Los profesores entrevistados consideran que es importante mencionar, al menos, un poco de información al respecto a manera de introducción en el estudio de la materia. Todos coinciden que la inclusión de este tema permitirá mostrar el desarrollo de la química como ciencia y actividad humana.

⁴⁰ Planes Oficiales de la ENP, en: <http://dgenp.unam.mx/planesdeestudio/96/quinto/1501.pdf>, 2008

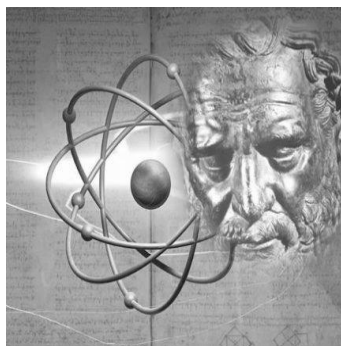


Figura 5. Leucipo (450 a.C.)

En cuanto a los conocimientos básicos enseñables sobre este apartado, el enfoque es diverso en cada caso. Un profesor considera como necesario un breve recorrido histórico a través del discurso resaltando las ideas de Demócrito; otro por su formación en la historia de la disciplina cree adecuado comenzar a introducir al tratar este tema el concepto de ciencia y la importancia de las teorías científica; finalmente el tercer profesor recomienda enfatizar sobre ideas clásicas y los principales postulados que cimentaron a la química como ciencia —entendidos estos—, como los trabajos de Lavoisier y el desarrollo de las leyes ponderales.

- ii. *Importancia y uso de la historia de la química sobre el tema.* Existe coincidencia en que el enfoque histórico representa un recurso útil que abre la pauta a la reflexión de los contenidos químicos. La importancia del uso de la historia queda cubierta en este apartado, ya que posteriormente se convierte en una pregunta repetitiva, no así su uso, el cual, sí reviste especificidades para cada idea central.

En este tema los profesores mencionan el uso del discurso como herramienta fértil en su tratamiento, dos de ellos se refieren al planteamiento de líneas de tiempo y la contrastación de ideas clásicas con hechos científicos. Otro señala la importancia del discurso escrito en la selección de lecturas y elaboración de ensayos biográficos por parte de los estudiantes.

- iii. *Ideas Previas.* Dos profesores hacen mención de ideas previas identificadas al abordar esta idea central, las cuales son, la bien conocida y arraigada noción de continuidad de la materia tan documentada en la literatura, así como el conocimiento de algunos aspectos históricos trascendentes que conocen los estudiantes que pudieran ser usados para contextualizar contenidos, por ejemplo, la revolución francesa con el nacimiento de la química como ciencia.
- iv. *Problemas en la enseñanza y el aprendizaje.* Se menciona que este tema no está en el curriculum y cuando los profesores lo intentan abordar, su poca formación académica al respecto los conduce a pobres resultados, siendo un riesgo el exceso de información sin significado, potenciando el enciclopedismo en la enseñanza. Respecto al aprendizaje dos profesores identifican problemas, siendo los principales, el escaso hábito de lectura por parte de los estudiantes en este nivel de estudios y en ocasiones su aberración por la cultura en general.
- v. *Dimensión sociocultural / impacto tecnológico.* Al respecto se declara el uso de líneas de tiempo y el señalamiento de que la explicación de la materia se daba en el ámbito de la

reflexión e indagación, no en la razón sistémica que permea a la ciencia en la actualidad.

- vi. *Evaluación.* Dos profesores creen necesario evaluar este tema, uno de ellos parece que en general le resta importancia. La evaluación la realizan a través del reporte de lecturas y discusión grupal.

B. El modelo atómico de John Dalton

- i. *Importancia del contenido y conocimientos básicos enseñables.* Existe el consenso en señalar, que este tema es clave en la enseñanza de la química en el bachillerato, ya que constituye el primer modelo para referenciar científicamente a la materia usando el concepto de átomo. Sobre los conocimientos que consideran imprescindibles en su enseñanza se mencionan a los principales postulados de la teoría de Dalton y su relación con las leyes ponderales, así como su incidencia en la caracterización de elementos y compuestos. Un docente en este tema comienza a introducir a sus estudiantes la importancia y utilidad que tiene la noción de modelo para la química y la ciencia en general.
- ii. *Uso de la historia de la química sobre el tema.* Sobre el tema se cita como relevante diferenciar o contrastar las ideas del atomismo clásico con los postulados de la teoría atómica de Dalton. También considerar el señalar las limitaciones de este modelo, así como dar continuidad a las lecturas y ensayos biográficos.
- iii. *Ideas Previas.* Se menciona que la idea de esfera rígida para visualizar el átomo es muy común en los estudiantes, lo cual, no constituye un problema sino una ventaja en el tratamiento de este contenido, para otros modelos subsecuentes, la persistencia de esta visualización si podría representar un problema. Otro docente que contestó esta pregunta, parece centrar su respuesta en el modelo cinético molecular, por lo que no tiene relevancia su respuesta salvo su mención de la acepción de la materia continua.
- iv. *Problemas en el aprendizaje y la enseñanza.* Respecto al aprendizaje se menciona que frecuentemente los estudiantes asimilan acrítica y memorísticamente este modelo. En cuanto a la enseñanza se cita la falta de lecturas de divulgación como herramientas útiles al abordar el contenido, así como el considerar el nivel de abstracción que representa conceptualizar un átomo.
- v. *Dimensión sociocultural / impacto tecnológico.* Las respuestas recabadas son diversas, un docente pide a los estudiantes que contrasten y cuestionen la formulación de Dalton con el entorno tecnológico actual, parece ser a manera de encontrar su vigencia pero también sus limitaciones, otro profesor muestra algunos elementos químicos en su estado natural para constatar su utilidad y relación con el contenido (caracterización visual de los elementos).

Finalmente se sugiere el uso de lecturas que permitan presentar la relevancia histórica de este contenido para la química.

- vi. *Evaluación.* En cuanto la forma de evaluar se habla de reportes de lectura, elaboración de cuestionarios abiertos e instrumentos de opción múltiple.

C. El Modelo Cinético Molecular

- i. *Importancia del contenido y conocimientos básicos enseñables.* Al igual que la idea central anterior, el modelo cinético molecular se considera un tema de primer orden en el curso de química III, la principal razón que sostiene esta afirmación es que el desarrollo conceptual del modelo cinético molecular hace alusión a temas fundamentales del curriculum de química en el bachillerato universitario como es el estudio de los estados de agregación de la materia, sus cambios y la noción corpuscular de los mismos. En cuanto a los contenidos que se declaran como esenciales destacan los mencionados estados de agregación y sus cambios, definición y diferenciación entre átomos y moléculas, así como los postulados básicos o podría decirse resumidos de la teoría cinética molecular.

- ii. *Uso de la historia de la química sobre el tema.* Se reitera la importancia que tiene el uso de lecturas de divulgación dirigidas por preguntas planeadas por el profesorado y la valoración de la modelación en la ciencia.

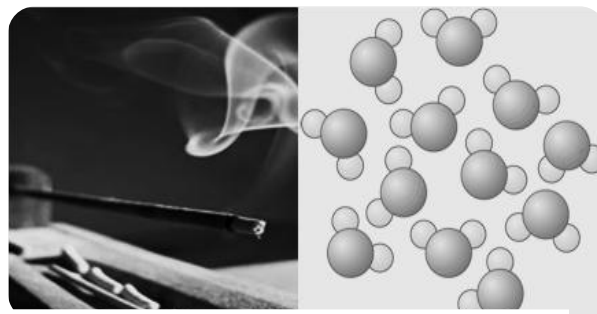


Figura 6. El MCM continúa siendo el soporte conceptual al abordar a la materia en el nivel medio superior

- iii. *Ideas Previas.* En este contenido se hace referencia a una buena cantidad de ideas previas que la literatura de la didáctica de la ciencia ha reportado, por ejemplo, se cita que los alumnos no reconocen a los gases como materia, la no utilización de las ideas corpusculares en toda su extensión, lo que da pauta al uso de acepciones de bajo nivel macroscópico, como que las moléculas tienen color, se expanden y se calientan también se cita la enorme dificultad de comprender y asimilar el espacio vacío entre ellas. Un docente, menciona un hecho interesante, algunos alumnos comienzan a asociar al movimiento de las partículas con la noción de carga eléctrica.
- iv. *Problemas en la enseñanza y el aprendizaje.* Se identifican las siguientes dificultades en el proceso de enseñanza del tema: un modelaje inapropiado o muy convencional, el uso descuidado de analogías que muchas veces genera ideas erróneas en el estudiantado, como es el caso, de que los átomos tienen color o que todas las partículas son esferas

diminutas, así como la falta de estructura en los laboratorios para diseñar actividades experimentales que potencien el interés del alumnado.

En cuanto al aprendizaje se reporta que el lenguaje de la química cuando se trata este contenido pudiese ser un problema agudo de no ser usado de forma conveniente con anterioridad, pues los alumnos suelen confundir términos conceptuales como sustancia, elemento, partícula, molécula, compuesto, etc. Otro factor asociado al aprendizaje es el marcado y abstracto carácter teórico que tiene el MCM, lo que ocasiona un aprendizaje memorístico sobre ellos.

- v. *Dimensión sociocultural / impacto tecnológico.* Las respuestas obtenidas en este apartado son diversas, un profesor menciona la importancia que tiene para la vida cotidiana la comprensión de la naturaleza de los cambios de estado, otro invita a vincular este contenido con la exacerbada contaminación atmosférica que padecemos actualmente en las grandes ciudades y la noción del olfato para explicar a los gases. Finalmente un docente cubre este apartado con un modelaje adecuado de las moléculas.
- vi. *Evaluación.* Los profesores entrevistados evalúan este contenido a través de exposiciones e instrumentos con preguntas cerradas y abiertas, estas últimas orientadas en la explicación de fenómenos cotidianos.

D. Espectro electromagnético/modelo atómico de Bohr

Son muy interesantes las tendencias registradas sobre esta idea central, ya que el programa de estudios le otorga cierta relevancia a estos contenidos, sin embargo, parece ser que en la práctica real, los docentes le restan atención. Esta aseveración se sostiene por el hecho de encontrar ambigüedades en las respuestas obtenidas.

- i. *Importancia del contenido y conocimientos básicos enseñables.* Los docentes entrevistados declaran que el modelo atómico de Bohr es importante, como contenido secuencial que permita presentar a los estudiantes la evolución de la teoría atómica. Cuestión interesante es, que a pesar que el plan de estudios presenta como relacionados el espectro electromagnético con el modelo atómico de Bohr, los docentes entrevistados no reconocen esta conexión. Solamente un docente identifica la relación e importancia que guardan ambos contenidos.

Referente a lo que se considera básico por enseñar al respecto, se menciona la necesidad de introducir o mencionar algunos contenidos cuánticos en su abordaje, tal es el caso de la ecuación de Planck y el trabajo de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico. Se menciona enfáticamente presentar el modelo de Bohr como referente de una secuenciación histórica que parta desde los primeros modelos atómicos del siglo XX (Thompson y Rutherford) y que culmine con el modelo actual, resaltando el descubrimiento y características de las partículas atómicas elementales: electrón, protón y neutrón.

En esta parte del CoRe aparece una ambigüedad que es importante resaltar, un docente considera poco adecuado el tratamiento del espectro electromagnético en el bachillerato y posteriormente reivindica como conocimientos fundamentales a enseñar la relación frecuencia (ν) – longitud de onda (λ), los espectros de absorción/emisión y la teoría clásica ondulatoria. La confusión en este apartado debió ser aclarada con el docente pero fue imposible obtener una segunda resolución del instrumento. Sin embargo, en la siguiente idea central referente al átomo de Schrödinger este tipo de contradicciones fue una constante.

ii. Uso de la historia de la química sobre el tema. Es consensuada la opinión de que este contenido debe ser enmarcado dentro de una secuenciación que muestre el desarrollo y cambio de paradigmas en las teorías científicas, haciendo hincapié en la importancia que tiene el desarrollo de comunidades científicas en el desarrollo tecnológico-disciplinar, así como la inconmensurabilidad en el devenir científico.

iii. Ideas previas. Son dos ideas previas las que se identifican, por una parte conceptos clásicos propios de los cursos de físicas que antecedieron a los alumnos en la explicación de la naturaleza de la luz tal es el caso de la reflexión y difracción de luz, las cuales se considera que lejos de ser un problema pueden ayudar a complementar la explicación. La segunda idea alternativa corresponde a la tendencia de los estudiantes de entremezclar conceptual y lingüísticamente los conceptos de órbitas y orbitales, llegando a asociar a las órbitas de Bohr las letras s, p y d, las cuales, solo tienen sentido al caracterizar orbitales.

iv. Problemas en la enseñanza y el aprendizaje. En ambos casos se menciona que el nivel de abstracción y complejidad que revisten estos contenidos trastoca su tratamiento didáctico. Para responder esta problemática desde el terreno de la enseñanza se sugiere la mediación discursiva a través del uso de buenas analogías y una presentación adecuada del modelo. Con respecto al aprendizaje se menciona una dificultad muy marcada por los alumnos para comprender la conexión que existe entre el espectro electromagnético y el modelo de Bohr, así como la asociación del modelo Bohr como imagen real o literal de los átomos.

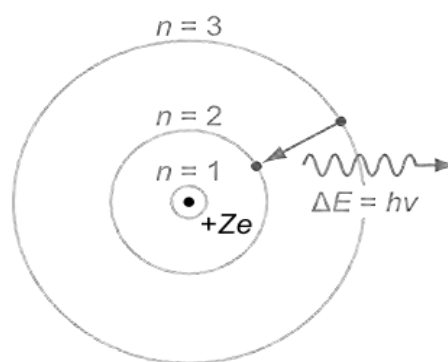


Figura 7. El modelo atómico de Bohr es referenciado superficialmente en la química del bachillerato.

- v. *Dimensión sociocultural/impacto tecnológico.* Generalmente se relaciona a estos contenidos con hechos cotidianos y fenómenos tecnológicos de interés para los estudiantes como la explicación de la luz emitida por los fuegos artificiales, la generación de energía a través de celdas fotoeléctricas, la aplicación que tienen los rayos X en la medicina y la investigación científica.
- vi. *Evaluación.* Instrumentos de opción múltiple y problemas. La realización de una actividad experimental como el color de ciertas sales al ser expuestas a una flama. La argumentación de ventajas y desventajas y su papel evolutivo en la actual teoría atómica.

E. Modelo atómico de Schrödinger/orbitales atómicos

En este apartado subyace una contradicción de importante repercusión en este análisis, dos de los profesores entrevistados consideraban pertinente culminar la secuenciación histórica de los diferentes modelos atómicos del siglo XX con el modelo vigente, es decir, con el modelo de Schrödinger, recomiendan solo referenciarlo y no abordarlo. No se argumenta a detalle el porqué de este posicionamiento, la razón principal parece ser la complejidad que reviste este contenido. Este freno repentino sobre el tratamiento del modelo atómico actual, es la razón que nos hace constatar lo que reporta la literatura al respecto, la enseñanza de la estructura de la materia en el nivel medio superior se agota en el modelo cinético molecular, no obstante que el programa de estudios sugiera abordar algunos contenidos cuánticos que emergieron en la primera mitad del siglo XX.

Se cuenta solamente con las respuestas de un profesor que de manera consciente hace alusión a las dificultades didácticas que representa el tratamiento de este tema. Él cree conveniente promover la formación docente sobre los mismos. Desafortunadamente no se obtuvieron tendencias docentes claras sobre este contenido.

1.3.4 Conclusiones

A través del diseño y uso del instrumento de representación del contenido (CoRe) se pudieron recabar aspectos importantes del CPC de tres profesores de química del bachillerato universitario sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje de la estructura de la materia en el curso de química III del actual programa de la ENP. Se identificó su opinión sobre contenidos centrales presentes en el curriculum sobre esta temática, así como limitaciones y dificultades en su tratamiento. También se obtuvieron actividades y estrategias didácticas que utilizan en su praxis educativa.

Explorar el CPC del profesorado es una tarea ardua y compleja dada la gran diversidad de respuestas que se pueden capturar sobre contenidos disciplinares específicos. Es claro que cada profesor sigue una estrategia distinta para abordar un mismo tema esto en gran medida debido al sentido humano propio de la docencia, la forma en que un profesor trata un tema

depende en gran medida de su experiencia, formación, habilidad de interpretación, cultura y el contexto que sitúa su accionar. Los aspectos más sobresalientes encontrados en este análisis se presentan a continuación:

- ❖ *Uso de la historia de la química como recurso educativo.* Los docentes entrevistados coinciden que la historia es una herramienta útil y fértil en la enseñanza de la química, sin embargo, advierten de ciertos peligros en su uso, el primero de ellos es la escasa formación de los docentes sobre la historia de la química, ya que como recurso pedagógico ha cobrado relevancia hace un par de décadas. El segundo peligro mencionado, que bien puede ser consecuencia del primero, es potenciar el enciclopedismo en el aula e introducir una visión simplista e inadecuada de la historia centrando la atención en el aprendizaje de fechas y hechos factuales. El uso de la historia como una estrategia de aprendizaje requiere entonces primero su conocimiento, segundo su reflexión, para que el docente pueda explicitar puntos de vista sobre la construcción del conocimiento químico y con ello mejorar su interpretación.
- ❖ *Contenidos centrales en la enseñanza de los nanosistemas.* Los tres docentes consideran importante referenciar aspectos históricos de la materia, en específico reseñar las ideas centrales de los atomistas griegos presocráticos y contestarlas con trabajos científicos disciplinares como el modelo de Dalton. Existe consenso en aseverar que los temas relevantes relacionados con la estructura de la materia en el curriculum de química III son el modelo de Dalton y el MCM en el estudio de los gases. Los contenidos de naturaleza cuántica como el modelo atómico de Bohr y Schrödinger deben mencionarse o referenciarse pero no abordarse con formalidad.
- ❖ *Estrategias didácticas.* En cuanto al tratamiento didáctico de los temas se menciona el uso del discurso y elaboración de adecuadas analogías en la explicación de los temas, el trabajo en pequeños grupos, promover la discusión en clase, diseñar experimentos plausibles, el correcto uso de modelos, vincular contenidos con el entorno tecnológico y contar con instrumentos diversificados de evaluación (preguntas abiertas y cerradas). Se capturaron una gama de estrategias en el tratamiento de los nanosistemas.

Finalmente, en cuanto al tema central, la enseñanza de la estructura de la materia en el bachillerato universitario, se pudo constatar que su tratamiento en la mayoría de los casos está inscrito dentro de lo que muchos autores denominan la química macroscópica cuantitativa, la química de composición molar/molecular según la categorización histórica hecha por Jensen⁴¹ hace algunos años.

⁴¹ Jensen, W., "One Chemical Revolution of Three?", *Journal of Chemical Education*, Vol. 75, No.8, 961-969, 1998

Este posicionamiento tiene su origen en las terribles dificultades que para los estudiantes representa conectar el mundo macroscópico con la modelación química microscópica. Es un hecho, que para la mayoría de los profesores de nivel medio constituye un desafío abordar la naturaleza corpuscular de la materia con modelos sencillos como el de Dalton, por lo que, sugerir trabajar sobre contenidos cuánticos en el bachillerato es calificado por muchos especialistas como un absurdo. Sin embargo, sostenemos que este problema didáctico es añejo y debe ser afrontado en éste y otros trabajos educativos actuales, de lo contrario consideramos que se agudiza el hecho al que hace referencia la multicitada analogía de los congresos de didáctica de la ciencia: *enseñar ciencia (química) del siglo XIX a estudiantes del siglo XXI*. Un posicionamiento sin duda poco progresista.

1.4 Bibliografía

Aliseda, A., "*Heurística, hipótesis y demostración matemática*", Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencia y Humanidades, UNAM, 2000

Garriz A. y Trinidad, R. "El conocimiento pedagógico del contenido", *Educación Química*, vol. 15 (2), pp. 98-102, 2004

Garriz, A. y Trinidad, R., "El conocimiento pedagógico de la estructura corpuscular de la materia", *Educación Química*, vol.17, No. extra, pp. 114-141, 2006

Gess-Newsome, J, y Lederman, N. G., "Examining Pedagogical Content Knowledge. The Construct and its Implications for Science Education", Dordrecht, The Netherlands, *Kluwer Academic Publishers*, xii + 306 pp, 1999

Groosman, P., "*The making of a teacher: Teacher Knowledge and teacher education*", New York: Teachers College Press, 1990

Izquierdo, M., "¿Cómo contribuye la historia de las ciencias en las actitudes del alumnado hacia el aprendizaje de las ciencias?", *Aula de innovación educativa*, No. 27, 1994

Jensen, W., "One Chemical Revolución of Three?", *Journal of Chemical Education*, Vol. 75, No.8, pp. 961-969, 1998

Loughran, J., Mulhall, P. y Berry, A., "In Search of Pedagogical Content Knowledge in Science: Developing Ways of Articulating and Documenting Professional Practice", *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 41(4), 370–391, 2004

Quintanilla, M., Luigi, F y Camacho, J. *Aportes de la historia de la química a una didáctica de la teoría atómica en libros de texto*, Universidad Católica de Chile, 2006

Shulman, L. S. y Sykes, G. "*A national board for teaching? In search of a bold standard: A report for the task force on teaching as a Profession*". New York: Carnegie Corporation, 1986

Shulman, L. S., "Knowledge and Teaching: Foundations of the New Reform", *Harvard Educational Review*, vol. 57(1), 1-22, 1987

Schwab, J. J., *Science, curriculum and liberal education*, Chicago, University of Chicago Press, 1978

Solbes, J. y Traver, M.J., “La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química”, *enseñanza de las ciencias*, vol. 14 (1), 1996

Solbes, J. y Sinarcas, V., “Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica”, *Didáctica de las ciencias sociales y experimentales*, No. 23, pp. 123-151, 2009

Talanquer, V., “¿Qué conocimientos distingue a los buenos maestros de química?”, *Educación Química*, Vol. 15 (1), pp. 60-66, 2004

Tovar, J., “El mapa conceptual como instrumento para la autoevaluación conceptual en química”, *revista iberoamericana de educación*, Bogotá, 2004

Van Driel, J., Veerloop, N., y De Vos, W., “ Developing Science Teachers Pedagogical Content Knowledge”, *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 35 (6), pp. 673-695, 1998

Velázquez, P., *El conocimiento pedagógico de la biotecnología: Repertorios de experiencia profesional y pedagógica de dos profesoras, una del nivel medio superior y otra del superior*, Tesis-MADEMS, Facultad de Química, UNAM, 2008

CAPÍTULO II CONCEPCIONES CLÁSICAS DE LA MATERIA

2.0 Al lector

En el inicio de este capítulo se presenta como punto de partida del estudio histórico de la materia, un breve resumen sobre algunas ideas clásicas. En específico, se citan algunas ideas de los filósofos griegos presocráticos–naturalistas y atomistas–, así como del pensamiento aristotélico. A esta sección de apertura se le ha denominado dimensión histórica y será utilizada en capítulos posteriores. La segunda parte de este apartado la constituye la dimensión didáctica. Concretamente en este apartado se trabaja el discurso (legado educativo del período clásico), que permite establecer analogías, metáforas e incluso alegorías en el proceso de enseñanza aprendizaje de la química.

2.1 Dimensión Histórica: El pensamiento clásico de la materia

2.1.1 Presocráticos (600-300 a.C.)

Los primeros registros históricos que se pueden rastrear para estudiar la naturaleza de la materia nos remota a los filósofos naturalistas en la Grecia Jónica 600 a.C. Se conoce muy poco de sus intentos por establecer una antología, es decir una descripción puntual de la materia, sin embargo se sabe que diversos pensadores afirmaban que la materia tenía su esencia en alguna sustancia significativa para la vida. Por ejemplo, se narra que para Tales de Mileto (624-546 a. C.) la esencia de la materia era el agua, para Anaximandro (588-525 a.C.) el aire y para Heráclito (500 a. C.) el fuego. Años más tarde por el 440 a. C. Empédocles de Sicilia, propuso un sistema más sofisticado que es el que se conoce como el de los cuatro elementos. Donde tierra, agua, aire y fuego eran necesarios para formar la materia. Paralelamente otra corriente filosófica proponía la existencia de átomos, cuerpos indivisibles y eternos que conformaban y explicaban la naturaleza de todo lo existente.

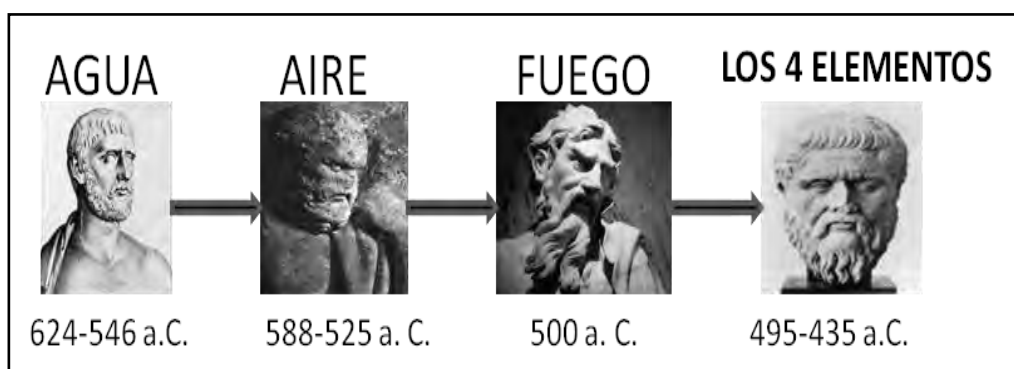


Figura 1. Los filósofos naturalistas griegos adoptaron principios fundamentales para explicar la constitución de todo lo existente.

El Atomismo Clásico de “Leucipo y Demócrito”

De Leucipo se conoce muy poco, se afirma que fue un filósofo griego presocrático y el gran maestro de Demócrito, a quien se atribuye formalmente la fundación de la corriente pensadora del atomismo clásico. Escribió sus obras al respecto se calcula cerca del año 480 a.C. contemporáneo de Anáxagoras y Empédocles. Como pensador presocrático sus trabajos revisten una intención fundamental: la comprensión de la esencia o naturaleza de la realidad física. Las fuentes de este pensador han sido muy cuestionadas a tal punto, que incluso su propia existencia física se ha puesto en duda por algunos críticos modernos.¹ Sin embargo, en la actualidad aún es considerado el padre del atomismo, pues así lo referenció Aristóteles en muchos de sus escritos. Algunas ideas que se difunden como suyas sobre la naturaleza de los cuerpos, son las siguientes:

“El universo se resuelve en una infinitud de partículas, pero todas ellas son de la misma naturaleza, todas ellas son indivisibles, inmutables y eternas (...) tanto los átomos como el vacío son infinitos: los átomos en número, el vacío en extensión.”²

Leucipo trata de salvaguardar la pluralidad de las cosas y su unidad reconociendo que todos los cuerpos existentes están hechos por partículas infinitamente pequeñas, diversas e indivisibles, las cuales, revisten propiedades interesantes: son inmutables y eternas. La percepción de estas propiedades escapa al nivel de sensibilidad humana y a toda relación geométrica, ya que son trozos cuyo número puede ser infinito en el universo pero limitado en un cuerpo o material. A grandes rasgos Leucipo intentó formular una respuesta que explicara la naturaleza la materia sin suprimir las ideas que se tenían sobre la generación y el movimiento descrito por los naturalistas jónicos años atrás.³ Se creó que la idea general de los átomos por Leucipo, surgió de la inserción de éste en un arduo debate determinado históricamente por eleatas y pitagóricos. Sus ideas sobre los átomos proporcionaban una explicación simple del problema de lo uno y lo múltiple, ya que la existencia de partículas últimas proporcionaba la unidad requerida para el pensamiento racional y al mismo tiempo permitía una multiplicidad infinita en la descripción de los cuerpos. Se le atribuye también a Leucipo la noción del vacío como el medio necesario para el movimiento de los átomos.

Se narra que Leucipo planteó ideas generales, mientras que su discípulo Demócrito de Abdera (460-370 a. C.) las profundizó, caracterizando a los átomos en los procesos de división y movimiento, así como su presencia en el vacío. Y lo hizo de tal forma que fue considerado uno de los pensadores griegos más sabios y eruditos de su época. Aristóteles refiriéndose a Demócrito sostenía: “Parece haber meditado sobre todas las cosas, y nadie antes que él había hablado del crecimiento y del movimiento más que de una forma superficial”⁴.

¹ Rhode, E., *Jahrbuch für Klass. Philol.*, CXXIII, p. 742 y A. Brieger, *Hermes*, XXXVI, 1928, p.166

² Ruiz, J.M., *Leucipo y Demócrito: Fragmentos*, Aguilar, Buenos Aires, Argentina, 1970. P. 16

³ *Ibid.* p. 26

⁴ Bolzán, J.E., *Física, Química y Filosofía Natural en Aristóteles*, Eunza, Navarra, 2005

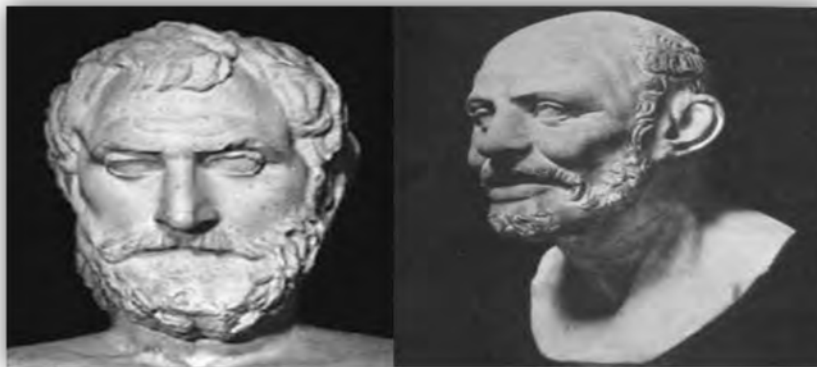


Figura 2. Leucipo y Demócrito (460-370 a.C.)

Demócrito sustentaba sus ideas atómicas en el movimiento, es decir, en la relación espacio-tiempo, siendo el primer pensador presocrático en abordar tal relación. Con Demócrito el atomismo dejó de ser una cuestión lógica para convertirse en un dilema físico, que pronto fue cobijado por la ciencia matemática-geométrica ya existente. Desde esa época la idea sobre lo más infinitamente pequeño estaba descrito por el entendimiento de círculos y circunferencias, no es extraño entonces que fuera la figura más esclarecida para el atomismo griego⁵. Los átomos estarían dotados de un movimiento eterno en el vacío, el cual se daría de forma desordenada, como un texto de Cicerón lo señala:

“Sostiene Demócrito que los átomos, como él los denomina, esto es, cuerpos indivisibles a causa de su solidez, se hallan en el vacío infinito en el cual no hay ni alto ni bajo ni centro ni extremos, y se mueven de un modo tal que se encuentran y se unen entre sí, produciendo de ese modo todas las cosas que son y que nosotros vemos. Afirma, además, que debe pensarse que este movimiento de los átomos no tiene principio alguno, sino que se produce eternamente”⁶

Además de moverse eternamente Demócrito les asocia tres cualidades: ritmo (*rhythmós*), contacto (*diathigê*) y dirección (*tropê*). Posteriormente Aristóteles en su metafísica, tradujo el ritmo como su forma, el contacto como su orden y la dirección como su posición. Siendo tales cualidades las responsables de la pluralidad de lo existente.

Según esta visión los átomos se mueven eternamente representando el ser y el vacío el no ser; pero el vacío era tan real como los átomos para estos pensadores, prueba de ello la siguiente cita:

“Por convención es lo dulce, por convención lo amargo, por convención lo caliente, por convención lo frío, por convención el color, pero en realidad solo existen los átomos y el vacío”.⁷

⁵ Castro, I.,Hernandez, J., “Didáctica arquimediana”, *Memorias XV encuentro de Geometría y III de Aritmetica (ERM)*, Colombia, 2002

⁶ Bueno, G., *Metafísica presocrática*, Pentalfa, Oviedo, capítulo V, pp. 327-373, 1974, p.352

⁷Vera, F., *Científicos Griegos*, Aguilar, Madrid, 1970 pp. 188-189

La existencia de lo sensible no responde a una verdad sino a la opinión o el albedrío, la existencia de los átomos y el vacío era una realidad inobjetable, un conocimiento autentico para estos pensadores. Las ideas de Leucipo y sobre todo las de Demócrito, suscitaron el rechazo de prestigiosos y poderosos filósofos de esa época, tal es el caso de Platón (428-347 a.C.) discípulo de Sócrates (470-399 a.C.) y maestro de Aristóteles (384-322 a.C.), que defendía a ultranza la teoría de los cuatro elementos de Empédocles. El motivo de este agudo rechazo es que el atomismo clásico como sistema filosófico representaba un nihilismo muy radical con respecto a las ideas hegemónicas de la época, ya que declaraba engañoso y negativo no solamente a los dioses, sino también al firmamento y al paisaje del hombre⁸. El atomismo intentaba destruir el mundo de lo sensible, de las apariencias, demostrando así que el mundo llamado real era precisamente un sistema abstracto.



Figura 3. "La separación del átomo". Fundación Gala - Salvador Dalí.

Algunas fuentes citan que Platón ordenó quemar toda la obra de Demócrito, la cual superaba los 60 volúmenes agrupados en varias disciplinas como física, matemáticas y filología, pero sus colegas pitagóricos lo disuadieron. Cuando Julio Cesar entro a Alejandría en el siglo I y se consolidaba el imperio romano, los historiadores mencionan que importantes textos desaparecieron producto de un incendio provocado en la biblioteca, entre ellos casi la totalidad de la obra de Demócrito de Abdera. Es a través de los textos de Aristóteles, Epicuro (341-270 a.C.) y el poema de "De Rerum Natura", escrito por Lucrecio 50 años antes del advenimiento de nuestra era como se ha reconstruido su pensamiento. El *De Rerum Natura*, es un vasto poema dividido en seis libros, una de las obras cumbre de la literatura latina. En este poema se expone ampliamente el atomismo de Epicuro, como se muestra en la siguiente cita:

⁸ Bueno, G., *Metafísica presocrática*, cit., p.337

Porque seguramente la materia, no es una masa inmóvil, pues que vemos disminuirse en un cuerpo, (...) todos lo vemos y nos es muy claro: No obstante, estos corpúsculos lucientes, que el Sol nos manda, por vacío espacio no atraviesan; su marcha se retarda dividiendo los fluidos del aire (...): Son sólidos y simples los átomos que cruzan el vacío sin peligro de obstáculos externo, forman ellos un solo y mismo todo...⁹

2.1.2 Los Cuatro Elementos y el Éter. “Aristóteles” (300 a. C.)

Aristóteles es un referente obligado en el estudio histórico y conceptual de la materia. Es considerado uno de los máximos exponentes del pensamiento griego, se le ubica como un griego moderno (384 a.c - 322 a.c) y se sostiene que fue discípulo de Platón. En sus escritos, él defiende la acepción física pluralista de su maestro sosteniendo que todo lo que existe en la tierra es producto de la interacción de cuatro elementos esenciales: fuego, agua, tierra y aire.

“Puesto que en todas las cosas el conocimiento procede de aquellos que es primero, y los elementos son los constituyentes primarios [inmanentes] de los cuerpos (...) Definiremos como elemento de los cuerpos aquello en lo cual se resuelven otros cuerpos, que está presente en estos, sea en potencia, sea en acto, y que no se deja descomponer en partes específicamente diferentes de él mismo. Esto es lo que, sobre poco más o menos, todos entienden por elemento”.¹⁰

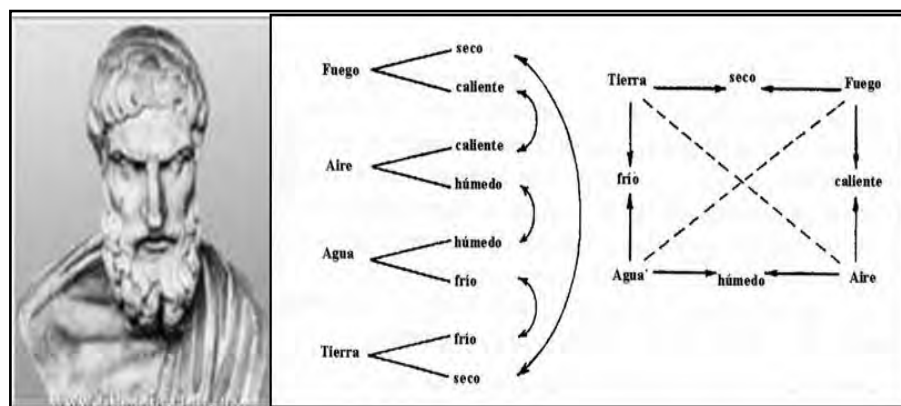


Figura 4. Ciclo de transformabilidad de los elementos según Aristóteles.¹¹

Esta es la definición clásica de elemento, en estas líneas se puede encontrar dos aseveraciones importantes. La primera de ellas es la afirmación que los elementos son los entes que explican la esencia de la naturaleza, sin embargo su estado es confuso en potencia o en acto, según Aristóteles la “potencia” es la razón de cada cuerpo, es decir, las numerosas formas que puede adoptar la materia y el “acto” es su génesis una energía o espíritu primigenio. El segundo punto importante es una oposición férrea a las ideas sostenidas por los atomistas (y que no se deja descomponer en partes específicamente diferentes de él mismo). Aristóteles refuta la explicación atómica a través de una relación que califica como errónea entre pitagóricos y atomistas:

⁹ <http://www.cervantesvirtual.com/>

¹⁰ Bolzán, J.E., *Física, Química y Filosofía Natural en Aristóteles*, cit., p. 25

¹¹ *Ibid.* p.145

“Pero existen además las afirmaciones de otros, como Leucipo y Demócrito de Abdera, cuyas consecuencias tampoco son razonables. Según éstos, las magnitudes primarias son infinitas en número e indivisibles en magnitud; lo múltiple no se genera a partir de lo uno ni lo uno a partir de lo múltiple, sino que todas las cosas lo hacen por entrelazamiento y dispersión de aquellas. En cierto modo también ellos reducen todos los entes a números y los constituyen según números; y si bien no lo dicen explícitamente, eso es lo que vienen a sostener”.¹²

El pensador clásico fundador de la lógica sostenía que “los pitagóricos hacían de las cosas números, y los atomistas de los números cosas”.¹³ De esta manera descalificaba la explicación atomistas para resolver el problema de la generación a través de pequeñas entidades matemáticas indivisibles cuya simple adición da lugar a los cuerpos. A cambio de ello desarrolla una teoría de la continuidad basada en cualidades asociadas a los antiguos elementos, por ejemplo, el aire lo asociaba con lo húmedo y el fuego con lo seco, más aún este retrato explicaba la disposición física de los elementos, así el elemento más pesado se pensaba era la tierra y por ello era el centro del universo, le seguía el agua por ende su localización sobre la tierra, posteriormente al aire y el más ligero el fuego que tendía hacia el cielo. En el marco de esta teoría, la combustión se explicaba como la salida del elemento fuego cuya tendencia natural era la de ascender, concediendo la ceniza a la tierra.

“Debemos considerar como primer principio a la materia, que no existe separadamente (...) Así, principio es, en primer lugar, aquello que es en potencia un cuerpo sensible: fuego, agua, tierra, aire y sus operaciones. No obstante de ser cuatro los elementos, cada uno queda caracterizado por una cualidad propia: la tierra más bien por lo seco que por lo frío; el agua más bien por lo frío que por lo húmedo; el aire más bien por lo húmedo que por lo cálido; el fuego más bien por lo cálido que por lo seco”.¹⁴

Es también muy interesante resaltar una idea central que este pensador heredó al periodo alquímico que le precedería, la idea de la transmutación de la materia a través del control de operaciones elementales gobernadas por la naturaleza y que los alquimistas posteriormente trataron de hacer manipulables.

“Es evidente que todos ellos son[los elementos], por naturaleza, transformables unos en otros: toda generación se produce desde y hacia contrarios, y todos encierran recíproca contrariedad, dado que poseen cualidades contrarias(...)lo cálido en acto es frío en potencia, y lo frío en acto es cálido en potencia; y se transforman uno en otro excepto que sean iguales(...) Así es como se transforman primero los elementos; y a partir de éstos se genera la carne, los huesos y semejantes(...)”¹⁵

Nótese la gran familiaridad existente entre la acepción de transformación elemental provista por Aristóteles con el concepto actual de cambio químico, es decir la idea de que al combinarse dos sustancias o materiales estos pierden sus propiedades originales y forman

¹² ibíd. p. 30

¹³ Ibíd. p.31

¹⁴ Ibid. pp.139-140

¹⁵ Jaeger, W., *Aristóteles*. Traducción de J. Gaos, FCE, México, 1957, p. 92

materia nueva y diferenciada. Aristóteles introdujo también el estudio de un quinto elemento llamado éter, el cual estaba presente en el cosmos. Posteriormente los alquimistas sustituyeron la noción elemental con el adjetivo de esencia, siendo la quinta esencia una de las alegorías más representativas del período alquímico.

2.1.3 El período alquímico

Los orígenes de la alquimia son muy oscuros y difíciles de precisar, a pesar de ello, la mayor parte de los textos históricos coinciden en que floreció en oriente y occidente varios siglos antes de nuestra era. Se narra que es en el Egipto grecorromano cuando esta actividad se consolidó, pues así lo indican “los papiros de Leiden”, que datan del siglo III d.C localizados en la ciudad de Tebas¹⁶. Es a la culta civilización árabe a quien se debe la conservación, el estudio y la difusión de la “*al-kimiya*”¹⁷ o “*arte sagrado*” como ellos mismos le denominaron, la tradición alquímica árabe se desarrolla sin interrupción hasta el siglo XIII y se extiende por el occidente conquistado, principalmente por España. Durante sus primeros años en Europa la alquimia es ferozmente sofocada por la iglesia cristiana, paradójicamente tiempo más tarde fue reivindicada como propia por esta polémica institución.

La alquimia se caracterizó desde sus orígenes por ser un arte místico sólo posible de comprender y practicar por verdaderos sabios o eruditos de su época, pues este saber se configuraba por auténticas disciplinas de vanguardia, tal es el caso de la filosofía naturalista aristotélica, las complejas técnicas procedimentales egipcias, los avances astronómicos de los antiguos babilónicos y la metafísica religiosa. Los alquimistas persiguieron por siglos la conservación de la vida eterna, la fabricación de oro a partir de materiales comunes, pero principalmente la armonía espiritual a través de la perfección humana, razones que hacen pensar a algunos historiadores que la alquimia es la historia de un error¹⁸.

Se debe a la alquimia árabe el diseño y perfeccionamiento de importantes técnicas experimentales vigentes tales como la destilación, la filtración, la calcinación y la extracción

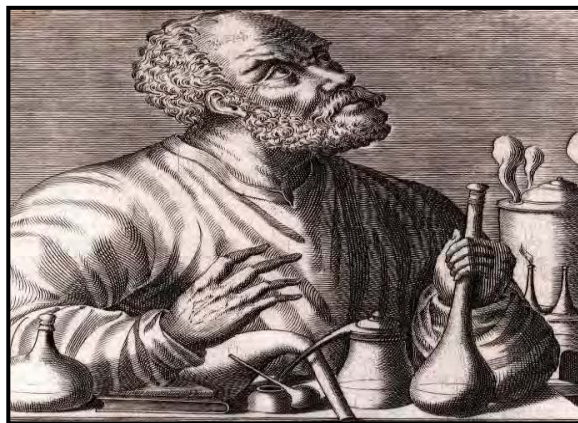


Figura 5 .Grabado de Jabir ibn Hayyan o Geber (s. VIII) como se le conoció en occidente.

¹⁶ Marshall, P, *La piedra filosofal*, Grijalbo, Barcelona, 2001. p. 263

¹⁷ Op. cit., p. 262

¹⁸ Tirso, C., *Alquimia ciencia o ficción*, Homenaje- UNAM, 2001. p. 18

Uno de los aspectos más destacados de esta etapa es el uso de un discurso alegórico más cercano a la poesía que a una disciplina científica. A través de la alegoría se transmitía y perpetuaba el conocimiento alquímico, en esta retórica el mensaje principal permanecía oculto y representado por algún otro asunto con el cual tenía cierta semejanza.¹⁹ Los textos alquímicos son ejemplo de misterio y erudición, anqué hay autores que sostienen que este proceder hermético en realidad era una máscara que encubría, la imposibilidad de sus fines.

Lo cierto es que a pesar de su naturaleza mística, como actividad intelectual, la alquimia perduró por más de un milenio originando técnicas muy sofisticadas en el tratamiento y manipulación de diversos materiales, ese agudo afán experimental, así como un proceder articulado y racional para sustentarlo, son las raíces más antiguas rastreadas del actual cuerpo disciplinar denominado como química (aunque vale citar que tal reconocimiento se debe solamente a unos cuantos años)



Figura 6. Lámina alegórica del *Musaeum hermeticum* (1678)²⁰.

¹⁹ Terry, M.S, "hermenéutica: interpretación de las alegorías" en: <http://www.seminarioabierto.com/hermeneutica12.htm>

²⁰ Los "siete metales" alquímicos, aparecen representados en el interior de la tierra, en la que se engendran, pero en el cielo están asociados al sol y a la luna. En las cuatro esquinas de la lámina hay alegorías de los cuatro elementos y las figuras centrales llevan en las manos un triángulo con el vértice hacia arriba –símbolo de los elementos que se mueven hacia arriba: fuego y aire– otro con el vértice hacia abajo –símbolo de los que lo hacen hacia abajo: tierra y agua– y la unión de ambos triángulos es el símbolo del universo, en el que todos los elementos se combinan.

2.2. Dimensión didáctica: “El discurso como recurso pedagógico”

2.2.1. Reflexiones Docentes

¿Por qué abordar a los griegos en la enseñanza de la química en el siglo XXI?

En los cursos tradicionales de química se suele omitir a los estudiantes el legado que le debe la ciencia y la civilización occidental al pensamiento clásico griego. Dado que este trabajo tiene como menester dimensionar la relevancia del uso de la historia en la enseñanza de la química, a continuación se citan tres razones que tiene la intención de invitar al profesorado a referenciar algunas ideas clásicas sobre la constitución de la materia.

Porque son universales. Los griegos a través de su lucida deducción lógica, abordaron la mayoría de los problemas posibles a los que se enfrenta el género humano, abordaron temas psicológicos, sociales, técnicos, filosóficos, artísticos y por supuesto naturales. Fue la primera civilización que reveló como clasificar, diagnosticar, generalizar, cuestionar y convencer articulada y racionalmente diversos fenómenos presentes en la naturaleza. Didácticamente, resulta muy útil referenciar a los clásicos ya que son ellos los creadores del conocimiento sistematizado, y en consecuencia son los más indicados para enraizar y mostrar el desarrollo del conocimiento.

Por su legado lingüístico. Actualmente en el lenguaje científico se usa un gran número de palabras de connotación abstracta que nos remiten a sus raíces grecolatinas y sus precedentes clásicos²¹. Por citar algunas: materia, átomo, energía, electrón, protón, oro, plata, azufre etc. El hecho de que el griego y el latín fueran las lenguas cultas empleadas en occidente durante muchos siglos como vehículo de comunicación del conocimiento es una de las causas de este legado, además el discurso y sus figuras como la analogía y la metáfora de las que se vale el discurso científico escolar son herencia de esta magna civilización.

Por sus fines e ideales educativos. Sus extensos tratados filosóficos y naturales pareciera que siempre guardaban una relación con la educación de sus ciudadanos, sobre todo en la formación de la clase aristócrata. Grandes ideales educativos heredaron los griegos al pensamiento occidental, los cuales no pierden vigencia, por citar un ejemplo hoy en día los pedagogos constructivistas referencian a la educación cimentada en virtudes como un paradigma educativo deseable. La virtud que puede ser definida como una propiedad disposicional que la persona puede adquirir, y que la capacita para hacer bien una cierta actividad²², teniendo siempre como fin o meta principal la búsqueda del bien común.

²¹ Picó, F., "Razón y Pasión en la Invención de Grecia", *Amauta, Revista Digital de la Universidad de Puerto Rico en Arecibo*, Volumen No. 5, 2008

²² Beuchot, M. y Arriarán, S., *Virtudes valores y educación moral*, UPN, México, 1999. p. 11

2.2.2 El discurso: Una herramienta imprescindible en la enseñanza de la química

El discurso construye los conocimientos, establece los roles sociales de los participantes y elabora una cierta versión sobre el mundo en cada contexto de interacción social. *Stephen Toulmin*²³.

La educación es un proceso público de negociación y creación cultural cimentado en el discurso. Los griegos conocían bien la importancia educativa que representa el discurso, es a ellos a quien se debe la fundación del aclamado arte de la retórica a través de apasionantes discursos que los historiadores citan como una verdadera búsqueda de la razón y el convencimiento. Por ende no es extraño que el filósofo Sócrates (470-399 a.C.) sea el arquetipo obligado para estudiar el quehacer dialógico en el campo educativo.

En la actualidad en la práctica docente se da mucha importancia al carácter acumulativo del currículo, se centra la atención en la cantidad de conocimientos que se deben enseñar y se traslada a segundo plano el carácter didáctico del “cómo” se enseña y consecuentemente cómo se aprende. Este posicionamiento se ve reflejado por un proceder acrítico por parte de los docentes al transmitir el conocimiento científico. A través de la enseñanza tradicional la ciencia es presentada como un conjunto de hechos incuestionables a través de una exposición magistral de los contenidos, eliminando cualquier naturaleza histórica de los mismos y reduciendo al mínimo la participación del alumnado en el proceso de aprendizaje. Razón por lo cual, es común, reconocer en las instituciones académicas del bachillerato universitario cierta renuencia, pasividad y hasta rechazo por parte de los estudiantes a las asignaturas de corte científico, la química junto a la física y las matemáticas son sinónimo de horror para los adolescentes. La comprensión real de estas disciplinas en este nivel es mínima, al grado de ser una misión imposible para los jóvenes articular de forma coherente el significado de un contenido. En relación con esta problemática existe una vasta línea de investigación en el campo educativo que centra su atención en el aprendizaje a través del uso crítico del discurso.

Como todos los discursos disciplinarios, el didáctico comparte la propiedad de crear los objetos de los que habla. Para ello es importante considerar que si lo fundamental en las ciencias son las teorías y estas se obtienen mediante un modelo teórico conectado con un dominio de fenómenos, para poder enseñar teorías y modelos científicos es fundamental disponer de un discurso que guarde relación con el mundo cotidiano de los estudiantes, para dotarle de significancia. Para lograr este fin, la literatura al respecto recomienda hacer uso de una mediación discursiva a través del uso frecuente de sus figuras como la analogía y la metáfora, las cuales permitan la asimilación del conocimientos como un proceso constructivo.

Plantear analogías metáforas o incluso alegorías fomenta un pensamiento analógico equilibrado en el estudiantado a través de una acción dialógica donde el profesor no sea sólo el transmisor de contenidos, sino un guía que invite a sus estudiantes a conocer mundos mentales nuevos, a asumir como suyos nuevos patrones lingüísticos y de razonamiento, a

²³ Toulmin, S., *El uso colectivo y la evolución de los conceptos*, alianza editorial, Madrid, 1977

promover una formación más crítica y comprometida del mundo a través de la ciencia. Bajo esta perspectiva, el profesor está obligado a considerar el hecho que la adquisición del lenguaje científico por parte del alumno implica no solo la adquisición de nuevas palabras, sino la transición a nuevo modo de concebir la realidad a través de un nuevo sistema semántico, un aprendizaje que pudiera compararse a la adquisición de una lengua diferente a la propia²⁴. La mediación discursiva a través de la docencia dialógica, entendida esta como una acción comunicativa que busca el acuerdo, la convergencia frente a una contradicción, divergencia o situación de tensión es una didáctica deseable, porque a través de ella el estudiante tiene la oportunidad de involucrarse en una interacción deliberativa con las principales ideas de un contenido disciplinar, lo que favorece una comprensión adecuada del mismo.

La docencia dialógica es pues una práctica discursiva que trasciende el contexto escolar, es una actividad que hace posible la interacción cara a cara de sus participantes, es una política, una actividad crítica, colectiva y transformadora de la que emerge un saber social que está reflejado por la conducta del individuo con los demás, es decir, un saber humano²⁵.

2.2.3 Figuras discursivas en la enseñanza de la química

La mayoría de los profesores coinciden que explicar es una labor central en el proceso de enseñanza, aunque no la única. Cuando abordamos la explicación científica es sorprendente el uso reiterativo que se hace de las analogías y metáforas de forma inconsciente. Autores como Ogborn y Martin, afirman que las metáforas y analogías constituyen un aspecto esencial en el proceso de estructuración mental de las representaciones del mundo que nos rodea y sus inferencias²⁶, pues además de la demostración y la experimentación permiten acrecentar la plausibilidad de las explicaciones.

Las analogías y metáforas son elementos discursivos que fortalecen la creatividad, las habilidades cognitivas de los estudiantes para interpretar y comunicar contenidos, además son recursos que fomentan la comprensión de periodos históricos, escuelas de pensamiento y otras manifestaciones humanas que configuran a la ciencia. Puede decirse entonces, que el discurso analógico constituye una herramienta de primer orden en la búsqueda del aprendizaje de procedimientos y actitudes científicas, trascendiendo más allá del ámbito meramente conceptual. Por su relevancia e implicaciones educativas, la analogía y la metáfora deben emplearse como resultado de una planeación organizada de la labor docente, es decir, a través de un discurso escolar que se construye y no se impone. Para ello, es plausible estudiar primero sus características generales.

²⁴ Sardá, J. y San Martí, N., “Enseñar a argumentar científicamente: Un reto en la clase de ciencias”, *enseñanza de las ciencias*, vol. 18 (3), pp. 405-422, 2000. p. 406

²⁵ Santoyo, R., “Apuntes para una didáctica grupal”, El Caballito-SEP-Cultura, México, pp.4-10, 1995, p.5

²⁶ Ogborn, J., y Martin, I., “Metaphorical understandings and scientific ideas”, *International Journal Science Education*, vol.18 (6), pp. 631-652, 1996.

i. La analogía

El uso tan frecuente de las analogías en las aulas se debe a que permiten conectar fácilmente un objeto o tema en estudio con el saber popular o común, las analogías facilitan la comprensión de nociones abstractas. En la literatura de la didáctica de la ciencia las analogías son definidas de la siguiente forma:

“Entendemos por analogía aquellos aspectos del discurso explicativo del profesor en las que se usa una situación familiar para explicar un fenómeno poco familiar”²⁷

“... se refiere a comparaciones de estructuras entre dos dominios”²⁸

La primera definición pone énfasis en su papel como recurso didáctico para las clases de ciencias. Mientras tanto la segunda se centra en la naturaleza de la comparación que consiste en la similitud entre estructuras, esto es de relaciones concepto-concepto o concepto-atributo²⁹. Las analogías comprenden:

- Una determinada cuestión desconocida o no familiar denominada blanco.
- Una cuestión conocida (análogo o fuente) que resulta familiar para el sujeto que intenta aprender.
- Un conjunto de relaciones que se establecen entre blanco y análogo o serie de proceso de correspondencia entre los componentes de ambos.³⁰

Algunas analogías frecuentes en la enseñanza de la química son, un choque de bolas de billar (modelo cinético molecular), el electrón es al núcleo como los planetas al sol, el mol es como la docena del químico, el átomo de Dalton puede representarse como esferas microscópicas, etc. En todas las analogías, puede observarse un rasgo distintivo común, la comparación o similitud entre dos dominios diferentes donde la palabra “como” en muchos casos la clave para su distinción de otros recursos discursivos cercanos, como la metáfora que es una identificación conceptual, que describe o afirma a través de un discurso figurado.

Por su carácter intrínsecamente procedimental, el establecimiento y buen uso de las analogías en el aula apoya el desarrollo de destrezas propiamente científicas, como lo es analizar, comparar, relacionar, diferenciar, etc., así como la aplicación de ideas ya aprendidas para generar o adquirir otras nuevas³¹. Las analogías constituyen ante todo un proceso interno al sujeto, y no solo el estímulo externo que se presenta como recurso a través de la lectura de

²⁷ Dagher, Z. y Cossman, G., “Verbal explanation given by science teachers: Their nature and implications”, *Journal of Research in Science Teaching*, pp. 361-374, 1992, p.19

²⁸ Duit, R., “On the role of analogies and metaphors in learning science”, *Science Educations*, vol 75(6), pp. 649-672, 1992

²⁹ Oliva, J. y Aragón, M., “Aportaciones de las analogías al desarrollo de pensamiento modelizador de los alumnos en química”, *Educación química*, Vol. 20, pp. 41-54, 2009, p.41

³⁰ Raviolo, A., “Modelos, analogías y metáforas en la enseñanza de la química”, *Educación química*, Vol. 20, pp. 55-60, 2009, p.55

³¹ Zamora, E., *La analogía y la metáfora como recurso didáctico en la clase de ciencias*, en interpretación y conocimiento: antologías MADEMS, UNAM, 2006, p.162

un texto o explicación del profesor, lo que les confiere aspectos emotivos que acercan al alumnado a una forma de valoración de la ciencia con un nivel de seguridad que les permita conectar su mundo al mundo de las teorías y abstracciones, erigiéndose como un verdadero soporte para el aprendizaje.

Monitorear la utilidad de las analogías en el estudiantado para comprender nuevos fenómenos puede ser la clave para valorar la lógica y el entendimiento sobre un determinado tema, por tanto su uso implica cierta sistematización del razonamiento, un argumentar razones a favor y en contra. Además esta técnica discursiva al igual que las metáforas tiene la propiedad que puede abordarse desde distintos medios: un juego, un experimento, una historia, un modelo, un instrumento, un problema, etc.³², son verdaderos atajos para la comprensión e interpretación del conocimiento.

Es importante señalar que plantear analogías o metáforas ya sea de forma consciente o inconsciente, no implica que sean usadas como recurso didáctico, ni para enseñar, ni para aprender. La literatura recomienda que para potenciar su eficiencia es importante que sean complementarias a otras estrategias didácticas, como el uso de modelos. Es bien sabido también que una presentación asistémica de éstas puede ser la causa de graves confusiones a tal grado de reforzar las denominadas ideas alternativas del estudiantado. Por ello, y como producto de la experiencia y la investigación se han sugerido algunas secuencias para enseñar con analogías, se mencionarán dos publicadas en los últimos años. Recientemente Harrison y Coll presentaron la guía FAR: Foco, Acción y Reflexión, para la presentación de analogías, la cual es mostrada en la siguiente figura.

| |
|---|
| <p>Foco</p> <p><i>Concepto:</i> ¿Es difícil, no familiar, abstracto?</p> <p><i>Estudiante:</i> ¿Qué conocen ya sobre el concepto?</p> <p><i>Análogo:</i> ¿Es familiar el análogo a los estudiantes?</p> |
| <p>Acción</p> <p><i>Similitudes:</i> Discutir características análogo y concepto y establecer semejanzas</p> <p><i>Diferencias:</i> Discutir dónde el análogo es distinto al concepto</p> |
| <p>Reflexión</p> <p><i>Conclusiones:</i> ¿Fue el análogo claro, útil o confuso?</p> <p><i>Mejoramiento:</i> ¿Qué cambios haría la próxima vez con esta analogía, a la luz de los resultados obtenidos?</p> |

Figura 7. Guía FAR en la presentación de analogías³³.

³² Raviolo, A., “Modelos, analogías y metáforas en la enseñanza de la química”, *cit*, p.57

³³ Op. cit., p. 59

ii. La metáfora

La palabra metáfora tiene sus raíces etimológicas en una palabra compuesta a su vez por dos palabras griegas: meta, que significa “más allá”, y féro, que es “llevar”. La metáfora es una figura del lenguaje por la cual se transporta el sentido de una palabra o idea mediante una comparación mental. Al igual que las analogías consisten en una comparación, pero se diferencia de ella porque no se hace explícita, son como un tipo de analogía al extremo³⁴. Una definición muy ilustrativa de la metáfora es la siguiente:

...es un cambio de sentido, significa transferencia o traslado de significados entre dominios o universos diferentes. Es una figura de discurso en la que se habla de algo, mediante una expresión que se refiere a otra que se le parece. Es decir, se usa una frase ordinaria o conocida para hablar de otra cosa (...) a su función se le puede atribuir la capacidad de recuperar el poder sensible de las palabras³⁵.

Innumerables conceptos de ciencia tuvieron un origen metafórico, desde la manzana a caída libre hasta campo de gravedad, basta recordar que fue una metáfora alegórica (el sueño de una serpiente que se mordía la cola) lo que llevó a A. Kekulé (1829-1896) a proponer la estructura hexagonal del benceno. La química está plagada de metáforas por citar algunas tenemos, nube electrónica, red cristalina, la familia de hidrocarburos, el átomo planetario, la catástrofe ultravioleta u otras más elaboradas como la siguiente; en un mar de electrones de valencia deslocalizados³⁶, etc. La ciencia recurre a la metáfora para hacer transmisible un nuevo conocimiento, para darle un sentido sociocultural, sobre todo en su educación como lo señala Ortega y Gasset.

Cuando el investigador descubre un fenómeno nuevo, es decir, cuando forma un nuevo concepto, necesita darle un nombre. Como una voz nueva no significaría nada para los demás, tiene que recurrir al repertorio del lenguaje duradero, donde cada voz se encuentra ya adscrita a una significación. A fin de hacerse entender, elige la palabra cuyo usual sentido tenga alguna semejanza con la nueva significación. De esta manera, el término adquiere nueva significación a través y por medio de la antigua, sin abandonarla. Esto es la metáfora³⁷.

Según Gasset, se usan metáforas para entender y comunicar lo no familiar en términos consolidados. La metáfora es un instrumento del lenguaje científico, pero tiene características diferentes a la metáfora literaria o poética. Aunque ambos tipos tienen su origen de procesos mentales semejantes, la metáfora poética tiene la singularidad de sugerir y para ello es necesario que permanezcan abiertas. Si Juan Rulfo compara la vida con la tierra o la melancolía con un atardecer lluvioso en el campo, no tiene sentido escudriñar sobre la validez u objetividad de sus asociaciones. Sin embargo, una metáfora científica si debe enfrentar un juicio objetivo, debe ser ajustada a un paradigma donde toda la comunidad está de acuerdo, debe converger con un concepto, un modelo, una ley, las metáforas científicas son generalmente cerradas. El físico

³⁴ *Ibid.* p.56

³⁵ Beuchot, M., *Tratado de hermenéutica analógica*, Itaca, México, 2000. p. 63

³⁶ Raviolo, A., “Modelos, analogías y metáforas en la enseñanza de la química”, *cit.*, p.56

³⁷ Zamora, E., *La analogía y la metáfora como recurso didáctico en la clase de ciencias*, *cit.*, p.158

español Fernández Reñada planteaba al respecto: O sea, que si las metáforas literarias deben mantener su intensidad, conviene que las científicas se enfríen³⁸.

En la ciencia y su educación las metáforas se van acotando y restringiendo conforme se les van encontrando referentes que parten generalmente de hechos experimentales. Se convierten en modelos discursivos aproximados en la descripción de fenómenos. A manera de síntesis, podría decirse que las metáforas en la ciencia nos enseñan como los juegos de fantasía, las aproximaciones, los símiles y contrastes de la imaginación sustituyen amablemente a la lógica de la inteligencia, al formalismo racional de las inducciones científicas. Al igual que las analogías, su uso reproduce y fomenta una visión más humana de la ciencia, menos unidireccional e impositiva.

iii. La alegoría

Como se estudió en la síntesis histórica referente al periodo alquímico, la alegoría fue una figura discursiva de gran importancia en el lenguaje culto desde la Grecia clásica hasta el advenimiento de la ciencia a finales del siglo XVII, fue durante el periodo medieval cuando esta figura literaria llegó a su cúspide. En la actualidad su uso se ha suprimido de la literatura científica formal no así de su teoría educativa ya que en ocasiones puede ser un recurso didáctico de gran utilidad para abordar ciertos contenidos.

La alegoría es en principio un equívoco, una retórica que permite el flujo vertiginoso de interpretaciones de tal forma que no se espera recuperar un sentido literal o único de un texto o representación. La alegoría es una representación más o menos artificial de generalidades y abstracciones perfectamente cognoscibles y expresables por otras vías, de ahí sus raíces etimológicas; *allos* del griego que significa "otro" y *agoreno*, "hablar" o "proclamar"; esto es, decir otra cosa de la que se expresa. La alegoría tiene como meta o fin servir como advertencia, es un "ver a través" de una pluralidad de sentidos lo verdadero³⁹. En la literatura didáctica suele asociarse a la alegoría como un instrumento cognoscitivo asociado al razonamiento analógico. Una definición elegante y sumamente esclarecedora de este recurso discursivo lo proporciona el dramaturgo Pedro Calderón de la Barca en un acto de tema eucarístico denominado auto sacramental:

"La alegoría no es más que un espejo que traslada lo que es con lo que no es, y está toda su elegancia en que salga parecida tanto la copia en la tabla, que el que está mirando a una piense que está viendo a entrambas".⁴⁰

³⁸ *Ibid.* p.159

³⁹ Terry, M.S, *hermenéutica: interpretación de las alegorías* en: <http://www.seminarioabierto.com/hermeneutica12.htm>

⁴⁰ <http://repdeval.com/Circulo/Taller/Retorica/alegoria1.htm>

2.2.4 Propuesta de una analogía, una metáfora y una alegoría en la enseñanza de los nanosistemas

i. Analogía: El átomo de Bohr es como el sistema planetario

En el marco de la enseñanza de la química, se busca con frecuencia situaciones conocidas por el alumnado, para explicar conceptos abstractos, tal es el caso de la representación a través de modelos de los átomos de los elementos. Hoy en día el modelo de átomo Bohr constituye un tema central en la enseñanza de la estructura de la materia en el bachillerato de la UNAM. Una manera de abordar este contenido es a través del planteamiento de una buena analogía, una comparación de dos dominios conceptuales que pertenecen a escenarios diferentes, uno extraído del mundo cotidiano y otros del contexto científico. Un análogo común que es de gran utilidad para este menester es la imagen del sistema planetario, el cual reviste cierto parecido con el modelo atómico de Bohr donde el sol sería el núcleo y los planetas los electrones. Para plantear esta analogía de forma organizada, se utilizará la guía FAR citada anteriormente.

1. Focalización del concepto, ideas previas y análogo

La primera etapa de esta guía o foco, consiste en identificar el concepto, su complejidad, las ideas previas que los estudiantes tienen sobre este y establecer una analogía central.

- Los Conceptos. Un átomo tiene una dimensión del orden de 10^{-9} m. Es una entidad nanoscópica imposible de observar directamente. El modelo de Bohr es de gran uso didáctico ya que proporciona una imagen del átomo muy fácil de reconocer, por su similitud con el sistema solar además es aplicable a la explicación de diversos fenómenos cotidianos, como la emisión de luz de ciertos materiales. Está presente en la mayoría de los textos de la enseñanza de la química desde secundaria hasta el nivel superior por su significado histórico-científico, constituye el primer modelo que explica la estabilidad de los sistemas atómicos en forma racional y predictiva además de su relación con la radiación electromagnética⁴¹.
- Las ideas previas. La principal dificultad que presentan los estudiantes en reconocer y asimilar la teoría atómica es su idea de continuidad de la materia. El modelo continuo de la materia es tan poderoso que a pesar de la enseñanza formal la mayoría de los estudiantes sólo utilizan un modelo corpuscular primitivo, que conserva aspectos del punto de vista ingenuo, como lo es, asociar a las partículas propiedades macroscópicas como el cambio de forma y color.
- Establecimiento de la analogía. Para establecer la analogía se recomienda mostrar visualmente el sistema solar, con sus características más relevantes, esto permite

⁴¹ Un análisis más profundo y detallado de este contenido y sus implicaciones en la enseñanza de la química en el bachillerato se presenta en el último capítulo de esta tesis.

disponer de una representación mental colectiva sobre el análogo. Posteriormente establecer la comparación de semejanza entre el sistema planetario y el modelo de Bohr. Se aconseja una presentación audiovisual del modelo de Bohr al terminar de establecer la analogía.

El Sistema Solar y el átomo se parecen en algunas cosas, a pesar de la diferencia de tamaño.

El Sistema Solar es un gran espacio vacío con un sol en el centro. A su alrededor giran los planetas, sujetos por la gravedad, todos en el mismo plano, con sus órbitas formando un disco.

Los átomos, siendo muy pequeños, también tienen mucho espacio vacío, el núcleo está en el centro. A su alrededor, giran los electrones sujetos por la atracción eléctrica con el núcleo, cada uno en su órbita pero formando una esfera perfecta.

2. Acción

Es la segunda etapa de la guía FAR y consiste en discutir características del análogo, similitudes con el concepto, diferencias y limitaciones de la analogía. Una vez que se discuten las principales similitudes y diferencias, es importante reconocer las limitaciones de la analogía.

Tabla1. Principales similitudes entre el análogo y el concepto científico⁴²

| Análogo: El Sistema Planetario | Concepto: El Modelo Atómico de Bohr |
|--|--|
| Distancia entre el Sol y los planetas, y entre planeta-planeta. | Distancia entre el núcleo y los electrones y entre electrones-electrones. |
| Fuerza atractiva entre el sol y los planetas y entre planeta-planeta | Fuerza atractiva entre el núcleo y los electrones. Fuerza entre electrones- electrones |
| Mayor tamaño y masa del sol que los planetas. La mayor parte de la masa del sistema planetario esta en el sol | Mayor tamaño y masa del núcleo que los electrones. La mayor parte de la masa del átomo esta en el núcleo. |
| Los planetas giran en orbitas alrededor del sol | Los electrones giran en órbitas alrededor del núcleo. |
| Entre los planetas hay vacío | Entre los electrones hay vacío |
| La composición del sol es distinta al de los planetas | Los constituyentes del nucleó son diferentes a la de los electrones. Poseen cargas opuestas |
| Cada órbita planetaria tiene su propia energía. | Cada orbita atómica tiene su propia energía. |

⁴² Marrero, J., Elórtogui, N. y Tejera, C., “Técnica de análisis didáctico del átomo de Bohr como sistema planetario”, *XXIII encuentros de didáctica de las ciencias experimentales*, Almería, 2008, p. 7, en : <http://www.23edce.com/wp-content/themes/blog/posters.php?fecha=11>

Tabla 2. Principales diferencias entre el análogo y el concepto científico⁴³

| Análogo: El Sistema Planetario | Concepto: El Modelo Atómico de Bohr |
|--|--|
| La forma del sistema solar es un disco muy grande | La forma del modelo atómico es esférica y muy pequeña. |
| El número de planetas es fijo y hay uno por órbita | El número de electrones es variable y pueden existir varios por órbita |
| Los planetas son diferentes entre sí. Hay distintos tipos de planetas. | Todos los electrones son iguales. |
| La trayectoria de los planetas es elíptica | La trayectoria de los electrones son circulares. |
| Los planetas se atraen ligeramente entre sí. | Los electrones se repelen entre sí. |
| Los planetas tienen forma esférica | No se puede determinar la forma de los electrones en este modelo. |

3. Limitaciones

Las limitaciones son aspectos de la analogía que provocan un problema en el aprendizaje del alumno. Hay unas limitaciones que son intrínsecas a la analogía, ya que las tiene en su propia estructura, en la trama de relaciones entre el análogo y el tópico, independientemente de cómo se ponga en práctica. A continuación se mencionan las principales limitaciones de la analogía del sistema planetario con el átomo de Bohr:

- ❖ A diferencia del Sistema Solar, que tiene un tamaño muy grande, y que el alumno percibe como visible, el átomo ni se ve, ni se ven sus componentes. Esta es una limitación evidente que seguramente generara dificultades en la enseñanza.
- ❖ Habrá que determinar los conocimientos del alumno sobre el análogo. Puede darse el caso de que algunos estudiantes no conozcan que el Sistema Solar es un disco muy grande y plano y queden sin concretar los aspectos de la analogía referentes a la forma de ambos sistemas. Estas situaciones abren la puerta a extrapolaciones inadecuadas y deben evitarse concretando los nexos entre análogo y el tópico.
- ❖ Al decir que “las trayectorias de los electrones son circulares”, debemos reconocer como profesionales de la disciplina, que este hecho solamente es aceptable en el modelo de Bohr (donde sólo se dispone el primer número cuántico o número cuántico principal) ya que, en el paradigma cuántico actual, aparecen los orbitales donde es inadmisibles hablar de trayectorias.

A pesar de que el análogo central, el sistema planetario no abarca todo el sentido conceptual que implica el modelo atómico de Bohr, es una analogía adecuada porque constituye una mediación discursiva que permite la conexión entre el conocimiento cotidiano con el científico, sin dejar de señalar sus carencias con miras de hacer más amplio y racional el aprendizaje de este modelo en la enseñanza de la química. La última etapa de la guía FAR, es la reflexión sobre la fertilidad de la analogía, para ello hay que aplicarla en la práctica docente,

⁴³ Op.cit. pp. 7-8

su validación será resultado del trabajo docente por emprender después de obtener el grado. La guía FAR puede ser utilizada como protocolo en el establecimiento de otras analogías.

ii. Metáfora: “Los espectros son las huellas digitales de los átomos”

La espectroscopia es la disciplina cuyo campo de estudio es la interacción de la radiación electromagnética con la materia. Su origen nos remonta a finales del siglo XVII, cuando el ilustre físico Newton estudio la dispersión de la luz solar cuando atravesaba un prisma de cristal generando varias tonalidades que denomino “*spectrum*”. La percepción de los colores que se encuentran en la naturaleza representa la cotidianidad de la espectroscopia en la naturaleza, ya que dichos colores representan la interacción de los materiales con la radiación electromagnética visible incidente.

Es en el siglo posterior con el arduo estudio de los gases se identificaron otras regiones importantes de radiación electromagnética como la denominada infrarrojo y ultravioleta. Con la emergente teoría atómica a principios del siglo XX y el fenómeno de radiactividad, el estudio espectroscópico tomó sentido al establecerse el espectro electromagnético como lo conocemos ahora, así como su finalidad, la caracterización de importantes elementos por las regiones propias de absorción y emisión electromagnética en función de una determinada longitud de onda (λ) o frecuencia (ν).

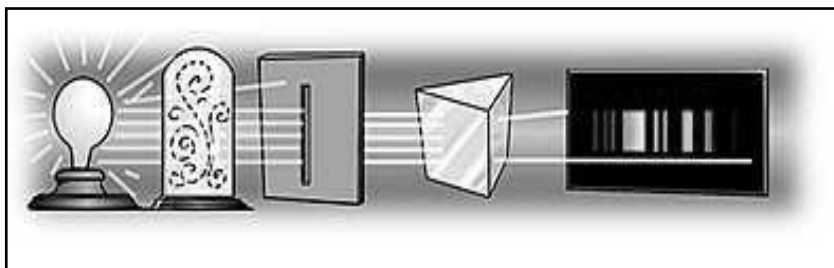


Figura 8. Esquematación de la obtención de un espectro de emisión.

Aseverar que los espectros atómicos son las huellas dactilares de los elementos reviste un plano metafórico porque a través de un cambio de sentido se comunica un mismo significado: “el identificar”. Consideramos que es una metáfora cerrada o científica porque la razón de identificar en ambos sentidos considera un criterio experimental.

Es familiar para el alumnado del bachillerato el objetivo que tiene obtener la huella digital de un individuo, porque es un proceso del que tienen noción desde la infancia, cuando tramitaron su cartilla médica, cuando participan en cualquier proceso de elección en la preparatoria o al observar una serie televisiva o película de corte policial, etc. La imagen que genera un dedo con tinta sobre un papel es la evidencia experimental o el dato empírico directo que permite la identificación personal, el descubrimiento de un infractor en una serie policial. En el plano científico-espectral ocurre lo mismo, son las líneas oscuras o coloreadas a una determinada longitud de onda el dato empírico necesario para caracterizar a los átomos de los

elementos. Sin embargo, al igual que en el caso de las analogías es pertinente señalar las diferencias existentes de esta asociación.

Una huella digital distingue a un solo ser humano en el mundo de cualquier nacionalidad, género, edad o clase social, es por tanto un dato de carácter único. Un espectro caracteriza a toda una especie entera, es decir, todos los átomos de sodio, helio o cobre tienen un mismo espectro, es un dato empírico homogéneo pero no particular. Otra diferencia es la noción de realidad a la que aluden, las huellas digitales identifican personas, niños, mujeres, adolescentes, ancianos, mexicanos, europeos, orientales, seres humanos reales y completamente perceptibles, mientras que los espectros inducen teorías acerca del comportamiento de sistemas pequeños, caracterizan átomos, entes microscópicos imperceptibles y que solo puede ser representada a través de modelos, es decir, a través de construcciones conceptuales avaladas por evidencias experimentales vigentes y la racionalidad propia de la comunidad científica⁴⁴. La noción de realidad de los sistemas atómicos-moleculares parece tener aparejado un sentido alegórico muy marcado desde tiempos inmemoriales. Para ejemplificar esta noción de realidad se utilizará la alegoría clásica de la caverna, presente en el lucido texto la República de Platón.

iii. Alegoría: La caverna de Platón y la realidad de los nanosistemas

El mito de la caverna⁴⁵ es un famoso relato clásico donde Platón a través de una original explicación alegórica aborda la concienzuda relación entre el hombre y el conocimiento. La caverna es un diálogo que sostiene Sócrates con Glaucón, el maestro y el hermano del autor de este relato:

- Imagina una especie de cavernosa vivienda subterránea provista de una larga entrada, abierta a la luz, que se extiende a lo ancho de toda la caverna, y unos hombres que están en ella desde niños, atados por las piernas y el cuello, de modo que tengan que estarse quietos y mirar únicamente hacia adelante, pues las ligaduras les impiden volver la cabeza; detrás de ellos, la luz de un fuego que arde algo lejos y en plano superior, y entre el fuego y los encadenados, un camino situado en alto

-Ya lo veo-dijo

- Pues bien, ve ahora, a lo largo de la entrada, pasan unos hombres que transportan toda clase de objetos, figuras de animales, de maderas o de piedra, de tal forma que las imágenes aparezcan proyectadas por el fuego sobre el muro que observan los prisioneros; entre estos portadores habrá, como es natural, unos que vayan hablando y otros que estén callados.

- ¡Qué extraña escena describes -dijo- y qué extraños prisioneros!

-Iguales que nosotros -dije-, porque en primer lugar, ¿crees que los que están así han visto otra cosa de sí mismos o de sus compañeros sino las sombras proyectadas por el fuego sobre la parte de la caverna que está frente a ellos?

⁴⁴ Chamizo, J., "Química dialéctica. Sobre aprendizaje, modelos y realidad", *METLI*, seminario de investigación educativa, pp. 66-80, Facultad de Química, UNAM, 2006. p.74

⁴⁵ Platón, *La República*, Alianza editorial, Madrid, 1996.

- ¿Y si la prisión tuviese un eco que viniera de la parte de enfrente? ¿Piensas que, cada vez que hablara alguno de los que pasaban, creerían ellos que lo que hablaba era otra cosa sino la sombra que veían pasar?

- No, ¡por Zeus!- dijo.

- Entonces no hay duda -dije yo- de que los tales no tendrán por real ninguna otra cosa más que las sombras de los objetos fabricados.

Usando el contexto de la caverna, Platón mediante alegorías describe al mundo real, los hombres se encuentran encadenados a la ignorancia, el fuego referencia al sol, la cima de la caverna es el cielo, el fondo de la caverna es la tierra donde habita la humanidad, las sombras proyectadas son la percepción humana a través de los sentidos, lo que está fuera de la caverna representa al mundo de las ideas y la razón. De repente uno de los prisioneros se ve liberado y puede mirar al exterior de este dantesco escenario:

- Examina, pues -dije-, qué pasaría si fueran liberados de sus cadenas y curados de su ignorancia, y si, conforme a naturaleza, les ocurriera lo siguiente. Cuando uno de ellos fuera desatado y obligado a levantarse súbitamente y a volver el cuello y a andar y a mirar a la luz, y cuando, al hacer todo esto, sintiera dolor y, por causa de las chiribitas, no fuera capaz de ver aquellos objetos cuyas sombras veía antes, ¿qué crees que contestaría si le dijera alguien que antes no veía más que sombras inanes y que es ahora cuando, hallándose más cerca de la realidad y vuelto de cara a objetos más reales, goza de una visión más verdadera, y si fuera mostrándole los objetos que pasan y obligándole a contestar a sus preguntas acerca de qué es cada uno de ellos? ¿No crees que estaría perplejo y que lo que antes había contemplado le parecería más verdadero que lo que entonces se le mostraba?

- Y si se le obligara a fijar su vista en la luz misma, ¿no crees que le dolerían los ojos y que se escaparía, volviéndose hacia aquellos objetos que puede contemplar, y que consideraría que éstos son realmente más claros que los que le muestra?

- Así es-dijo

- Necesitaría acostumbrarse, creo yo, para poder llegar a ver las cosas de arriba. Lo que vería más fácilmente serían, ante todo, las sombras; luego, las imágenes de hombres y de otros objetos reflejados en las aguas, y más tarde, los objetos mismos.

-Con toda seguridad

- ¿Y qué? Cuando se acordara de su anterior habitación y de la ciencia de allí y de sus antiguos compañeros de cárcel, ¿no crees que se consideraría feliz por haber cambiado y que les compadecería a ellos?

- Efectivamente.

En este pasaje Platón ilustra como a través de superar el dolor y el esfuerzo se puede acceder al extraordinario e imperceptible mundo del conocimiento, pero este es un proceso gradual que exige del hombre una cualidad: la adaptación. Primero buscaría las sombras y las

cosas reflejadas en el agua, luego, más adelante se acostumbraría a mirar los objetos mismos y finalmente podría contemplar la majestuosidad de la luz que representa al bien y la razón, es decir, la plenitud del paisaje exterior. Al interpretar este pasaje podemos asociar o analogar en el aula al ser que conoce la luz con la actividad científica, es decir, la búsqueda del conocimiento en función del bienestar social. Pero el relato no termina ahí, Platón aborda el escenario de regresar al interior de la caverna al sujeto liberado y su experiencia al comunicar la nueva realidad a sus antiguos compañeros:

- Ahora fijate en esto -dije-: si, vuelto el tal allá abajo, ocupase de nuevo el mismo asiento, ¿no crees que se le llenarían los ojos de tinieblas, como a quien deja súbitamente la luz del sol?

- Ciertamente -dijo.

- Y si tuviese que competir de nuevo con los que habían permanecido constantemente encadenados, opinando acerca de las sombras aquellas que, por no haberse asentado todavía los ojos, ve con dificultad -y no sería muy corto el tiempo que necesitara para acostumbrarse-, ¿no daría que reír y no se diría de él que, por haber subido y conocido el exterior ha vuelto con los ojos estropeados, y que no vale la pena intentar una semejante ascensión? ¿Y no matarían, si encontraban manera de echarle mano y matarle, a quien intentara desatarles y hacerles subir?

- Pues bien -dije-, esta imagen hay que aplicarla toda ella, ¡oh amigo Glaucón!(...) En fin, he aquí lo que a mí me parece: en el mundo inteligible lo último que se percibe, y con trabajo, es la idea del bien, pero, una vez percibida, hay que coagrar que ella es la causa de todo lo recto y lo bello que hay en todas las cosas; que, mientras en el mundo visible ha engendrado la luz y al soberano de ésta, en el inteligible es ella la soberana y productora de verdad y conocimiento, y que tiene por fuerza que verla quien quiera proceder sabiamente en su vida privada o pública.

- También yo estoy de acuerdo -dijo-, en el grado en que puedo estarlo.

Cuando el sujeto liberado trata de convencer a sus semejantes de que viven en un engaño, que hay un mundo mejor y los invita hacia la luz, se ríen de él y lo califican de loco, pues la dolorosa condición que impone la rutina los enajena al grado de matar a quien se atreva a desatarles y hacerles subir en la caverna, ellos creen que la luz exterior está lejos de ser benéfica, ya que, sólo causo daño en los ojos y en el juicio del hombre liberado. Es entonces cuando se comprende a plenitud el mensaje de esta alegoría: El bien y la plenitud que proporciona el conocimiento es solo perceptible para quien tenga la fuerza de proceder sabiamente a través del esfuerzo, el dolor, el buen juicio y sentido humano. Una moraleja de grandes repercusiones educativas.

De regreso a los nanosistemas, podríamos usar esta alegoría en el aula para explicar a los estudiantes la relevancia que tiene para la química el estudio de los sistemas atómico-moleculares. Se ejemplificara este hecho a través de la descripción de un cambio químico. En la actualidad existen evidencias experimentales suficientemente perceptibles que permiten caracterizar un cambio químico, entendido este como la transformación de una sustancia en otra. Las evidencias que con nuestros sentidos podemos captar para identificar que ha ocurrido un cambio químico son el desprendimiento de un gas, la formación de un precipitado o

turbidez, un cambio de color o de temperatura, etc. Todos estos hechos equivalen a las sombras que miraban los esclavos dentro de la caverna, es decir, son solo una realidad parcial que nos informa poco sobre la explicación científica de la naturaleza del cambio químico.

En realidad, las evidencias experimentales que podemos sensorialmente describir cuando ocurre una reacción química son el resultado del comportamiento de sistemas pequeñísimos fuera del plano sensorial. Los cambios de coloración, la formación de un precipitado o el desprendimiento de un gas solamente adquieren relevancia científica cuando su explicación referencia la presencia de entidades microscópicas en constante interacción. Para los químicos, la formación de una nueva sustancia es el resultado del reacomodo de las partículas presentes en una reacción llámense, átomos, moléculas o iones dando lugar a la formación nuevos enlaces. Esta explicación de gran fertilidad tecnológica conduce a un sentido de realidad fuera de la percepción humana, una realidad que debe ser representada con modelos como fueron para los griegos el bien ya la razón, así que la explicación científica del cambio químico equivaliera a la luz del exterior de la caverna, solo que ahora la majestuosidad y lo sublime no se encuentra en la gran extensión del paisaje sino en la comprensión del comportamiento de lo pequeño, labor que requiere de disciplina, talento, buen juicio y sentido humano, virtudes que invita a adoptar Platón a través de su alegoría.

2.3 Bibliografía

- Beuchot, M. y Arriarán, S., *Virtudes valores y educación moral*, UPN, México, 1999
- Beuchot, M., *Tratado de hermenéutica analógica*, Itaca, México, 2000
- Bolzán, J.E., *Física, Química y Filosofía Natural en Aristóteles*, Eunza, Navarra, 2005
- Bueno, G., *Metafísica Presocrática*, Pentalfa, Oviedo, capítulo V, pp. 327-373, 1974.
- Castro, I. y Hernández, J., “Didáctica arquimediana”, *Memorias XV encuentro de Geometría y III de Aritmética (ERM)*, Colombia, 2002.
- Chamizo, J., “Química dialéctica. Sobre aprendizaje, modelos y realidad”, *METL1*, seminario de investigación educativa, pp. 66-80, Facultad de Química, UNAM, 2006.
- Dagher, Z. y Cossman, G., “Verbal explanation given by science teachers: Their nature and implications”, *Journal of Research in Science Teaching*, pp. 361-374, 1992
- Duit, R., “On the role of analogies and metaphors in learning science”, *Science Educations*, vol. 75(6), pp. 649-672, 1992.
- Jaeger, W., *Aristóteles*. Traducción de J. Gaos, FCE, México, 1957.
- Marrero, J., Elórtégui, N. y Tejera, C., “Técnica de análisis didáctico del átomo de Bohr como sistema planetario”, *XXIII encuentros de didáctica de las ciencias experimentales*, Almería, 2008, en : <http://www.23cdce.com/wp-content/themes/blog/posters.php?fecha=11>

Marshall, P., *La piedra filosofal*, Grijalbo, Barcelona, 2001.

Oliva, J. y Aragón, M., "Aportaciones de las analogías al desarrollo de pensamiento modelizador de los alumnos en química", *educación química*, vol. 20, pp. 41-54, 2009.

Picó, F., "Razón y Pasión en la Invención de Grecia," *Amauta, Revista Digital de la Universidad de Puerto Rico en Arecibo*, vol. No. 5, 2008.

Platón, *La República*, Alianza editorial, Madrid, 1996.

Raviolo, A., "Modelos, analogías y metáforas en la enseñanza de la química", *Educación química*, vol. 20, pp. 55-60, 2009.

Ruíz, J.M., *Leucipo y Demócrito: Fragmentos*, Aguilar, Buenos Aires, Argentina, 1970.

Santoyo, R., *Apuntes para una didáctica grupal*, El Caballito-SEP-Cultura, México, pp.4-10, 1995.

Sardá, J. y San Martí, N., "Enseñar a argumentar científicamente: Un reto en la clase de ciencias", *enseñanza de las ciencias*, vol. 18 (3), pp. 405-422, 2000.

Terry, M.S, *Hermenéutica: interpretación de las alegorías* en:
<http://www.seminarioabierto.com/hermeneutica12.htm>

Tirso, R , *Alquimia ciencia o ficción*, Homenaje, Instituto de Química, UNAM, 2001.

Toulmin, S., *El uso colectivo y la evolución de los conceptos*, alianza editorial, Madrid, 1977.

Vera, F., *Científicos Griegos*, Aguilar, Madrid, 1970.

Zamora, E., *La analogía y la metáfora como recurso didáctico en la clase de ciencias*, en interpretación y conocimiento: antologías MADEMS, UNAM, pp. 153-164, 2006.

CAPÍTULO III

LAS NUEVAS LUCES DEL ATOMISMO: LA MATERIA EN EL SIGLO XIX

3.0 Al lector

En este apartado se analizan dos modelos que constituyen la base disciplinar con que se estudia el comportamiento de la materia en los cursos de química en el nivel medio superior: El modelo de Dalton y el modelo cinético molecular de los gases (MCM). Cada modelo es abordado diferenciadamente, de esta forma la primera mitad del presente capítulo la constituyen las dimensiones histórica y didáctica del modelo de Dalton, y la segunda parte las correspondientes al MCM.

3.1 Dimensión Histórica. “Los átomos pesan: el modelo atómico de Dalton”

3.1.1 ¿Cómo se pensaba la materia después de la primera Revolución Química?

Después de la primera revolución química comandada por Antoine Lavoisier (1743-1794), la visión aristotélica de la materia había sucumbido por completo, la química era una disciplina que comenzaba a cosechar prestigio propio. Desde finales del siglo XVIII se comenzó a concebir a la materia como un agregado de sustancias simples que se combinaban para formar diversos compuestos, sin embargo las propiedades de los elementos o cuerpos simples como se les denominaba eran muy confusas, más aun, no se podía determinar con precisión el número de elementos que había en la naturaleza a tal punto de considerarse indeterminables, por tanto la predicción de su combinación con otras entidades marcaba un rumbo impredecible.

Las reacciones químicas eran modeladas por el grupo de Lavoisier a través de una balanza, en la cual, se referenciaba el principio de la conservación de la masa: En todos los fenómenos químicos permanece constante la masa total de las sustancias que intervienen. Con la balanza en equilibrio, se hacía alusión a los reactantes en el platillo izquierdo y en el de la derecha a los productos, la balanza se develaba como el instrumento que hacía de la química una ciencia cuantitativa. Esta ley de la conservación de la masa nunca fue demostrada experimentalmente por Lavoisier, ni siquiera puede afirmarse que él la postuló, pues este principio de conservación puede rastrearse con anterioridad en trabajos de R. Boyle (1627-1691) y Blaise Pascal (1623-1662), el mérito de Lavoisier consistió en trasladar esta formulación a las experiencias de gravimetría dotándoles de cierto orden predictivo. A pesar de ello, una tensión se agudizaba en la química a finales del siglo XVIII, en la medida que se hacía una actividad profesional y de relevancia industrial, la síntesis tal como la conocemos ahora –la determinación y estudio de una sola sustancia– comienza a emerger abruptamente, el químico de esa época se enfrentaba con dos serios problemas ¿Cómo manejar a una cantidad de sustancias que se incrementa año tras año? ¿Cómo explicar la multiplicidad indefinida que las gobierna?

En el año de 1798 el francés Louis Proust (1754-1826) estudia la razón de combinación de algunos óxidos y sulfuros de cobre en Madrid, un año después enuncia una ley que trata de proporcionar un poco de regularidad a la multiplicidad que impera en el estudio de los compuestos químicos, se trata de la ley de las proporciones fijas o constantes. Según Proust; “cada que dos o más elementos se combinan para formar un compuesto, lo hacen en una proporción de peso definida y fija o constante”. Por ejemplo, se sabía que el agua guardaba una proporción en peso de oxígeno a hidrógeno de 7/1, posteriormente este dato se perfeccionó como lo conocemos ahora 8/1 y este comportamiento era aplicable para muchos compuestos importantes de la época. Sin embargo, no fue una cuestión sencilla de aceptar, tuvieron que pasar casi 10 años para que esta ley pudiera consolidarse. Uno de sus opositores más recios era el prestigiado francés Claude Louis Berthollet (1748-1822), quien la negaba rotundamente bajo el argumento que la proporción de los compuestos podría variar ya que cuando dos elementos se combinan dan lugar a varios compuestos y no lo hacen de forma excluyente¹. Lo cierto es que la descripción de estas generalizaciones requería de una explicación que abría la puerta a una realidad invisible, el resultado de esta crisis fue el surgimiento de la teoría atómica y el encargado de poner el cimiento de tan importante pilar científico, fue un prestigiado profesor inglés, el cuáquero John Dalton (1766-1844).

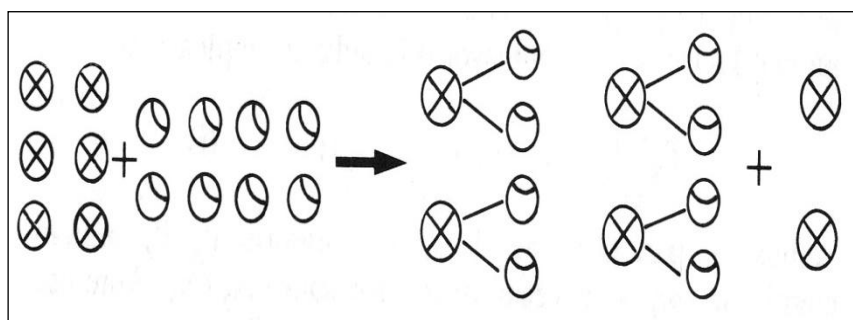


Figura 1. Ejemplo de una reacción de azufre, que cumple con la formulación de Proust, es decir, con una relación fija de peso 2/1.

3.1.2 John Dalton. Los átomos pesan

En el año de 1804 un profesor de Manchester, formuló una hipótesis que identificaba a los cuerpos simples con átomos. Esta milenaria idea, cuyo origen nos remonta a las orillas del mediterráneo generaba grandes polémicas como en la actualidad. Es muy importante mencionar que el nuevo átomo que postulaba Dalton, no era literalmente un heredero de las ideas presocráticas, tampoco de los corpúsculos newtonianos, sino que era una invención empírica que respondía satisfactoriamente a la crisis conceptual y formativa de la química a principios del siglo XIX.

¹ Gallego, R. y Perez, R., “Una aproximación histórico epistemológica de las leyes fundamentales de la química”, *enseñanza de la ciencias*, vol. 8 (1), pp. 359-375, 2009, p. 366

En el año de 1799 John Dalton realizó sus primeros trabajos de química influido por las obras de Robert Boyle y Lavoisier, el joven Dalton centró su investigación en el estudio de las propiedades de los gases, su primer trabajo significativo al respecto consistió en tratar de encontrar la proporción de los gases presentes en la atmósfera. Según los trabajos sobre los gases hechos por Henry Cavendish (1731-1810) y Joseph Priestley (1733-1804), la atmósfera se caracterizaba con cuatro gases: oxígeno, hidrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua, sin embargo, las proporciones de dicha mezcla aún eran tema de investigación. Dalton encontró que la solubilidad de estos cuatro gases en agua era diferente. Tales resultados serían los hechos que lo conducirían a descifrar lo que sería su gran contribución a la ciencia, el primer modelo atómico o “el átomo químico” como le nombran numerosas publicaciones españolas y francesas.

La gran dificultad para aceptar la hipótesis mecánica de la solubilidad de los gases en agua consiste en que diferentes gases obedecen leyes diferentes. ¿Por qué el agua no acepta la misma cantidad de cada gas? No tengo aún respuesta a esta pregunta, pero sospecho que se debe al peso y al número de partículas últimas de cada gas. Aquellos con partículas más ligeras y sencillas serán menos absorbibles, mientras que los otros lo serán más, de acuerdo con su peso y complejidad. Una investigación sobre el peso relativo de las partículas últimas de los cuerpos, hasta donde yo se es completamente nueva, y la he iniciado con éxito.²

Al estudiar las propiedades de los gases Dalton denomina a estas partículas últimas que difieren en grado de complejidad y peso; “átomos”, ya que asocia también a estas entidades la condición clásica de indivisibilidad de los filósofos griegos presocráticos.

La materia -dice- aunque se divide en un grado sumamente elevado, sin embargo, no es divisible hasta el infinito, por ello debe existir un límite más allá del cual no podemos seguir dividiéndola. Elegí la palabra átomo – continua- para designar estas partículas primarias, prefiriéndola a la palabra partícula, molécula, o cualquier otro nombre, porque esta palabra me parezca mucho más extensiva; incluye en ella la idea de la indivisibilidad, la cual no existe en otras denominaciones³.

En el año de 1803 Dalton pronunció una conferencia en la *Literary and Philosophical Society de Manchester*, en la que dio a conocer sus ideas respecto al carácter corpuscular de los constituyentes de los fluidos gaseosos. Años después generalizó estas ideas a todos los cuerpos y a la explicación de las reacciones químicas, en lo que se denominó por primera vez teoría atómica, los postulados de Dalton al respecto se mencionan a continuación:

² Chamizo, J, *El maestro de lo infinitamente pequeño*, CONACULTA-Pangea, México, 1992, pp.36, p. 38

³ *Op.cit.* p. 37

- 1) Todas las sustancias están formadas por átomos, los cuales son entidades microscópicas indivisibles.
- 2) Los átomos de un mismo elemento son iguales en peso y grado de complejidad. Los átomos de las sustancias compuestas son diferentes en complejidad y peso.
- 3) Los compuestos resultan de la combinación de los átomos de diferentes elementos, siempre en proporciones de números enteros pequeños.
- 4) En las reacciones químicas, los átomos únicamente se rearreglan. El análisis y la síntesis química no van más allá de la separación de unos con otros átomos y su reunión.



Figura 2. John Dalton (1766-1844)

Del postulado cuatro se desprende la ley de las proporciones fijas de Proust, que se ajustaba a la perfección con la teoría de Dalton, una proporción fija en peso implica una proporción fija en número de átomos constituyentes. De hecho la ley de las proporciones fijas fue la base empírica de otra ley ponderal que formularía Dalton, dentro del cuerpo de ideas de su modelo atómico: la ley de las proporciones múltiples. Se cree que esta ley fue formulada por el año de 1804 como parte de su investigación atómica e intentaba explicar la razón de la formación de distintos compuestos cuando dos elementos se combinan. Según esta ley: “si dos elementos químicos se combinan para formar distintos compuestos y la cantidad de uno de ellos permanece fija, las cantidades del otro que se combinan con él están en relación de números enteros y generalmente pequeños”. Por ejemplo, en esa época se conocía que la combinación de carbono con oxígeno podía dar monóxido de carbono (CO), un gas que no enturbia el agua de cal, pero también dióxido de carbono (CO₂) que si la enturbia. Si la proporción de carbono se mantiene fija y la que varía es la de oxígeno se encuentra la siguiente relación de combinación en peso de oxígeno a carbono de 4/3 para el primero y de 8/3 para el segundo, es decir, una relación 2/1 de oxígeno en ambos compuestos. Con esta ley se aseveraba que no era posible admitir compuestos con una proporción en peso arbitraria, es decir, que no esté descrita con números enteros. En la siguiente tabla se muestran otros ejemplos sobre la aplicación de esta ley.

| <i>Elementos</i> | <i>Compuesto</i> | <i>Composición</i> | <i>Proporción</i> | <i>Razón</i> |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------|
| ⊙ y ⊙ | { óxido pulga litargirio | 100 g/15.6 g 100 g/7.8 g | 2.00/1 | 2/1 |
| ⊕ y ⊙ | { anhídrido óxido | 100 g/146.43 g 100 g/97.83 g | 1.4968/1 | 3/2 |

Figura 3. Tabla con ejemplos de la aplicación de la ley de las proporciones múltiples, elaborada por Dalton en 1810.

El uso de la ley de Proust y de las proporciones múltiples para explicar la relación de combinación de elementos y compuestos desembocó en la construcción de la primera tabla de pesos atómicos relativos, pilar sobre el que descansan, con las modificaciones del caso, todos los cálculos químicos que hoy se realizan, para preparar desde medicinas, plásticos y alimentos hasta vidrio o acero.⁴ En el año de 1808, se publica *the new System of Chemical Philosophy* donde Dalton resume los trabajos que lo llevaron a entrelazar los términos átomo, elemento químico y compuesto, también esboza la relevancia del uso de las leyes ponderales en la obtención de pesos atómicos relativos. La gran novedad de esta publicación no reside en su concepción atomista de las sustancias químicas, su gran contribución es que su hipótesis tiene el efecto de convertir en indiscutible el concepto de proporción, de combinación mediante unidades discretas, de dirigir la atención hacia el “peso” de las partículas que constituyen estos cuerpos, lo que conduciría años más tarde al concepto de «*peso atómico*».





















| ELEMENTS | | | | | |
|---|------------|----|---|-----------|-----|
|  | Hydrogen. | 1 |  | Strontian | 46 |
|  | Azote | 5 |  | Barytes | 68 |
|  | Carbon | 5 |  | Iron | 50 |
|  | Oxygen. | 7 |  | Zinc | 56 |
|  | Phosphorus | 9 |  | Copper | 56 |
|  | Sulphur | 13 |  | Lead | 90 |
|  | Magnesia | 20 |  | Silver | 190 |
|  | Lime | 24 |  | Gold | 190 |
|  | Soda | 28 |  | Platina | 190 |
|  | Potash | 42 |  | Mercury | 167 |

Figura 4. Tabla de los elementos con sus pesos relativos correspondientes, reportada por John Dalton en 1810.

Esta versión del atomismo suele denominarse como *atomismo químico*⁵, ya que su origen empírico está en una serie de relaciones deductivas de las proporciones que guardan los reactivos y productos en una reacción química. En el atomismo químico no se hace referencia a los átomos por su acepción clásica, entidades mínimas que componen a la materia; sino como unidades mínimas de combinación. Su verdadera intención no es la explicación de la complejidad de lo visible en términos de lo invisible, el objetivo real de la teoría atómica de Dalton fue estructurar fórmulas articulando un lenguaje específico para la química y clasificar una cantidad de sustancias simples y compuestas que continuamente crecía. Bajo este nuevo

⁴ Ibid, p.38

⁵ Izquierdo, “Un nuevo enfoque en la enseñanza de la química: contextualizar y modelizar”, *Asociación Química Argentina*, vol. 92 (4/6), pp. 115-136, 2004, p. 122

sistema, en lugar de determinar la composición de un cuerpo en unidades centesimales, el químico la reportaba en términos de átomos constituyentes, estableciendo una relación directa entre los datos experimentales y su interpretación, articulando un nuevo lenguaje en la caracterización de su objeto de estudio; las transformaciones de las sustancias.

El campo de la ciencia es grande; por lo tanto es imposible para cualquier individuo cultivarlo completamente. Mi atención se ha dirigido al estudio del calor, los fluidos elásticos y los elementos fundamentales de los cuerpos, así como la manera en que se combinan. Durante estos estudios he identificado hechos importantes. Así he logrado reducir un número grande de hechos aparentemente independientes y anómalos a leyes generales, y demostrar como con nuevos principios se producirá el cambio más importante en la química, reduciendo el todo a una ciencia de gran simplicidad y de fácil comprensión.⁶

3.1.3 Contribución del trabajo de Dalton al lenguaje y la modelación química

La teoría atómica de John Dalton impactó notablemente en la forma en que los químicos representaban a las sustancias, Dalton denotaba los átomos de las sustancias simples o elementos mediante círculos que contenían un diseño gráfico específico o letra distintiva. Una característica importante de la notación usada por Dalton es que los símbolos redondeados representan una cantidad definida de un elemento, mientras que la notación anterior significaba cualquier cantidad de sustancia. Así, el símbolo \oplus representaba un átomo de azufre al cual se le asignaba un peso relativo con respecto al hidrógeno (tabla de pesos relativos), mientras que el símbolo \uparrow había representado anteriormente al azufre en general⁷.

La peculiar simbología de Dalton al igual que su teoría atómica aludía al gran interés que había puesto el británico sobre la atmósfera y las propiedades de los gases. Este hecho se puede constatar al revisar un texto publicado en 1803 para la Sociedad Filosófica y Literaria de Manchester por Dalton. En este escrito el inglés utiliza una esfera negra para representar una partícula de aire que colisiona con la superficie del agua, cuyas partículas también son representadas con esferas blancas apiladas. Cinco años más tarde, en su publicación más relevante *The New System of Chemical Philosophy*, Dalton formaliza esta notación esférica al reportar 36 elementos, de los cuales la mitad son dibujos con rasgos distintivos y en la otra mitad usa letras. Estudiosos sobre el tema, señalan que Dalton prefería el uso de dibujos sobre letras a las cuales recurrió cuando el recurso de los dibujos simples se agotó, también en concordancia con la nomenclatura de J. Berzelius (1779-1848) que comenzaba a cobrar fuerza y de la cual el profesor inglés nunca estuvo completamente convencido.

⁶ Chamizo, J., *El maestro de lo infinitamente pequeño*, cit., p.39

⁷ Crosland, M., *Estudios históricos en el lenguaje de la química*, Coordinación de Humanidades, UNAM, 1988, p. 219.

Otro aspecto que también es fundamental señalar, es que Dalton utilizaba también su simbología para modelar la disposición espacial de los átomos en las sustancias compuestas, un hecho de gran importancia para el desarrollo de la química orgánica durante el XIX. El profesor británico mediante su simbología se aproximaba a la explicación del isomerismo en las moléculas⁸. En una de sus conferencias múltiples sobre teoría atómica (1835), él señalaba que la albumina y la gelatina son dos compuestos diferentes, pues aunque tienen el mismo número de “átomos últimos”, estos difieren en su disposición, para ello utiliza la siguiente representación de las moléculas.

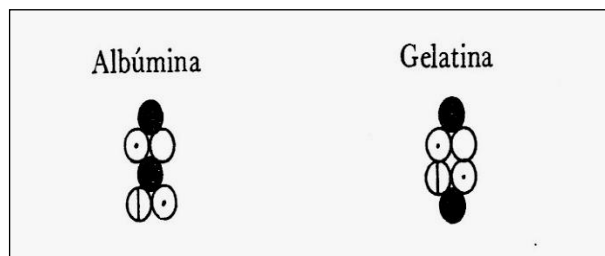


Figura 5. Diferencia estructural entre la albúmina y la gelatina, esquematizada por Dalton.

Importantes químicos como Wilhelm Hofmann (1818-1892) y August Kékulé (1829-1896) usaron la simbología de Dalton para explicar la estructura de algunas moléculas orgánicas relevantes. Dalton fue el primer químico en utilizar círculos con agujeros adecuados donde se incrustaban alfileres para unir a los átomos constituyentes de una molécula⁹. Si bien es cierto que la simbología de Dalton perdió la batalla frente a la nomenclatura de Berzelius, esta última es usada en la actualidad como lo sugería Dalton, es decir, a través de una modelación que involucra esferas para representar átomos y palillos para simbolizar la unión entre estos, en la química orgánica este modelaje constituye una auténtica tradición disciplinar.

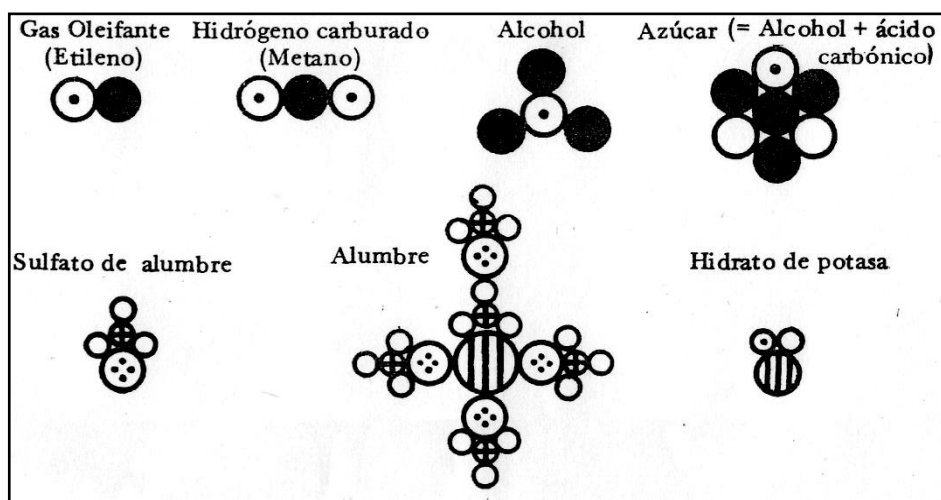


Figura 6. Representación de algunas sustancias compuestas importantes en New System of Chemical Philosophy, 1810.

⁸ Gee, W., Coward, F., y Harden, A., “John Dalton’s Lectures and Lectures Illustration’s”, *Memoirs of the Manchester Literary and Philosophical Society*, vol. 59 (12), pp. 1-66, 1915, p.42

⁹ Op.cit, p. 52

La simbología y en mayor medida el modelaje que difundía Dalton sobre las sustancias simples y compuestas, se convirtió en un importante e imprescindible recurso didáctico que allanó el camino en la explicación y predicción de importantes reacciones químicas, motivo por el cual su teoría atómica se consolidó como un paradigma imprescindible en la práctica química durante todo el siglo XIX y principios del XX. Una de las principales razones prácticas que aceleró la desaparición de la nomenclatura daltoniana, fue la dificultad que para las imprentas de la época representaba incorporar símbolos complejos a textos escritos, aunque sin lugar a dudas habría que reconocer las enormes ventajas epistemológicas que ofrecía la nomenclatura de Berzelius. Sin embargo, parece oportuno, más no del todo correcto, citar una posdata necrológica interesante impresa en 1844, que Crosland incorpora sobre el valor de la simbología usada por Dalton:

“Los símbolos de Dalton tenían una ventaja sobre los de Berzelius, en la medida que eran más internacionales, dado que, en su mayoría, no dependían de las letras iniciales en ninguna lengua. Así la fórmula $\oplus O^3$ podía reconocerse en todo el mundo como la representación del ácido sulfúrico”¹⁰.

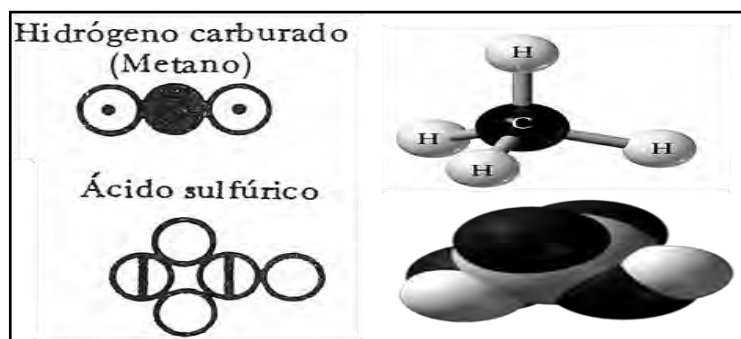


Figura 7. Comparación del modelaje de Dalton y el actual para las moléculas de ácido sulfúrico y metano.

3.2 Dimensión Didáctica: El modelo de Dalton

3.2.1. Reflexiones Docentes

i) Análisis disciplinar del contenido

El primer modelo atómico, el postulado por Dalton en los primeros años del siglo XIX, constituye un contenido muy significativo en la enseñanza de la química porque:

- A. Es un contenido donde puede introducirse la noción de modelo en un sistema cuya sencillez lo hace particularmente accesible para el estudiantado. La valoración y comprensión del carácter selectivo (no provisional) de los modelos en la química es un objetivo fundamental en la enseñanza de la ciencia porque fomenta en el alumnado una apertura hacia la innovación intelectual.

¹⁰Crosland, M., *Estudios históricos en el lenguaje de la química*, cit., p. 305

- B. Concreta el concepto de elemento; aquella sustancia que está formada por una sola clase de átomos. Esta noción permitió comprender las relaciones entre las sustancias mediante símbolos, fórmulas y ecuaciones.
- C. Permite la cuantificación de los pesos relativos de los elementos un concepto de gran valor práctico-racional para la química.
- D. Es un contenido que guarda una fuerte relación con la nomenclatura y la estequiometría. Este modelo es crucial para que el estudiantado comprenda el significado de la simbología y la química de las sustancias, la síntesis tradicional aún tan vigente, utiliza en gran medida la noción corpuscular de Dalton para establecer relaciones cuantitativas equivalentes (expresadas en gramos) entre reactivos y productos.
- E. Con este contenido permite introducir exitosamente el modelaje tradicional de las sustancias (esferas para los elementos y palillos para los enlaces), una representación de gran relevancia didáctica.
- F. Desde el punto de vista histórico, es un modelo que fue clave en la construcción de la tabla periódica, los átomos de Dalton llegaron a tener la propiedad de valencia y se caracterizaron por ser indestructibles e intrasformables unos en los otros. Tomaron sentido en la práctica química fundamentando el sistema periódico de Mendeleev¹¹. La idea de Dalton, fue desarrollada durante todo el siglo XIX por científicos muy destacados como J. Berzelius (1779-1848) –el primer referente de la actual nomenclatura química– Liebig (1803-1873), Kekulé (1829-1896), van't Hoff (1852-1911) y Wurtz (1817-1884).

Sin lugar a dudas el modelo atómico de Dalton es un contenido trascendental en la comprensión del desarrollo de la química como ciencia y específicamente en la evolución de la descripción científica-racional de la estructura de la materia, razón por la cual todos los libros de texto de química desde secundaria hasta universidad siguen referenciando en mayor o menor medida los trabajos de este notable químico inglés.

ii) Limitaciones del modelo de Dalton

- **La propiedad de indivisibilidad.** Un siglo después que Dalton postulara su teoría atómica, los físicos encontraron evidencias experimentales sólidas que confirmaron que el átomo es una entidad divisible, es decir, está formado por pequeñas partículas subatómicas, siendo las más importantes el electrón, el protón y el neutrón. En la actualidad gracias al auge y el éxito que han tenido los aceleradores de partículas en el estudio de la materia, se han descubierto más de 100 partículas subatómicas, siendo los *quarks* una de las más pequeñas de las que se tiene cuenta.

¹¹ Izquierdo, “Un nuevo enfoque en la enseñanza de la química: contextualizar y modelizar”, cit., p. 122

El átomo de Dalton al carecer de una estructura interna es incapaz de explicar satisfactoriamente los distintos fenómenos que involucran la noción de carga eléctrica y distribución electrónica como es el caso del enlace químico. Tampoco explica cabalmente a las reacciones químicas, sólo es útil su modelaje en la explicación de las relaciones estequiométrica de las mismas.

- **No todos los átomos de los elementos son iguales e indestructibles.** En la actualidad, es bien sabido, que la mayor parte de los elementos presentan isotopos, es decir, átomos de un mismo elemento con igual número de protones (mismo número atómico) pero diferente número de neutrones (distinto número másico), átomos iguales cuya constitución del núcleo es distinta. El inusitado desarrollo de la investigación en isotopos y la radioactividad ha permitido la transformación elemental mediante costosas reacciones de fisión y fusión nuclear.

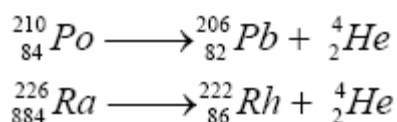


Figura 8. Dos reacciones típicas de fisión nuclear.

- **Los pesos relativos e importantes formulas propuestas por Dalton eran erróneas.** Dalton ni sus contemporáneos tenían forma de saber con precisión cuántos átomos de cada elemento están presentes en un compuesto binario menos en un terciario, hecho que los llevo a asumir un principio ambiguo como criterio de racionalidad denominado: “la hipótesis de máxima simplicidad”, según la cual, cuando se tenía un compuesto formado solo por dos elementos sea A y B, debía suponerse a menos de contar con evidencias experimentales que hicieran pensar lo contrario, que el compuesto era binario simple, es decir, era una molécula formada por un sólo átomo de cada elemento. Por usar este postulado Dalton reportó la fórmula del agua como HO y la del amoníaco como NH. Fórmulas erróneas lo condujeron a relaciones equivalentes erróneas y por ende a pesos atómicos relativos equivocados, en el oxígeno por un factor de dos y el nitrógeno por un factor de tres. Cuestión que ejemplifica de forma muy clara que los científicos brillantes también se equivocan.
- **Consideración del calórico.** Un aspecto desafortunado del trabajo de Dalton es que consideraba la oscura noción del calórico acuñada por Lavoisier años atrás. Esta noción estaba muy marcada en su simbología y fue otro de los motivos que propicio su desaparición repentina. Dalton representaba a cada átomo como una esfera con una capa externa rodeada de calórico que actuaba repulsivamente respecto a la atmósfera. Con el desarrollo de la termodinámica a mitad del XIX la noción del calórico desapareció por completo.

iii) Sugerencias docentes al abordar el modelo de Dalton

A continuación se presentan algunos aspectos docentes a considerar al tratar este contenido en el proceso de enseñanza de la química en el bachillerato:

- a) Los estudiantes generalmente comprenden y aceptan la representación de esferas diminutas en la descripción de los átomos, por ello, es necesario que los docentes hagan énfasis en el carácter evolutivo del modelo y que los átomos no son esferitas, sino solamente una forma de representación situada con sus ventajas y limitaciones. Esta argumentación debe proveer motivacionalmente confianza en el estudiantado en la explicación del orden físico a través de la actividad científica (*teórico-experimental*).
- b) Es importante señalar la vigencia de este modelo pues dota de sentido a la mayoría de las prácticas de química en el bachillerato e inicios de la licenciatura. La razón es que las masas que se asignan a los elementos en la actividad experimental acuñan de forma significativa el concepto de mol con las magnitudes de masa en la caracterización de la sustancias. Además, las leyes ponderales que se desprenden de la formulación atómica de Dalton son el puente necesario para la enseñanza de algunos contenidos estequiométricos de primer orden, tal es el caso, de la determinación de la composición porcentual elemental en los compuestos y la escritura correcta de las formulas mínimas y moleculares.
- c) Es importante mantener los contenidos estrictamente en el nivel molar y no mezclarlos acriticamente con modelos posteriores, pues esto puede suscitar confusiones y problemas asociados en el aprendizaje. Por ejemplo, evitar hacer uso de procesos de oxido-reducción o ácido/base donde es necesario la referencia de las cargas eléctricas, un tema importante pero que forma parte de otro modelo atómico. Se recomienda hacer uso de la clásica teoría de la valencia sin signo (la capacidad de combinación que tienen los elementos para reaccionar con otros) para explicar la atracción elemental y la formación de compuestos.



Figura 9. El modelo de Dalton dota de sentido las prácticas químicas escolares por su relación con la estequiometría.

- d) Es necesario elegir cuidadosamente los casos y las analogías adecuadas para tratar este contenido, la síntesis del agua y el amoníaco son dos casos tradicionalmente usados por la mayoría de los libros de texto para ejemplificar el significado de este contenido.

3.2.2 Propuesta Didáctica: “Los átomos pesan”

Acorde con la teoría educativa vigente, es adecuado proponer una metodología que dote de diversidad a la práctica docente, una metodología que considere la práctica discursiva analógica con la precisión requerida por parte del docente, la utilización de medios audiovisuales, actividades sensoriales, el trabajo en pequeños grupos, etc. La estrategia que se cita a continuación cumple con estos criterios, es una propuesta validada con estudiantes de bachillerato y reportada en la revista educación química en el año del 2005¹². Este diseño educativo está cimentado en la teoría del aprendizaje cooperativo, es decir en el trabajo en pequeños grupos. .

i) Representación de elementos, compuestos y reacciones

- La materia está formada por átomos. Se utilizan clips para representar a los átomos, una porción esquemática de plata puede verse simplificada con un cierto número de clips iguales en tamaño y color. Está claro que una porción tan pequeña con tan pocos átomos de plata, todavía no tiene las propiedades de la sustancia metálica, pero a nosotros lo que nos interesa es solamente mostrar de forma sencilla una representación esquemática, al establecer una analogía entre los pequeñísimos átomos y los clips.



Figura 10. Representación esquemática de un elemento químico a través de clips



- Los átomos de un mismo elemento son iguales entre sí y diferentes a los átomos de otro elemento. De acuerdo a este postulado en una barra de cobre y en una de aluminio los átomos respectivos son iguales entre sí, siendo los átomos de plata distintos a los de aluminio, como puede ser representado en la siguiente figura.

Figura 11. Representación de dos elementos diferentes.

- Los átomos de elementos distintos pueden asociarse formando compuestos. Los compuestos a su vez, pueden separarse en sustancias más simples. En química se suele representar a las reacciones con el símbolo de las sustancias reactantes, antes de la flecha, y los símbolos de las sustancias producto, después de la flecha. En este caso la reacción representada es:

¹² Balocchi, E., Modak, B., Martínez-M, M., Padilla, K., Reyes-C., F. y Garriz, A., “Aprendizaje cooperativo del concepto ‘cantidad de sustancia’ con base en la teoría atómica de Dalton y la reacción química”, **PARTE I**. El aprendizaje cooperativo. Anexo: cuadernillo ‘La reacción química y su representación’, *Educación Química*, vol. 16 (3), 469-485, 2005, pp. 478-481.

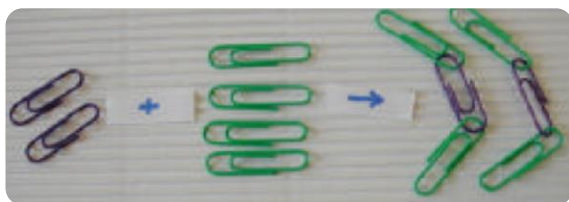
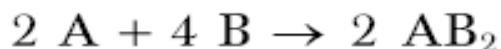


Figura 12. El número de átomos de partida (izquierda de la flecha), es igual al número de átomos presentes asociados (derecha de la flecha).

Con esta sencilla representación pueden tratarse dos conceptos esenciales de para la química: reacciones químicas y compuestos. Según este esquema una reacción química puede ser explicada como un proceso donde los átomos de las sustancias de partida se asocian entre ellos formando otras sustancias, en este punto es importante enfatizar que los átomos que representan a cada elemento nunca pierden su identidad. Ahora las nuevas sustancias están constituidas por la combinación de los átomos de los dos diferentes elementos involucrados, de esta forma puede argumentarse que los compuestos son asociaciones químicas de dos átomos diferentes como mínimo. Finalmente puede deducirse que el número de átomos antes de la flecha es el mismo que después de ocurrida la reacción aunque no su orden 4 verdes y dos morados en ambos casos y que los compuestos formados tienen una relación de combinación fija o constante 1 clip morado por dos verdes, es decir una relación 2/1, ejemplificándose a través de la deducción simple dos leyes ponderales que anteceden este modelo la ley de conservación de la masa y de las proporciones fijas o constantes.

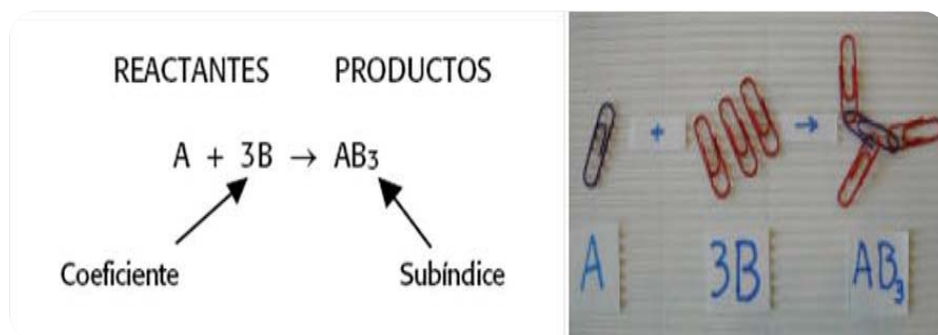


Figura 13. Representación de la reacción química en estudio. Es conveniente ser claro al explicar la función cuantitativa que representa el uso de coeficientes y subíndices en una reacción química ya que los estudiantes suelen usarlos de forma errónea.

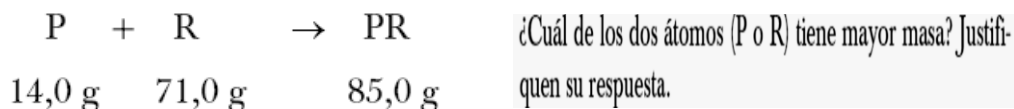
ii) Cálculos estequiométricos a través de la teoría atómica de John Dalton: Los pesos relativos de Puntigudio y Redondio¹³

A un ayudante se le entregaron cajas con clips diferentes y una balanza electrónica. Su tarea es aportar información cuyo análisis nos permita determinar la masa de cada tipo de clip. Supondremos que todos los clips de un mismo tipo son iguales y por lo tanto tienen la misma masa. El ayudante tomó porciones de clips diferentes y procedió a asociarlos siguiendo instrucciones que desconocemos, pero que pueden ser inferidas de los datos recogidos, los cuales tendremos la oportunidad de analizar. El ayudante determinó la masa de las porciones de clips una vez asociados. Recuérdese que usó este mismo método y reportó su tabla de pesos relativos a través de los pesos de combinación que determinó por gravimetría del agua. Los datos obtenidos por el ayudante se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de la reacción de puntigudio y redondio.

| "Elemento" | Símbolo | Masa de la porción/g | Proporción "Atómica" en el compuesto | Masa del "compuesto" formado/g |
|-------------|---------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| PUNTIAGUDIO | P | 14,0 | P/R = 1 | 85,0 |
| REDONDIO | R | 71,0 | | |

La reacción en estudio puede resumirse como sigue:



Una vez que los estudiantes han identificado que la reacción tiene una relación proporcional de combinación de 1/1 y la diferencia en las masas de P y R, se les presenta la relación de proporcionalidad equivalente a través del cociente:

$$\frac{\text{Masa utilizada de R}}{\text{Masa utilizada de P}} = \frac{71,0 \text{ g}}{14,0 \text{ g}} = 5,1$$

¹³ La secuencia para realizar el cálculo de los pesos relativos está resumida, puede consultarse a detalle en: Balocchi, E., Modak, B., Martínez-M., M., Padilla, K., Reyes, F. y Garriz, A., "Aprendizaje cooperativo del concepto „cantidad de sustancia“ con base en la teoría atómica de Dalton y la reacción química". PARTE II. Ideas previas sobre el concepto de reacción química. Anexo: cuadernillo „Masa atómica relativa“, *Educación Química*, vol. 16(4), 550-567, 2005, pp. 562-566.

Posteriormente, se les pide a los estudiantes que contesten si las siguientes aseveraciones son correctas o falsas, sobre el valor reportado por el cociente:

- por cada **5.1** átomos de **R** hay **1.0** átomos de **P** (F)
- La masa de **N** átomos de **R** es **5.1** veces mayor la masa de **N** átomos de **P** (V)
- La masa de un átomo de **R** es **5.1** veces mayor que **P** (V)
-

En este momento es recomendable hacer una síntesis de la información:

- El número de “átomos” de **P** y **R** que hay en 71,0 g de **R** y en 14,0 g de **P** no se conoce.
- En 71,0 g de **R** y en 14,0 g de **P** hay el mismo número de ‘átomos’.
- El “átomo” de **R** tiene más masa (es más “pesado”) que el átomo de **P**.
- “**N**” átomos de **R** tienen 5,1 veces más masa que “**N**” átomos de **P**.
- 1 átomo de **R** tiene 5,1 veces más masa que 1 átomo de **P**.

Con base a la información se pide a los alumnos que completen correctamente los siguientes reactivos:

- Si se fija el valor **1** para la masa del átomo de **P** ¿Cual sera la masa que le corresponderá al átomo **R**? **(5.1)**
- Si se fija el valor de **2** para la masa del átomo **P**, ¿ Cual sera la masa que le corresponderá al átomo **R**? **(10.15)**
- Si se fija el valor de **1** para la masa del átomo **R**, ¿Cuál será la masa que le correspondera al átomo **P**? **(0.2)**

Las masas anteriores se llaman “*masas atómicas relativas*” pues se determinan comparando las masas de un mismo número de átomos. En el caso estudiado sólo puede determinarse que la masa del átomo del elemento **R** es 5,1 veces mayor que la masa del átomo del elemento **P**. Para indicar las masas atómicas relativas se usara la expresión A_r ; de esta manera las masa atómicas relativas de los elementos **P** y **R** se indicarán como: $A_r(P) = 1$ y $A_r(R) = 5,1$ respectivamente. La información entregada no permite determinar la masa de cada uno de los átomos de estos elementos, expresada a través de un número acompañado de una unidad de medida como por ejemplo el gramo (g)

LA MASA ATÓMICA DEL ELEMENTO REDONDIO ES 5,1 VECES MAYOR QUE LA MASA ATÓMICA DEL ELEMENTO PUNTIAGUDIO. ESTO SIGNIFICA QUE LAS MASAS ATÓMICAS RELATIVAS DE LOS ELEMENTOS REDONDIO Y PUNTIAGUDIO SON RESPECTIVAMENTE $A_r(R)=5,1$ y $A_r(P)=1$



SI AL ELEMENTO **P** LE ASIGNAMOS EL VALOR **1,0** PARA SU MASA ATÓMICA, ENTONCES A LA MASA ATÓMICA DEL ELEMENTO **R** LE CORRESPONDE EL VALOR **5,1**. POR LO TANTO, DOS MUESTRAS DE **R** Y **P** CON UN COCIENTE DE MASAS DE 5,1 CUENTAN CON EL MISMO NÚMERO DE ÁTOMOS.

iii) Relacion entre peso relativos y calculo de masa molar

Es muy importante resaltar con los estudiantes que los pesos atomicos relativos son adimensionales, es decir, no poseen unidades, ya que como bien se ejemplifico en la secuencia anterior son el resultado del cociente entre dos pesos. Sin embargo, es una costumbre hasta nuestros días expresar los pesos atomicos con relación a unidades de referencia que hagan alusión a su utilidad práctica. Para ello se usa en la química el concepto de masa molar que no es otra cosa que el peso o masa atomica acompañadas de las unidades g/mol. La asociación del termino “molar” con el peso en gramos que refleja la masa atomica relativa de una sustancia es atribuida al quimico W. Ostwald (1853-1932), en uno texto publicado en 1900 define al mol de la siguiente forma: “*El peso normal o molecular de una sustancia expresado en gramos se debe llamar apartir ahora mol*”¹⁴.

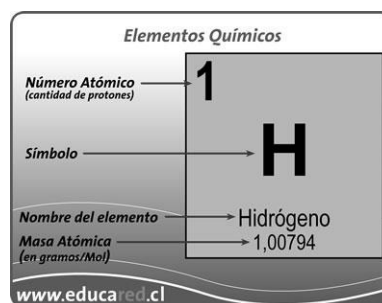


Figura 14. Casilla estandar del elemento hidrógeno. Cada casilla correspondiente a un elemento en la tabla periódica, contiene el dato de su peso atomico, el cual coincide numericamente con el de su masa molar, es decir un peso en unidades g/mol

La definición anterior implica identificar el concepto “mol” con la magnitud masa, cuestion natural en la actividad práctica que realiza el químico cotidianamente, pues es a través del peso molecular como se obtiene experimentalmente la masa de un mol de sustancia. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la acepción del mol se ha transformado, en 1961 fue corregida por la IUPAC, con la creación de la magnitud cantidad de sustancia. Actualmante la masa molar es la masa de un mol de entidades elementales (sea moleculas, átomos, iones, protones, etc.) constituyentes de una sustancia. Esta diferencia de significados debe contemplarla el docente y no mezclarla en la enseñanza de la teoría atomica de Dalton. La concepción moderna del mol alude al mundo de las partículas químicas o entidades elementales, la cual se consolido hasta el siglo XX. Como se menciono en apartados anteriores, se recomienda que al enseñar el modelo atomico de Dalton se referencié la definición macroscopica de Ostwald.

Tabla1. Masa molar de lagunas sustancias químicas.

| Sustancia | Masa Molar en g/mol |
|------------------|---------------------|
| H ₂ O | 18 |
| NH ₃ | 17 |
| CH ₄ | 16 |
| HCl | 36.5 |

¹⁴ Ostwald, W., *Grundlagen der anorganischen Chemie*, Leipzig, Germany: Engelmann, 1900.

Con la masa molar de los elementos, puede obtenerse la masa molar de los compuestos tomando en consideración las relaciones estequiométricas que establece su fórmula química. La masa molar de un compuesto se obtiene al sumar las masas molares de los elementos que lo constituyen. Estequiométricamente se puede hablar de dos tipos de fórmulas químicas, la mínima y la molecular, la primera es la reducción de una fórmula química a su mínima expresión entera, mientras que la segunda expresa el número de átomos de cada elemento que forma una molécula o compuesto. Con la composición elemental y el concepto de molaridad macroscópica los alumnos pueden determinar la fórmula química correcta de un determinado compuesto y viceversa.

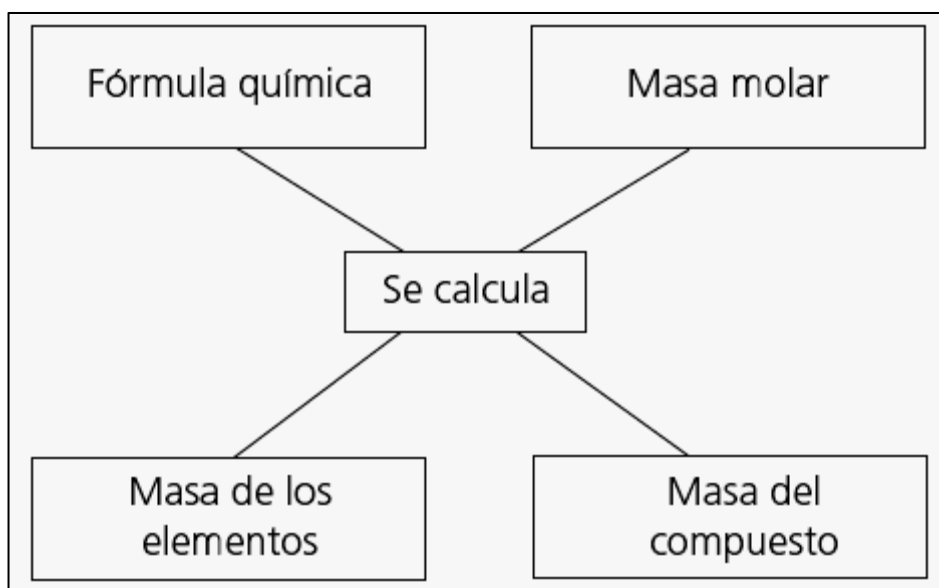


Figura 15. Con la fórmula química de un compuesto y las masas molares de los elementos que lo componen, se puede calcular la masa de cada uno de los elementos presentes en el compuesto y la del compuesto mismo¹⁵

¹⁵ Garritz, A., Gasque, L. y Martínez, A., *Química Universitaria*, Pearson Educación, México, 2005, p.201

3.3 Dimensión Histórica: “El desarrollo del modelo cinético molecular”

A pesar de que el modelo de Dalton se convirtió en un nuevo paradigma de gran utilidad científica, dividió a la comunidad química en dos corrientes de pensamiento; los atomistas (británicos) y los equivalentista (franceses). En general los especialistas en química del siglo XIX, aceptaban la evidencia empírica y la comodidad de usar pesos relativos para predecir y explicar compuestos, pero no así, la existencia real de partículas indivisibles. El átomo se entendía como "una unidad de reacción química, más que como una entidad material".¹⁶ Por ejemplo, algunos científicos renombrados como Jacob Berzelius (1779-1848), Gay Lussac (1778-1850) y Amedeo Avogadro (1776-1856) usaron las leyes de Dalton en términos de volumen y no de átomos.

Al tiempo que Dalton da a conocer su formulación atómica, el químico francés Gay-Lussac estudia cuidadosamente la síntesis del agua, reportando que dos volúmenes de hidrógeno se combinan con un volumen de oxígeno para obtener dos volúmenes de agua. Con el estudio de otras reacciones químicas como la síntesis del amoníaco y el cloruro de hidrogeno, Gay-Lussac demostraba que los volúmenes de combinación en una reacción que involucra gases también se encuentran en una relación sencilla de números enteros, y más aún, que la relación de volúmenes de combinación para obtener agua y amoníaco es diferente, por lo tanto, sus formulas también deberían serlo, es decir, es el primero en cuestionar que las formulas del agua y el amoníaco tuvieran validez experimental.

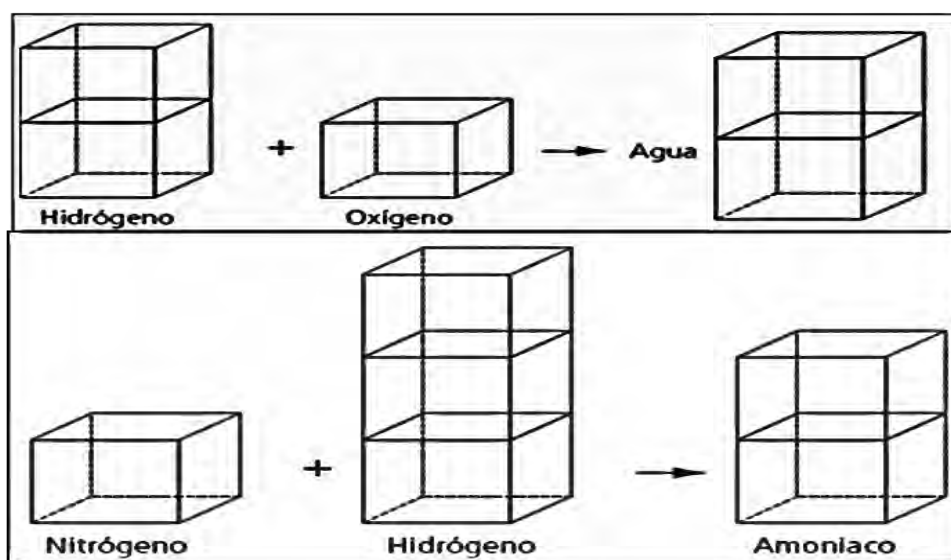


Figura 16. Relación de volúmenes de combinación de la síntesis del agua y el amoníaco

¹⁶ Dieguez, A., "Realismo y antirrealismo en la discusión sobre la existencia de los átomos", *Philosophica Malacitana*, No. 8, pp. 49-65, Universidad de Málaga, 1995, p.55

Un par de años más tarde, el italiano *Amedeo Avogadro*, retomó los datos reportados por Gay Lussac para establecer una hipótesis que permitía dotar de regularidad el establecimiento de fórmulas en los compuestos a partir de volúmenes de combinación, es la denominada hipótesis de Avogadro que puede ser resumida en dos apartados:

1. Las partículas últimas de los elementos químicos no tienen por qué consistir de un solo átomo, es plausible considerar que ciertos elementos presentan una estructura diatómica, pares de sus átomos forman agregados estables.
2. En las mismas condiciones de temperatura y presión, los volúmenes iguales de gases diferentes contienen el mismo número de moléculas.

La hipótesis de Avogadro incorporaba ideas novedosas que circulaban en el ambiente científico de la época, con contribuciones propias muy arriesgadas de probar. Dalton era ya un científico laureado por lo que a la primera oportunidad rechazó esta hipótesis, negando rotundamente que gases de moléculas grandes y diminutas pueden ocupar un mismo volumen, incluso calificó a este razonamiento como contrario de todo sentido común, además, argumentó que los trabajos de Gay-Lussac eran erróneos. Cuatro años más tarde el matemático francés André-Marie Ampere (1775-1836) de forma independiente llegó a las mismas conclusiones que Avogadro, al verificar experimentalmente la relación de proporcionalidad entre la presión y el volumen de un gas, Ampere en una carta a Bertholet fechada en 1814, explica que la razón de estos resultados se debe a que la distancia entre las moléculas de un gas es inmensa en comparación con su tamaño y que el volumen que ocupan estas moléculas es despreciable en relación con el volumen total de la muestra. Sin embargo, Ampere corre con la misma suerte que Lussac y Avogadro, por rivalidades profesionales, su trabajo fue relegado. Por si fuera poco la teoría electroquímica propuesta por Berzelius por esos años, no permitía si quiera considerar como posible la existencia de entidades diatómicas de un mismo elemento, pues cualquier combinación molecular solo tenía sentido por la afinidad de elementos distintos.

Los trabajos de Gay-Lussac y la hipótesis de Avogadro–Ampere tal como la referencian los franceses, se mantuvieron en la sombra por casi medio siglo. Lo cierto es, que la comunidad científica comenzó a mezclar de forma acrítica en su literatura los conceptos de volúmenes y pesos relativos de combinación, en el mejor de los casos algunas academias los reducían a un sinónimo de gran utilidad práctica, mientras que en otras, tal es el caso de la francesa y la británica, su diferenciación generaba épicas batallas de carácter filosófico, conceptual y hasta político. Estas acaloradas discusiones como era de esperarse, rebasaron las fronteras de la naciente química y pronto se convirtieron en un tema de primer orden para la física.

A partir de la década de 1850 Rudolf Clausius (1822-1888), James Clerk Maxwell (1831-1879) y Ludwig Boltzmann (1844-1906) formalizaron los postulados que actualmente se conocen como teoría cinético-molecular de los gases, cuyo éxito vino a reforzar –aunque también a corregir– el modelo atómico de Dalton.¹⁷ La idea general que sustenta a esta teoría es que los gases están constituidos por un gran número de partículas microscópicas que se encuentran en constante movimiento. El pionero de esta noción cinético molecular de los gases fue el físico y médico Daniel Bernoulli (1700-1782), quién postulaba en la segunda mitad del siglo XVIII que las moléculas que forman los gases son muy pequeñas y se encuentran separadas unas de otras por distancias mayores al valor de su diámetro. Fue él, quien por primera vez planteó que estas moléculas se mueven a altas velocidades y en su trayectoria pueden chocar entre sí debido a su movimiento rápido, errático, y desordenado.

La estructuración formal de la teoría cinética-molecular comenzó con la publicación en 1857 del escrito: “sobre la naturaleza del movimiento que llamamos calor” por el físico alemán Rudolf Clausius, donde se atribuía a las moléculas de los gases tres tipos de movimiento: el rectilíneo, el rotacional y el vibracional, esta consideración era muy útil para describir los tres estados físicos en los que se presentaba la materia, así como el paso de un estado a otro, introduciendo el tratamiento probabilístico en el análisis del movimiento molecular¹⁸. Posteriormente Maxwell, centró sus estudios al respecto monitoreando las velocidades del movimiento de las moléculas de un gas, proporcionando avances significativos al respecto. Finalmente Boltzmann completó el trabajo al aplicar el segundo principio de la termodinámica al movimiento molecular y acuñar el concepto de entropía en el estudio de los gases. El primer congreso de química celebrado en Alemania sería clave para la consolidación de esta teoría en el ámbito de la química y destrabar el agudo conflicto que sostenían atomistas y equivalentistas.

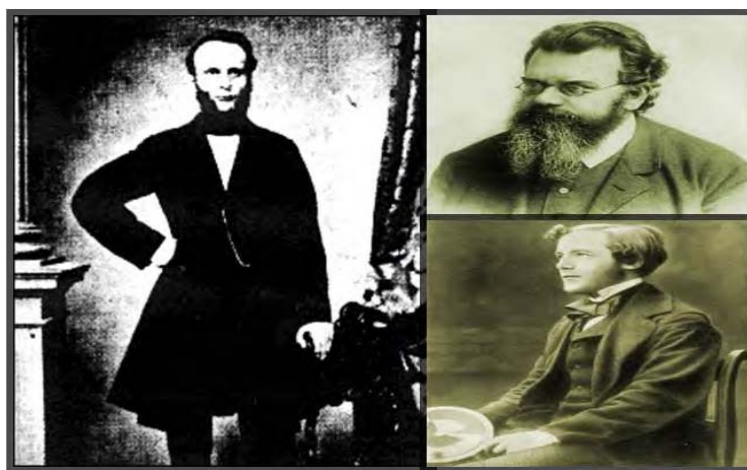


Figura 17. Rudolf Clausius (1822-1888), Ludwig Boltzmann (1844-1906) y James Clerk Maxwell (1831-1879).

¹⁷ Op.cit. p. 56

¹⁸ *Ibid.* p.60

En el año de 1860, se celebró en la ciudad de Karlsruhe el encuentro internacional de químicos, el cual, tenía como finalidad establecer consensos generales para establecer fórmulas de algunos compuestos que se consideraban importantes para la época (por ejemplo el ácido acético). A esta reunión acudieron las mejores academias de química de toda Europa, en este evento se debatió acaloradamente sobre la concepción física de los átomos, sin llegar a resultados relevantes, cuando el evento estaba por finalizar, el químico italiano Stanislao Cannizzaro (1826-1910) enraizó en los postulados de la teoría cinética molecular una brillante y elocuente exposición donde reivindicaba las ideas centrales de su compatriota Amedeo Avogadro, un hecho de gran relevancia histórica para la química.



Figura 18. Stanislao Cannizzaro (1826-1910) acuñó la hipótesis de Avogadro para obtener la primera tabla correcta de pesos atómicos.

En su intervención Cannizzaro exponía un método que involucraba la utilización de la ecuación general de los gases, la cual ya era conocida, así como la hipótesis de Avogadro para calcular los pesos atómicos de los elementos en estado gaseoso, el químico italiano presentaba una tabla esencialmente correcta sobre los pesos atómicos relativos. Con el transcurrir del tiempo el trabajo de Cannizzaro fue adquiriendo relevancia y utilidad ya que aclaraba con bases experimentales las dudas expuestas sobre la concepción científica de los átomos, diferenciando y clarificando la noción de átomos y moléculas, además permitía modelar las sustancias y sus reacciones químicas usando partículas y volúmenes de combinación de forma complementaria.

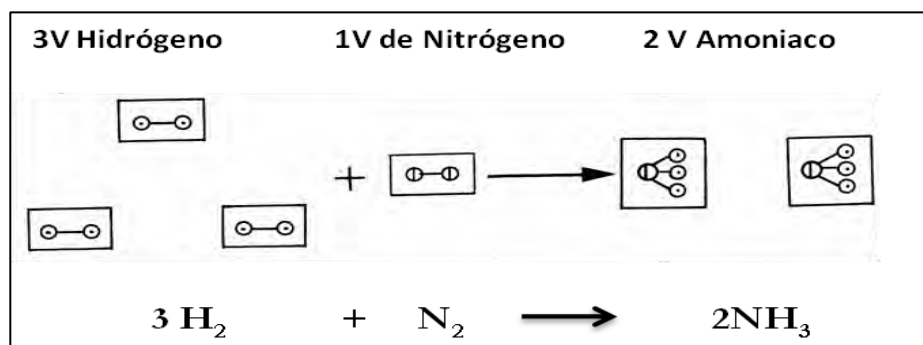


Figura 19. Representación de la síntesis de Amoniaco utilizando átomos y volúmenes de combinación

Con la tabla correcta de pesos atómicos las fórmulas químicas se fueron estableciendo convencionalmente. Entre los científicos que asistieron a este congreso, es de resaltar la presencia de un químico ruso de 36 años de edad, quien contribuirá de forma notable en el desarrollo de la química contemporánea, su nombre era Dimitri Mendeléyev (1834-1907) quien quedó influenciado por lo expuesto por Cannizzaro en esta reunión. A su regreso a Rusia, usó este método en el estudio de los pesos atómicos y su relación con importantes propiedades periódicas como la valencia (reportada en ese tiempo como la capacidad fija de los elementos para combinarse con otros), lo que desembocó con en el establecimiento de una estructura teórica para ordenar y representar a los elementos químicos, lo que hoy conocemos como tabla periódica.¹⁹

Un aspecto que es digno de mencionar es que con el nuevo paradigma el modelo cinético corpuscular consolidó la nomenclatura o el sistema de símbolos químicos tal como los conocemos ahora, su precursor fue el químico sueco Jacobo Berzelius, quien usó letras iniciales de nombres latinos para identificar los diferente elementos químicos también se auxilió de subíndices enteros para representar su relación elemental en los compuestos, esta nueva simbología fue rápidamente aceptada en Francia y posteriormente en Inglaterra cuando el químico alemán J. Liebig (1803-1873) la incorporó como un recurso didáctico de uniformidad en sus icónicos libros de texto de la segunda mitad del XIX, la simbología descrita en estas publicaciones guarda ya gran familiaridad con la actual, pues, se escribe el número de átomos con subíndices en lugar de índices por ejemplo MnO_2 , SO_3 , P_2Cl_3 .²⁰ La simbología química es uno de los principales aspectos que distinguen a la química de otras ciencias, ya que, es una herramienta que da sentido a su objeto de estudio: la creación de nuevas sustancias.

| Berzelius 1813 | | Liebig 1834 | |
|-------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Cu+O | C \dot{u} | | CuO |
| C+2O | C \ddot{c} | CO ² | CO ₂ |
| 2H+O | H \dot{h} | H ² O | H ₂ O |
| 2Al+3O | Ä \dot{a} | Al ² O ³ | Al ₂ O ₃ |
| K+Mn+4O | K $\ddot{M}\ddot{n}$ | KMnO ⁴ | KMnO ₄ |

Figura 20. Evolución de la formulación simbólica de Berzelius

¹⁹ Valdes, J., *La gran ilusión. Los Cuarks*, FCE, colección ciencia para todos en: <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/menu.htm>

²⁰ Crosland, M., *Estudios históricos en el lenguaje de la química*, cit., p. 322

A pesar del gran contribución que significó para la química la acepción corpuscular de la materia provista por la teoría cinética molecular y el establecimiento de los pesos atómicos para articular un lenguaje propio a través de fórmulas. La añeja polémica sobre la existencia real de los átomos resurgió con gran fuerza. Entre las voces más firmes que se alzaron para decir que la hipótesis atómica no era más que un modo de "salvar los fenómenos" estuvieron la del químico energetista alemán Wilhelm Ostwald (1853-1932) premio nobel de química en 1909 y otros científicos positivistas como Pierre Duhem (1861-1916) y Henri Poincaré (1854-1912).²¹ Para estos científicos y sus seguidores, la teoría atómica debía ser revisada y verificada a profundidad pues tropezaba con muchas dificultades, una de ellas era su intrínseca noción metafísica, que la ciencia no debía aceptar más. Por ejemplo el polémico Ostwald mencionaba que el valor didáctico y heurístico del atomismo estaba sucumbiendo a razón de la emergente termodinámica.²² Por ello la realidad última, objeto central de la ciencia debía ser la energía, átomos moléculas e iones debían ser tomados sólo como ficciones matemáticas para explicar las operaciones de la energía²³. Además, el nuevo "energetismo termodinámico" se oponía a la tradición mecanicista que había acompañado a la ciencia desde el siglo XVIII e intentaba ser una trinchera que pugnaba por una nueva organización estructural, conceptual y teórica de la ciencia, en particular de la química.



Figura 21. Wilhelm Ostwald (1853-1932). Férreo opositor a la teoría atómica, obtuvo el premio Nobel de química en el año de 1909

Para los químicos de finales del siglo XIX, la funcionalidad equivalentista del empirismo atómico parecía ser suficiente para sus fines, por lo que el ímpetu sobre investigaciones al respecto disminuyó drásticamente, las ideas de Ostwald y el auge de la termodinámica contribuyeron a tal hecho. El atomismo fue acogido y reivindicado apasionadamente por los físicos experimentales, que influenciados por los trabajos de Michael Faraday (1791-1867) sobre electrólisis, trataban de explicar con todo detalle la conductividad eléctrica de los gases en tubos de vidrio a alto vacío.

²¹ Dieguez, A., "Realismo y antirrealismo en la discusión sobre la existencia de los átomos", cit., p. 60

²² Op. cit., p. 61

²³ Nye, M.J., "The Nineteenth-century Atomic Debates and the dilem de an Indifferent Hypothesis", *Studies in History and Philosophy of Science*, Vol. 7, pp. 245-68, 1976.

Al inicio del siglo XX, la imagen mecánica de los viejos atomistas tenía sus días contados y la energía dejaría de rivalizar con la materia por una supuesta hegemonía ontológica, la nueva física que emergería, la mecánica cuántica unificaría ambos conceptos y revolucionaría por completo la explicación científica de la estructura de la materia.

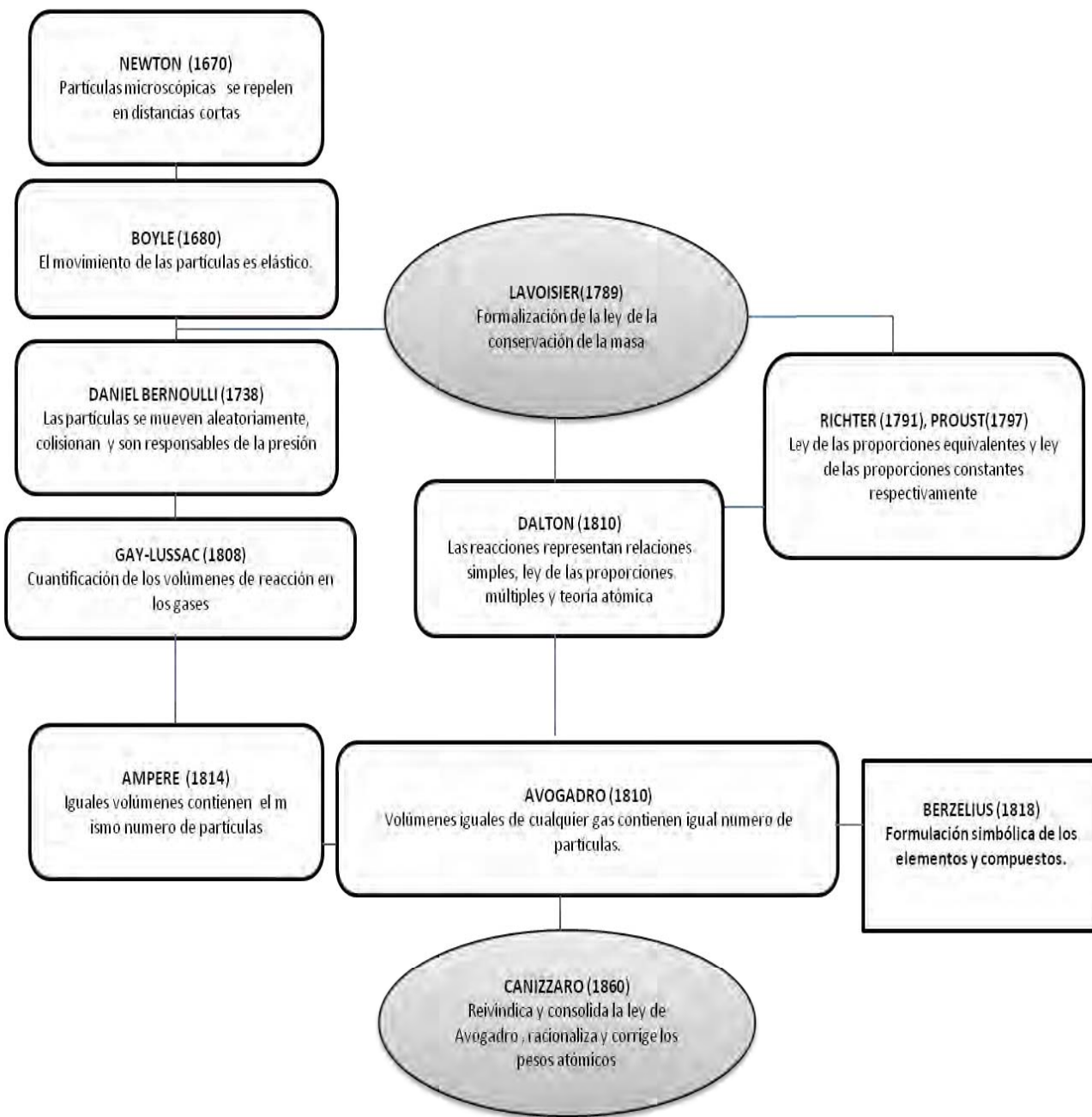


Figura 22. Mapa conceptual de las principales figuras históricas que contribuyeron al desarrollo del Modelo Cinético-Corpuscular²⁴

²⁴Harrison G. A., Treagust, D., "The particulate nature of matter: Challenges in understanding the Submicroscopic world", in *Chemical Education: Toward Research-based Practice*, Gilbert J.K., Kluwer academic Publishers, pp. 189-212, Netherlands, 2002, p. 195

3.4 Dimensión Didáctica: El modelo cinético corpuscular (MCM)

3.4.1. Reflexiones docentes

i) Análisis disciplinar del contenido

En el capítulo referente al análisis del CPC de profesores que imparten la materia de química III en el plantel “Gabino Barreda” de la ENP, se encontró, que el modelo cinético molecular (MCM) es un contenido de mucha importancia en la enseñanza de la química en el bachillerato. A continuación se cita algunas de las razones que respaldan este hecho:

a) Uno de los objetivos de la educación química en el bachillerato es que los alumnos comprendan la necesidad de interpretar de forma adecuada la visión científica sobre la materia y su transformación, lo que hace imprescindible la referencia del mundo microscópico. El modelo cinético molecular es una forma sencilla para introducir al mundo microscópico a los estudiantes, pues la síntesis didáctica de sus postulados revisten cierta simplicidad en su tratamiento cualitativo además de que su eficacia está probada en el abordaje explicativo de una extensa gama de fenómenos que ocurren en la vida práctica, tal es el caso del olor, la contaminación atmosférica, el comportamiento del humo, el funcionamiento de objetos comunes como globos y aerosoles, etc.

b) Permite explicar racionalmente los estados de agregación de la materia, así como algunos aspectos de los cambios físicos y químicos que experimentan. Tratando con ello de fomentar en el alumnado una visión más profunda sobre el comportamiento de la materia en sus diferentes fases. El MCM es un modelo fundamental para estudiar la naturaleza de los gases y para interpretar otros contenidos como el análisis y la representación de las reacciones químicas.



Figura 23. Algunas características de los estados de agregación de la materia

c) Históricamente es un paradigma que permite comprender algunos aspectos que contribuyeron en el desarrollo de nuestra disciplina. Importantes eventos químicos tuvieron lugar en la gestación progresiva de la teoría cinética corpuscular, tal es el caso de la formulación de la simbología química tal como la conocemos actualmente, la primera tabla de pesos relativos correctos que desembocó en un consenso para establecer regularidades en la escritura de las fórmulas químicas, la primera formalización de una explicación que comprende al binomio materia-energía, así como un progresivo avance en la modelación de las reacciones químicas que involucran gases.

ii) Limitaciones del MCM

El MCM es un contenido muy útil para estudiar las propiedades y el comportamiento de los gases, no así para líquidos y sólidos, ya que las estructuras moleculares de estos últimos requieren para un tratamiento adecuado la utilización del concepto de enlace químico, el cual, no puede ser explicado con profundidad con este modelo.

Si bien es cierto que el MCM asocia a las moléculas movimiento y rapidez, la modelación última de estas partículas sigue siendo la misma que en el caso del modelo de Dalton, esferas microscópicas carentes de estructura interna razón por la cual sigue contemplando el principio de indivisibilidad atómica, lo que lo hace un modelo inválido no solo en la explicación de los enlaces sino también de otros contenidos químicos tales como las propiedades periódicas.

iii) Sugerencias docentes al abordar el MCM

a) Se recomienda presentar el MCM de forma cualitativa a través de sus tres postulados:

- I. La materia está formada por pequeñas partículas que no podemos ver, llamadas moléculas.
- II. Las partículas se encuentran en continuo movimiento aleatorio, es decir, poseen distinta rapidez y se mueven de forma caótica, frente a la apariencia estática con que se nos presentan.
- III. Entre las partículas no hay absolutamente nada, sólo espacio vacío, frente a la apariencia continua con la que la percibimos.

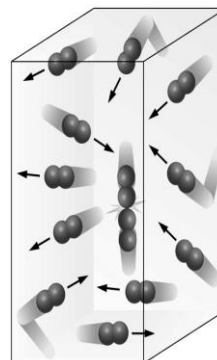


Figura 24. Representación del volumen de un gas

Además de estos tres postulados sería válido resaltar otra idea general poco acentuada o relegada a segundo plano en la literatura con respecto a este modelo, y es aquella que considera que las partículas en cada uno de los diferentes estados pueden interactuar entre sí con fuerzas de mayor o menor intensidad. Por ejemplo, una diferencia importante entre los gases y la materia condensada (líquidos y sólidos), es que

en el último caso las partículas se mantienen unidas por una o más fuerzas de interacción atractiva.

- b) Es importante señalar como característica distintiva en este modelo la distancia entre las moléculas para cada estado de agregación. Por ejemplo, en los gases la distancia es tan grande entre las moléculas y su tamaño tan diminuto que la mayor parte del volumen que ocupa un gas en un sistema es espacio vacío, por lo cual, los gases tienen las propiedades de expansión y compresión. Debe aprovecharse de forma crítica las ventajas didácticas que ofrece el MCM en el tratamiento de los gases y elucidar su relación con las tres variables que lo caracterizan; presión, volumen y temperatura.

| GASES | LÍQUIDOS | SOLIDOS |
|---|---|--|
| Las distancias entre las moléculas es muy grande | La distancia entre las moléculas es pequeña | La distancia entre las moléculas es pequeña |
| Las moléculas se encuentran en constante movimiento, lo que origina colisiones múltiples y elásticas. | Las moléculas se mueven en distancias muy cercanas unas de las otras sin ocupar posiciones definidas | Las moléculas vibran u oscilan dentro de un espacio fijo. |
| Las entidades de los gases no se atraen no están sujetos ninguna fuerza atractiva | Existen fuerzas intermoleculares (débiles) de atracción que son las responsables de la estructura de los líquidos | Presentan fuerzas de atracción significativas que les proporcionan la cualidad de rigidez en un arreglo ordenado |

Figura 25. Caracterización de las moléculas en los tres estados de agregación

- c) Utilizar de forma completa y adecuada el concepto de “mol”. En el modelo anterior (Dalton) se sugería usar este concepto solamente en su sentido macroscópico, es decir, relacionado con el peso relativo de los elementos y sustancias. Cuando se trate el MCM habría que aclarar que después de la obtención de la primera tabla de pesos relativos correctos (Cannizzaro-1860) y la consolidación del MCM, el interés de los químicos se centro en la cuantificación de las moléculas que constituían a las sustancias sobre todo a los gases. Para ello el concepto de mol tal como lo definiera la IUPAC en 1961 es de gran utilidad: “La cantidad de sustancia es proporcional al número de entidades elementales (átomos, moléculas, partículas, etc) -especificadas por una fórmula química- de las cuales la sustancia está compuesta. Su unidad básica es el mol (...)”²⁵.

Gracias a esta noción del mol es posible obtener de forma correcta la cuantificación estequiometrica no solo en peso (dimensión macroscópica) sino también en entidades elementales (dimensión microscópica) usando el factor de proporcionalidad denominado numero de Avogadro [$6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$], el cual, fue reportado correctamente en 1909.

²⁵ Guggenheim, E., *Thermodynamics. An advance treatment for chemists and physicists*, Amsterdam: North Holland Physics Publishing, 1986.

El concepto mol requiere de una concepción plena del papel que juegan las partículas químicas en la constitución y transformación de la materia, así como la diferenciación y buen manejo de dos planos de realidad el macro y el micro, para poder explicarles a los estudiantes que un mol de agua son 6.02×10^{23} moléculas de H_2O (nivel micro), y su peso es de 18 gramos (nivel macro).

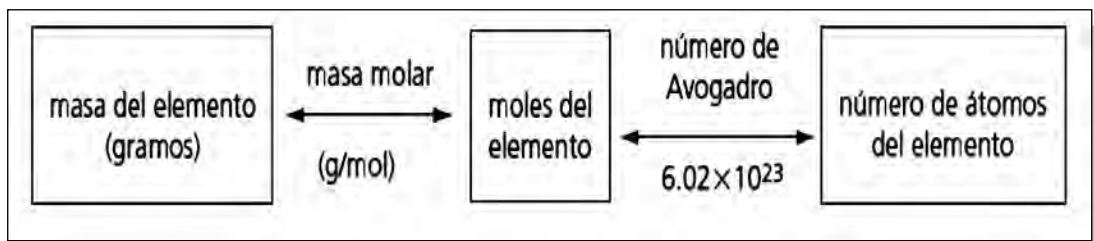


Figura 26. Relación entre la masa de los elementos y la cantidad de sustancia del elemento; relación entre la cantidad de sustancia y el número de átomos de un elemento²⁶.

Con los conceptos de mol y cantidad de sustancia es posible conocer el número de partículas químicas que contiene cualquier material, por ejemplo, hoy en día se sabe que un litro de gas en condiciones ambientales usuales de presión y temperatura contiene varios miles de trillones de moléculas, una magnitud enorme y difícil de concebir.

- d) Con frecuencia las teorías de las partículas se enseña aislada. Es importante vincular la terminología de las partículas para otras situaciones de enseñanza, tal es el caso de cuando se habla de reacciones químicas, por ejemplo “las partículas de sodio” y “las partículas de cloro”, en lugar de usar solo el nombre de los elementos. Esto bastara de momento, y la diferencia entre átomos y moléculas se puede abordar después.

Finalmente, se recomienda proporcionar a los estudiantes una idea del tamaño de las moléculas, mostrando su pequeñez con analogías gráficas de entidades pequeñas que no podemos ver a simple vista como células de tejidos, virus y bacterias.

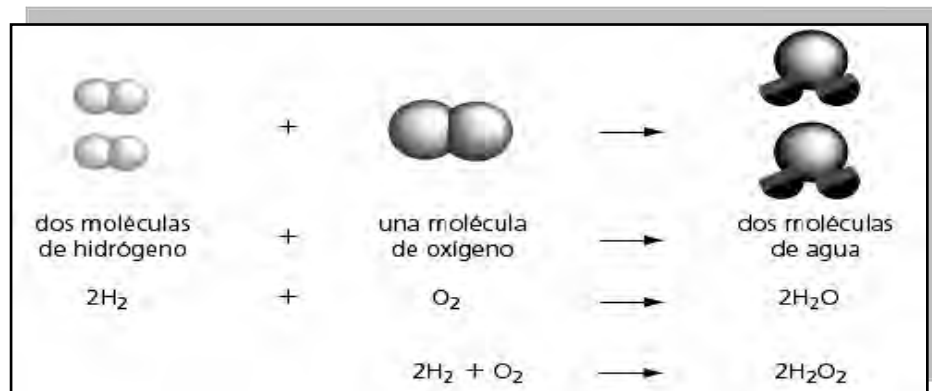


Figura 27. Modelación de la síntesis del H_2O con los postulados del MCM.

²⁶ Garritz, A., Gasque, L. y Martínez, A., *Química Universitaria*, cit., p. 201

3.4.2 Identificación de concepciones alternativas sobre el MCM

El posicionamiento actual en la enseñanza de las ciencias, considera entre otros aspectos, los puntos de vista que tienen los estudiantes sobre diversos fenómenos a los que la ciencia da una explicación racional²⁷. Actualmente en la literatura existen gran cantidad de trabajos que informan sobre las ideas previas o alternativas que se han identificado en estudiantes de todos los niveles educativos sobre la noción corpuscular de la materia, específicamente sobre los gases. A continuación se cita de forma breve las que consideramos más relevantes.

La investigadora británica Vanessa Kind²⁸ en el año 2004, publica un texto donde agrupa en cuatro apartados las ideas previas que sobre el MCM se han identificado en estudiantes de secundaria y bachillerato,.

1. **La materia es continua.** La idea ingenua de continuidad de la materia se basa en el principio “ver para creer”. Las partículas no pueden verse, así que, estas no necesitan existir para el estudiantado, por lo que proporcionan explicaciones a través de variables macroscópicas asociadas a esa noción de homogeneidad de la materia como el peso o masa, densidad, sus estado de agregación, etc. El modelo continuo de la materia es tan poderoso que incluso después de haber sido trabajado con anterioridad en el aula, la mayoría de los estudiantes lo utilizan poco y de forma errónea.
2. **La noción de vacío.** Las ideas más problemáticas son aquellas que no tienen evidencia sensorial, tal es el caso de la existencia del espacio entre las partículas que constituyen un material. Se ha reportado que aún cuando los alumnos muestran signos progresivos en la asimilación del modelo corpuscular, se les dificulta, concebir la noción de vacío. Algunas encuestas muestran que cuando se les pregunta a los estudiantes; ¿Qué hay entre las partículas? La mayoría responde que algo que puede ser polvo, mugre, gérmenes, vapores desconocidos, aire, etc. En estas publicaciones también se menciona que proveer a los estudiantes de evidencia visual podría contribuir a superar esta problemática.
3. **Las “fuerzas” explican cómo se mueven las partículas.** Se ha demostrado que los estudiantes argumentan el movimiento e importantes propiedades como los estados de agregación con fuerzas de atracción y repulsión. En la descripción de los gases los estudiantes suelen asociar las fuerzas de atracción con las colisiones moleculares y a las fuerzas de repulsión con la distribución uniforme de las partículas. Este tipo de acepciones sobre las fuerzas de atracción y repulsión dificulta el aprendizaje de las ideas científicamente correctas acerca de los cambios de estado y el enlace químico, las cuales implican interacción entre partículas.

²⁷ En el apéndice 2 se muestra una justificación más amplia sobre la relevancia de las “concepciones alternativas” en el proceso de enseñanza- aprendizaje de la enseñanza de la química.

²⁸ Kind, V., *Mas allá de las apariencias: Ideas previas de los estudiantes sobre conceptos básicos de la química*, Santillana- UNAM, México, 2004

4.0 La forma de las partículas puede cambiar. Los estudiantes atribuyen propiedades macroscópicas a las partículas, por ejemplo, las partículas pueden explotar, quemarse, contraerse, expandirse o cambiar de forma, afirmando que los átomos de cobre deben ser como rojizos, que si el naftaleno huele entonces los átomos de naftaleno deben de oler, y así sucesivamente. Este tipo de razonamientos ingenuos de no ser trabajados adecuadamente mediante estrategias didácticas pueden ser un serio problema en la comprensión del objeto de estudio de nuestra disciplina el cambio químico.

3.4.3 Propuesta didáctica en la enseñanza del MCM

La estrategia didáctica que aquí se presenta para abordar el MCM fue tomada del artículo: enseñando a comprender la naturaleza de la materia: el diálogo entre la química y nuestros sentidos de Miguel Ángel Crespo, Juan Ignacio Pozo y María Sagrario Gutiérrez Julián²⁹, 2004. Es una secuencia que involucra la realización de diversas actividades, como la resolución y explicación de problemas centrados en el aprendizaje de los alumnos. Ésta estrategia fue probada con alumnos de 14-15 años dentro del desarrollo de una unidad didáctica de estos contenidos en España. Los autores informan que el tiempo que les llevo desarrollar esta propuesta fue de 4 a 5 semanas (10 clases aproximadamente) obteniendo una mejorías significativas en lo referente a la asimilación de la noción corpuscular y los mecanismos implicados en los diferentes estados de la materia³⁰.

A) Introducción del modelo

Se sugiere que antes de citar los tres postulados fundamentales del MCM, se haya abordado previamente con los alumnos actividades dirigidas a describir e interpretarlas propiedades observables de la materia como los estados de agregación. Estas actividades previas tienen el objetivo de proveer al docente de algunas creencias intuitivas y limitaciones explicativas presentes en el grupo.

B) Aplicaciones del modelo

Primera Actividad. ¿Qué diferencias existen entre los tres estados de la materia?

Aplicación teórica del modelo a la explicación de las características de los tres estados de la materia. Se busca la relación entre el aspecto macroscópico y la interpretación microscópica.

- El profesor retoma las diferencias entre las propiedades de sólidos, líquidos y gases y la necesidad de buscar una explicación a sus diferentes comportamientos. Los alumnos proponen explicaciones (generalmente macroscópicas).

²⁹ Gómez, M., Pozo, J. y Gutiérrez, S., “ Enseñando a comprender la naturaleza de la materia: el diálogo entre la química y nuestros sentidos”, *Educación Química*, vol. 15 (3), pp.198-209, 2004

³⁰ Op.cit. p. 207

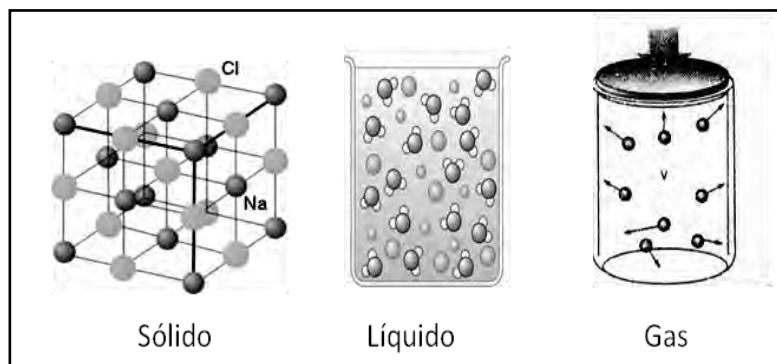


Figura 28. Representación de los tres estados de agregación de la materia.

- El profesor conduce el debate hacia la utilización de las partículas en la interpretación de la apariencia macroscópica de la materia en sus tres estados, es decir, de la forma propia de los sólidos, la fluidez de los líquidos y el hecho de que los gases tiendan a ocupar todo el volumen del recipiente. El profesor concluye mostrando la aplicación del modelo microscópico a los tres estados de la materia y resaltando aquellos aspectos que sólo se pueden explicar mediante este modelo.

Segunda Actividad. Interpretación de la difusión de un gas

Utilización de la teoría cinética en la interpretación de la difusión de los gases. El objetivo principal es introducir un ejemplo relativamente sencillo para los alumnos al que puedan aplicar las ideas básicas del modelo microscópico. Se elige un gas porque, según las investigaciones realizadas, es el estado de la materia en el que, por sus propiedades macroscópicas, anteriormente estudiadas, resulta más fácil de aceptar las ideas de movimiento y vacío.



Figura 29. La difusión del olor como hecho interpretativo del MCM

El profesor plantea qué ocurrirá si deposita una sustancia con olor penetrante en una esquina del aula (por ejemplo, un perfume). Se pide una predicción a los alumnos y se realiza la experiencia. Se pide a los alumnos, en sus pupitres, que avisen cuando les empiece a llegar el olor, para después pasar a analizar el problema. Previamente se cierran bien todas las puertas y ventanas y se pide a los alumnos que estén quietos, para que el aire de la habitación pueda considerarse en reposo. Generalmente, en esta primera experiencia casi todas las explicaciones obtenidas son de tipo macroscópico y recurren a un agente externo (generalmente, el aire) como vehículo de transporte o causa del movimiento. Por ello, el profesor debe resaltar la idea de que el aire estaba en reposo para reconducir el debate.

Tras la exposición de resultados el profesor plantea cómo han ido surgiendo los dos niveles de explicación macroscópico y microscópico y ayuda a establecer las diferencias entre ellos, insistiendo especialmente en la diferencia entre el movimiento intrínseco de las partículas (nivel microscópico) y el movimiento causado por un agente externo (nivel macroscópico). A partir de este punto, el profesor plantea cómo pueden darse siempre los dos niveles de análisis y cómo en las experiencias que se van a seguir realizando se va a intentar buscar siempre esos dos niveles.

C) Generalización del contraste de modelos a otros fenómenos

En esta fase se plantean una serie de experiencias, tanto prácticas como teóricas, que los alumnos deben intentar interpretar. El profesor plantea las tareas y pide a los alumnos que elaboren por escrito los dos tipos de explicación (macroscópica y microscópica), marcando sus diferencias y qué pueden explicar en cada caso. Posteriormente se debaten en el aula las distintas interpretaciones, de forma que los alumnos traten de encontrar los fallos y contradicciones y llegar a una explicación más completa e integradora.

Tercera Actividad. Comprensión y expansión del aire en una jeringa

El profesor reparte jeringas a los alumnos y pide que tapando el orificio de salida, traten de bajar o subir el émbolo. Da un tiempo para que jueguen y experimenten con ellas. Tras ello, plantea una serie de preguntas: ¿por qué se comprime el aire?, ¿por qué cuesta más bajar el émbolo cuanto más comprimido está?, ¿por qué vuelve siempre a su posición inicial?, ¿qué diferencias hay con la expansión, cuando se tira del émbolo hacia arriba?, ¿por qué encuentra dificultades para la expansión?, etcétera.

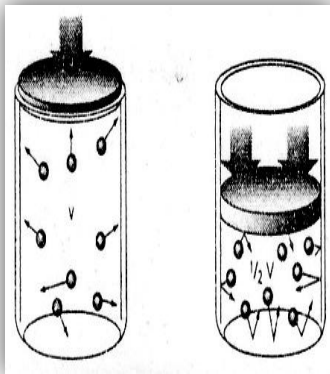


Figura 30. Cuando el volumen de un gas disminuye, la presión aumenta porque las moléculas de gas colisionan más frecuentemente con las paredes del recipiente

Posteriormente debe promoverse el debate en pequeños grupos con los estudiantes con la finalidad de que ellos mismos se aproximen a la explicación correcta. En cualquier caso, el profesor debe reconducir el debate hacia el objetivo correcto. De la misma forma, una vez analizado el problema se pide que traten de predecir qué ocurriría si la jeringa estuviera llena de agua o de arena y que expliquen el porqué de su predicción. Las ideas principales que se trabajan con esta tarea son: espacio vacío entre las partículas que componen el aire, imposibilidad de que haya más aire, movimiento de las partículas y distinta separación entre partículas en sólidos, líquidos y gases y, en consecuencia, distintas fuerzas de cohesión dependiendo del estado de agregación.

Cuarta Actividad. Disolución de una gota de tinta

Se pide que los alumnos, en sus casas, experimenten y observen durante un cierto tiempo lo que ocurre en un vaso de agua en el que se ha depositado una gota de tinta (u otra sustancia coloreada) y se ha dejado totalmente en reposo durante un tiempo largo. Se pide también que traten de explicar por qué tiene lugar el fenómeno observado. El profesor debe guiar el debate hacia la obtención de explicaciones correctas.

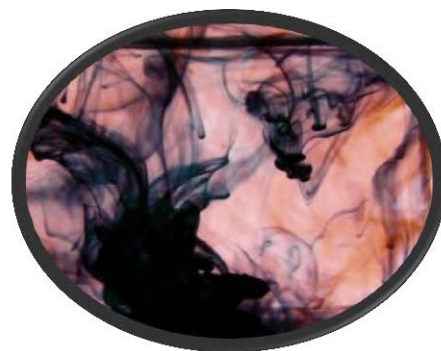


Figura 31. *Difusión de una gota de agua en tinta*

Las ideas principales que se trabajan son: movimiento de las partículas y necesidad de un espacio vacío. En este caso, es más difícil que con los gases aceptar el modelo microscópico por parte de algunos alumnos y surgen ideas alternativas (por ejemplo, las partículas de agua se tiñen con la tinta) que enriquecen la discusión entre los alumnos y que el profesor debe tener en cuenta.

D) Efectos en los gases de la temperatura.

En esta fase se introduce el efecto que el cambio de temperatura tiene sobre el movimiento de las partículas. Las actividades se trabajan en las mismas condiciones que en los casos anteriores.

Quinta Actividad. Efectos de la temperatura en los gases.

El objetivo de esta actividad es hacer que el alumno se dé cuenta de que debe existir una relación entre la temperatura de un sistema y el comportamiento de las partículas que lo componen.

Para comenzar, el profesor muestra un matraz con un globo sujeto en su boca. Calienta el recipiente y se observa cómo se va hinchando el globo. El fenómeno resulta bastante sorprendente para los alumnos. El profesor plantea la búsqueda de una explicación y propone a los alumnos que traten de hacer un dibujo en el que representen lo que ocurre.

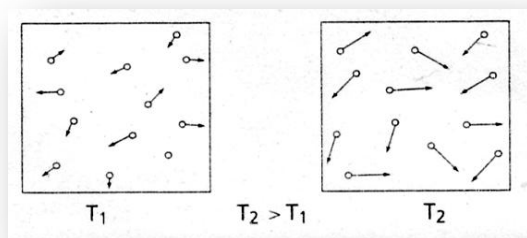


Figura 32. Cuando la temperatura aumenta, las entidades del gas se mueven más rápido y colisionan más veces con las paredes del recipiente.

Posteriormente se plantea el debate sobre las explicaciones propuestas, al igual que en los casos anteriores, dirigiéndolo hacia la necesidad buscar una relación entre el efecto observado y el cambio de temperatura. Puede también aprovecharse el hecho, de que mientras los alumnos trabajan el globo vuelve a deshincharse y plantear la necesidad de que la explicación propuesta sea coherente para los dos fenómenos.

Como bien puede observarse, esta propuesta de tratamiento didáctico está basada en la teoría del cambio conceptual, por lo cual, enfoca casi todas las actividades realizadas en la diferenciación entre la descripción macroscópica (propiedades observables) y las microscópicas (lo no observable). De esta forma los postulados del MCM son usados para que los alumnos utilicen las dos aproximaciones, las contrasten y sean capaces de diferenciar los dos niveles de análisis, pero también de acuerdo con la hipótesis de que la integración jerárquica les permitirá redescibir representacionalmente el nivel macroscópico o perceptible en términos de modelos microscópicos³¹.

³¹Gómez, M., Pozo, J. y Gutiérrez, S., “Enseñando a comprender la naturaleza de la materia: el diálogo entre la química y nuestros sentidos”, cit., p. 204

3.5 Bibliografía

Balocchi, E., Modak, B., Martínez-M, M., Padilla, K., Reyes-C., F. y Garritz, A., “Aprendizaje cooperativo del concepto ‘cantidad de sustancia’ con base en la teoría atómica de Dalton y la reacción química”, parte I. El aprendizaje cooperativo. Anexo: cuadernillo ‘La reacción química y su representación’, *Educación Química*, vol. 16 (3), 469-485, 2005.

Balocchi, E., Modak, B., Martínez-M, M., Padilla, K., Reyes, F. y Garritz, A., “Aprendizaje cooperativo del concepto ‘cantidad de sustancia’ con base en la teoría atómica de Dalton y la reacción química”. PARTE II. Ideas previas sobre el concepto de reacción química. Anexo: cuadernillo ‘Masa atómica relativa’, *Educación Química*, vol. 16(4), 550-567, 2005.

Chamizo, J, *El maestro de lo infinitamente pequeño*, CONACULTA-Pangea, México, 1992.

Crosland, M., *Estudios históricos en el lenguaje de la química*, Coordinación de Humanidades, UNAM, 1988.

Dieguez, A., "Realismo y antirrealismo en la discusión sobre la existencia de los átomos", *Philosophica Malacitana*, No. 8, Universidad de Málaga, pp. 49-65, 1995.

Gallego, R. y Perez, R., “Una aproximación histórico epistemológica de las leyes fundamentales de la química”, *enseñanza de la ciencias*, vol. 8 (1), pp. 359-375, 2009.

Garritz, A., Gasque, L. y Martínez A., *Química Universitaria*, Pearson Educación, México, 2005.

Gee, W., Coward, F., y Harden, A., “John Dalton’s Lectures and Lectures Illustration’s”, *Memoirs of the Manchester Literary and Philosophical Society*, vol. 59 (12), pp. 1-66, 1915.

Gómez, M., Pozo, J. y Gutiérrez, S., “Enseñando a comprender la naturaleza de la materia: el diálogo entre la química y nuestros sentidos”, *Educación Química*, vol. 15 (3), pp.198-209, 2004.

Guggenheim, E., *Thermodynamics. An advance treatment for chemists and physicists*, Amsterdam: North Holland Physics Publishing, 1986.

Izquierdo, “Un nuevo enfoque en la enseñanza de la química: contextualizar y modelizar”, *Asociación Química Argentina*, vol. 92 (4/6), pp. 115-136, 2004

Kind, V., *Más allá de las apariencias: Ideas previas de los estudiantes sobre conceptos básicos de la química*, Santillana-Facultad de Química UNAM, México, 2004.

Harrison g. A. y Treagust, D., “The particulate nature of matter: Challenges in understanding the Submicroscopic world” in *Chemical Education: Toward Reaserch-based Practic*, Gilbert J.K., *Kluwer academic Publishers*, pp. 189-212, Netherlands, 2002.

Nye, M.J., “The Nineteenth-century Atomic Debates and the dilem de an Indifferent Hypothesis”, *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 7, pp. 245-68, 1976.

Ostwald, W., *Grundlagen der anorganischen Chemie*, Leipzig, Germany: Engelmann, 1900.

Valdés, J., *La gran ilusión. Los Cuarks*, FCE, colección ciencia para todos, 2ª edición, México, 1995.

CAPÍTULO IV LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA EN EL SIGLO XX

4.1. Dimensión Histórica

4.0 Al lector

En la dimensión histórica del este último capítulo se presentan los primeros modelos atómicos desarrollados a inicios del siglo XX—Modelo de Thompson y el modelos de Rutherford—. Se analizan también algunos trabajos que permitieron la consolidación de la mecánica cuántica, como la herramienta científica encargada del estudio de la estructura de la materia. En lo referente a la parte educativa, se muestra un análisis disciplinar de estos contenidos y se reflexiona sobre la utilidad que ofrece su inclusión formal en la enseñanza de la química del bachillerato. Finalmente se proponen algunas estrategias docentes para su tratamiento.

4.1.1 El descubrimiento del electrón y el modelo atómico de Thompson

Dos evidencias experimentales agudizaron el interés de los físicos por el atomismo. Por una parte la noción de que la materia está compuesta por cargas eléctricas, según lo reportado años atrás por Faraday y Arrhenius¹. Por el otro el descubrimiento de la radioactividad en 1896 por Becquerel, se revelaba como un fenómeno de interés público, la forma de luz que penetraba los objetos opacos se comenzaba asociar con la estructura y propiedades de los átomos de los elementos, aunque no se conocieran.

La caracterización de la conductividad eléctrica de los gases fue un factor clave en el rumbo que tomo la investigación atómica. Antes de que se lograra satisfacer este objetivo, debieron desarrollarse tres técnicas experimentales fundamentales: una bomba de vacío eficiente, un sello metal-vidrio que permitiera transmitir el potencial eléctrico a los electrodos dentro de la zona evacuada y una bobina de inducción para obtener las enormes diferencias de potencial requeridas². Los tubos Geissler diseñados en la Alemania a partir de 1860 cumplían con estos requerimientos. Físicos alemanes a finales del siglo XX reportaron la presencia de un haz que evidenciaba la emisión de rayos provenientes de la placa catódica de los tubos Gleisser, esto ocurría cuando el gas era casi totalmente desplazado por acción de un campo eléctrico. También se reporto que estos rayos podían penetrar hojas muy delgadas de materia que hallaban a su paso.³ El físico alemán Eugen Goldstein (1850-1930) fue el encargado de bautizar a estos rayos como “*catódicos*” mientras que el químico inglés William Crookes (1832-1919), proporciono la primera explicación racional para este hecho, él postulaba que se

¹ Cruz, Chamizo, Garritz, *Estructura atómica un enfoque químico*, Addison-Wesley, E.U.A,1987, p. 73

² Menchaca, R., *El discreto encanto de las partículas elementales*, FCE, 1996 en biblioteca digital ILCE : http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/068/htm/sec_6.htm

³ March, R, *Física para poetas*, 12ª edición, siglo XXI editores, México, 2003. p.197

trataba de moléculas de gas cargadas eléctricamente en el cátodo y posteriormente repelidas por la acción del campo eléctrico⁴. Estos hechos cautivaron la atención del físico inglés Joseph John Thomson (1856-1940), quien dedicaría sus posteriores trabajos a caracterizar la velocidad y trayectoria de estas partículas.

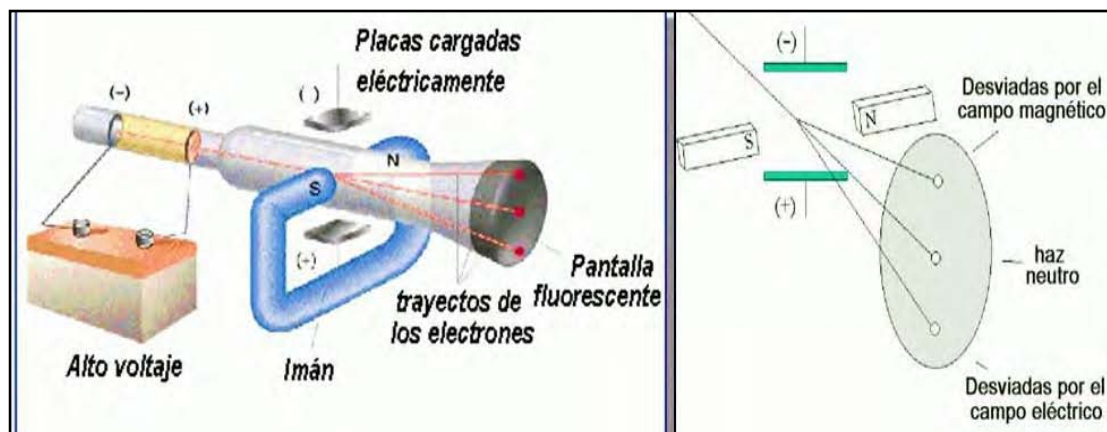


Figura 2. Dispositivo usado en el experimento de Thomson

Thomson estudió la velocidad de los rayos catódicos haciéndolos pasar por un dispositivo que comprendía la acción de campos eléctricos y magnéticos, como se muestra en la figura anterior. El primer resultado que encontró es que los campos magnéticos desviaban fácilmente el haz de rayos catódicos, mientras que se necesitaban magnitudes grandes de potencial eléctrico para realizar tal fin, cuestión que hacía suponer que su velocidad era muy alta, pues la teoría electromagnetismo apuntaba que la fuerza magnética era proporcional a la carga y la velocidad, mientras que la fuerza eléctrica solo actuaba sobre la carga de una partícula⁵. Con las evidencias obtenidas en el laboratorio de Cavendish de la universidad Cambridge, J.J. Thomson presentaría en 1897 un nuevo tipo de materia a la que primeramente llamo “corpúsculo”⁶ y posteriormente con mayor éxito electrón. Años más tarde el propio Thomson relataría después de largas reflexiones, las siguientes conclusiones de este trabajo:

1. Los átomos no son indivisibles, porque de ellos pueden arrancarse partículas cargadas de electricidad negativa.
2. Todas estas partículas son idénticas en cuanto a la masa y llevan idénticas cargas de electricidad negativa, sea cual fuere la especie de átomos de que salgan, y son elementos constitutivos de todo átomo.
3. La masa de dichas partículas es menos de un millonésimo de la masa del átomo de hidrógeno.⁷

⁴ Menchaca, R., *El discreto encanto de las partículas elementales*, cit., en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/068/htm/sec_6.htm

⁵ March, R., *Física para poetas*, cit., p. 197

⁶ Cruz, Chamizo, Garriz, *Estructura atómica un enfoque químico*, cit., p. 75

⁷ Thomson, J. J. *The discovery of the electron In: The Autobiography of Science*, ed. F. R. Moulton. & J. J. Schifferes, New York: Doubleday, 1960 pp. 503-506

Sin embargo, el trabajo de Thompson generaba confusiones y múltiples interpretaciones en cuanto a la relación masa/carga informada, lo que abrió una nueva ruta de investigación al respecto. Fue el físico norteamericano Andrews Millikan (1868-1953), quien determinó de manera exacta la carga del electrón, su experimento es un ejemplo claro de paciencia científica, pues involucraba mediciones sumamente delicadas que debieron repetirse una gran cantidad de veces⁸. Millikan reportó una carga de 1.591×10^{-19} C, el valor actualmente aceptado es de: $e = 1.6022 \times 10^{-19}$ C.

Millikan recibió el premio nobel por este trabajo en 1923. Finalmente años después se obtuvo la masa del electrón a través de la razón m/e establecida por Thompson y el valor de la carga eléctrica reportado por Millikan $-m_e = 9.1095 \times 10^{-31}$ kg, con lo que la nueva partícula quedaría caracterizada como hasta la fecha la conocemos.

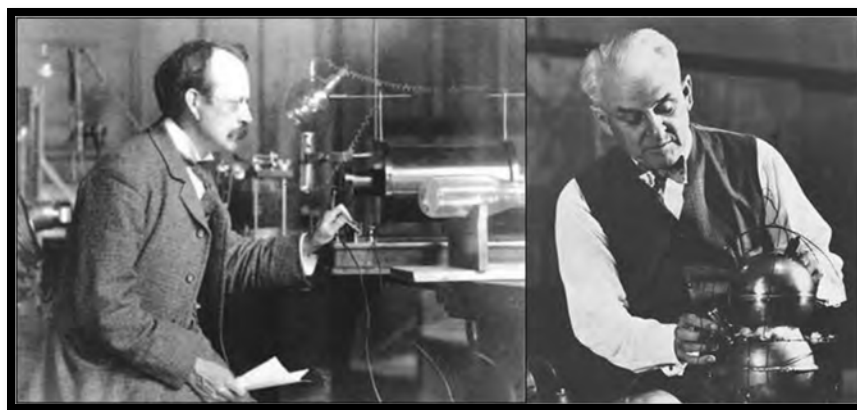


Figura 3. J.J. Thomson (1856-1940) y R. Millikan (1868-1953).
Precursores del primer modelo atómico

El descubrimiento del electrón hizo que comenzaran a especularse modelos hipotéticos del átomo, la investigación al respecto fue asumida con toda seriedad y no con simples fines ilustrativos como había acontecido durante el siglo XIX, los físicos comenzaron a buscar regularidades experimentales para conseguir este modelo. En el año de 1902 William Thompson Kelvin (1824-1907), propuso que el átomo tenía una estructura esférica uniforme de carga positiva dentro de la cual estaban presentes electrones y que este era eléctricamente neutro. En 1907 J.J. Thompson retomó el modelo atómico de Kelvin y propuso la famosa analogía de “pastel de pasas”⁹ para explicar su estructura. Thompson imaginaba que las pasas –electrones– se movían libremente en el pastel de carga positiva, sin embargo estas pasas tenían lugares específicos donde se encontraban en equilibrio, este estado era el resultado de la fuerza de atracción hacia el pastel y las repulsiones mutuas entre las pasas. La emisión de luz que producían algunos elementos era explicada como parte de una aceleración de los electrones al ser sometidos a una colisión. Una colisión provocaría que los electrones oscilaran

⁸ Cruz, Chamizo, Garriz, *Estructura atómica un enfoque químico*, cit., p. 79

⁹ March, R, *Física para poetas*, cit., p.200

como cuando un péndulo es perturbado de su estado de equilibrio, esta oscilación provocaría la aceleración de la carga y cuando las cargas se aceleran su campo magnético cambia, este cambio era la razón de la luz emitida, con la emisión de la radiación electromagnética se perdía la energía del movimiento y se regresaba al equilibrio. Más aun, Thompson y sus colaboradores trabajaron arduamente por describir la posición de los electrones para los primeros elementos y los vincularon con las propiedades de valencia química que se conocían.

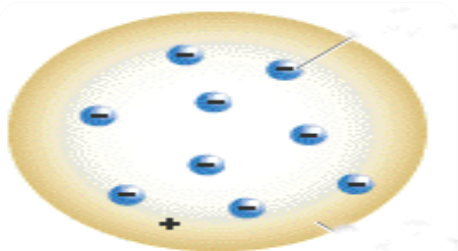


Figura 4. Representación Modelo atómico propuesto por Thompson en 1907

Sin embargo, su modelo no pudo describir la distribución electrónica de átomos con más de seis electrones ni explicar la periodicidad de sus propiedades químicas, tampoco dotaba de una explicación rigurosa y cuantitativa a las líneas de emisión de los espectros que se conocían a la fecha, por lo que en pocos años fue desechado. Es importante reconocer que la gran contribución de Thompson, el descubrimiento del electrón fue un hecho científico trascendental pues constituyó el primer ladrillo del modelo atómico actual.

4.1.2 El modelo Atómico de Rutherford

A la edad de 24 años llegó un joven estudiante de Nueva Zelanda al laboratorio de J.J. Thompson en la universidad de Cambridge, su nombre era Ernest Rutherford (1871-1937), el histórico laboratorio de Cavendish era ya un ejemplo de la secularización científica que comenzaba a permear a las principales instituciones educativas Europeas. Rutherford centró su trabajo en la identificación de la composición de las radiaciones. Como producto de este trabajo demostró que las partículas alfa eran núcleos de helio con dos cargas eléctricas positivas, lo que le valió el premio Nobel de Química en el año de 1908.

Un año antes en 1907 cuando revisaba un experimento realizado por su estudiante Ernest Marsden (1889-1970) para sondear emanaciones radioactivas en metales, encontró evidencias que le hicieron cuestionar el modelo atómico del laureado Thompson. El experimento de Marsden consistía en bombardear con partículas alfa un blanco extremadamente delgado, se eligió una laminilla de oro, la razón es que desde tiempos medievales se dominaba el arte de martillar este metal hasta una delgadez increíble, la laminilla utilizada tenía un grosor de 1×10^{-5} cm, esto era fundamental, porque incluso una hoja de

cartulina es suficiente para detener un haz de partículas alfa¹⁰, todo ello en una cámara de alto vacío para evitar el efecto de los átomos del aire.

Se esperaba que como resultado de este experimento, las partículas α fueran desviadas ligeramente como efecto repulsivo al interaccionar con las cargas positivas distribuidas uniformemente según el modelo de Thompson. Las alfas al ser mucho más pesadas y energéticas que los electrones, no serían perturbadas por estos y si así fuese su efecto sería despreciable, sería como un cañonazo en una tormenta de granizo¹¹. Para monitorear las partículas alfa, Marsden tenía que contar pacientemente las diminutas señales producidas en una pantalla fluorescente. Los resultados obtenidos no fueron muy impactantes la mayoría de las partículas α , se desviaban muy ligeramente de sus trayectoria pero unas pocas, presentaban ángulos de dispersión grandes. Razón por la cual Rutherford ordeno repetir y monitorear a detalle el experimento. Para ello se incorporo a la investigación el físico Alemán Hans Geiger (1881-1945) quien era un experto en los procesos de cuantificación de partículas y que fuera famoso por su militancia más tarde en el partido Nazi.

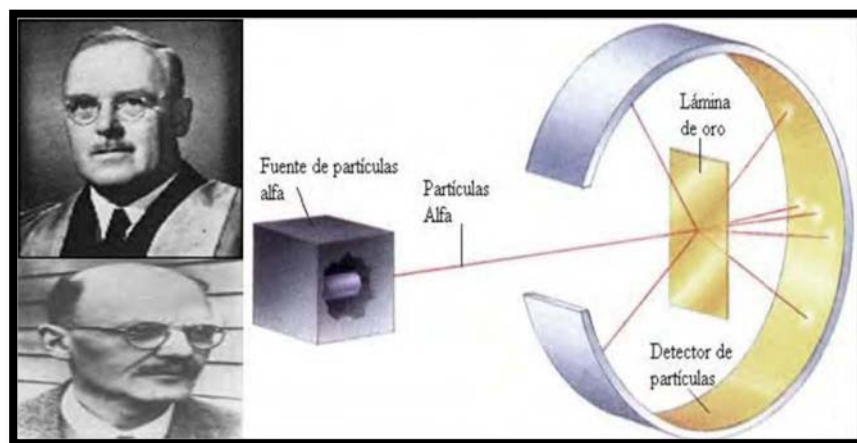


Figura 5. Ernest Marsden (1889-1970) y Hans Geiger (1881-1945).
Esquema del experimento de Rutherford

Los resultados se repitieron encontrando que algunas partículas α tenían ángulos de dispersión promedio de 90° . Rutherford escribiría: “Parece razonable suponer, que la deflección a través de un ángulo grande, es debido a un encuentro atómico simple”.¹²

Fue el más increíble evento que ha ocurrido en mi vida. Es tan increíble como si al disparar una granada de 15 pulgadas sobre una hoja de papel higiénico, esta rebotara y le golpeará a uno mismo.¹³

¹⁰ Ibid. p.209

¹¹ Ibid. p. 208

¹² Rutherford, E., “ the structure of the atom”, *Philosophical Magazine*, vol. 27, 1914, pp. 488-498

¹³ Cruz, Chamizo, Garritz, *Estructura atómica un enfoque químico*, cit., p. 127

Para el año 1911, Rutherford estaba convencido que el modelo de pastel de pasas propuesto por Thompson estaba superado. En su lugar suponía que la carga positiva estaba en una región muy pequeña del átomo al que llamo “núcleo”, lo que explicaba la poca frecuencia de ángulos de dispersión grandes, que eran ocasionados al aproximarse las partículas alfa a este núcleo. Rutherford a través de cálculos dedujo también que el núcleo tenía que ser 10,000 veces menor del diámetro de un átomo (cómo una canica en un estadio) y que allí se localizaría casi la totalidad de la masa del mismo. Alrededor del núcleo existiría vacío, esto explicaba la alta incidencia de partículas que no desviaron su trayectoria, mientras las que lo hicieron con ángulos de dispersión pequeños, se debía a un efecto acumulativo al interactuar con los electrones que deberían estar girando alrededor del núcleo.

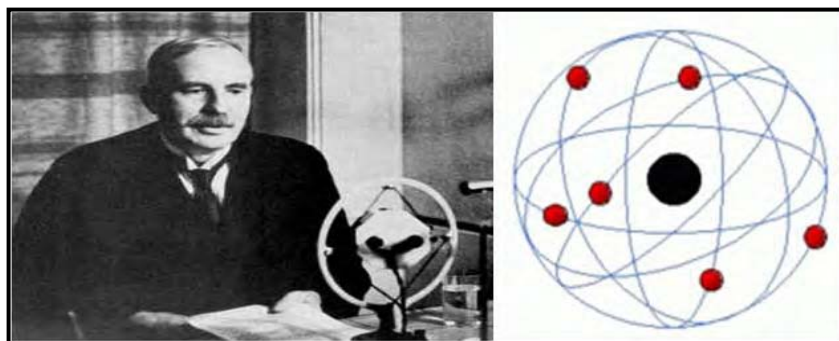
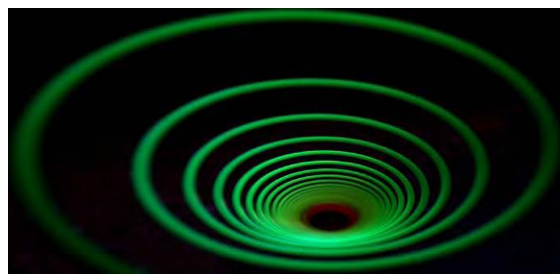


Figura 6. Ernest Rutherford (1871-1937) premio Nobel de química en 1908 y una ilustración de su modelo atómico.

De esta forma la imagen del nuevo átomo era clara, como lo escribiría el propio Rutherford, tras elegir para ejemplificar el átomo de uranio: “En el centro del átomo hay un núcleo diminutísimo en torno del cual se arremolinan un conjunto de 92 electrones, todos los cuales se mueven recorriendo orbitas determinadas y ocupando aunque de ningún modo llenando, un volumen muy grande en comparación con el núcleo”¹⁴. El modelo de Rutherford se comprobó para otros metales como la plata y el cobre.

El trabajo de Rutherford rápidamente fue severamente cuestionado, pues su descripción de los electrones era muy ambigua y contradecía los postulados de la física clásica y la teoría electromagnética.

Figura 7. El Modelo de Rutherford al explicar la estabilidad de los sistemas atómicos, contradecía los postulados clásicos de la mecánica y la electrodinámica por lo que pronto fue superado

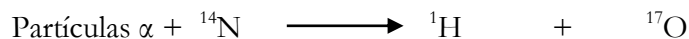


¹⁴ Rutherford, E., “ the structure of the atom”, cit.

En la teoría clásica, ningún sistema de cargas puntuales admite un equilibrio estático estable, además los postulados de Maxwell indicaban que una carga al ser acelerada debe dar lugar a una disipación de energía, por lo cual, si los electrones se encontraban girando todo el tiempo alrededor del núcleo, es decir, en aceleración constante, estarían emitiendo radiación electromagnética siempre y dando giro tras giro describirían orbitas cada vez más pequeñas hasta finalmente colapsarse con el núcleo. Entonces este modelo no era capaz de describir la estabilidad de los sistemas atómicos ni la razón de los espectros de emisión de los elementos. A pesar de las fuertes críticas que recibió Rutherford sobre su modelo atómico, era el físico experimental más respetado de aquel tiempo, sólo tenía comparación con Michael Faraday.

4.1.3 Descubrimiento del protón y el neutrón

Una vez descubierto el núcleo atómico la pregunta era ¿de qué estaba hecho? Ya desde los tiempos de Dalton y Faraday un siglo atrás, los pesos atómicos se referían al del hidrógeno¹⁵ como el más pequeño, razón por la cual, se conjeturó que los núcleos deberían estar constituidos por pequeñas unidades de este elemento. Pero para confirmar tal aseveración era necesario romper un núcleo y analizar sus fragmentos. Misión que fue emprendida por el propio Rutherford en 1919, al bombardear aire con partículas α , llevando a cabo la primera reacción nuclear artificial¹⁶:



En 1920 Rutherford publicaría los resultados de este experimento, confirmando que después de descomponer el núcleo del nitrógeno del aire, se obtenían núcleos de hidrógeno, y por lo tanto estos eran partes constitutivas del núcleo atómico. Se aceptó entonces al núcleo de hidrógeno como partícula fundamental, dándole el nombre de “protón”, palabra que proviene del griego *protos*, que significa primero. El protón es una partícula subatómica positivamente cargada con una masa alrededor de 1836 veces mayor que la del electrón. Su masa es de 1.6726×10^{-24} g y su carga elemental positiva de 1.602×10^{-19} C. El átomo al ser eléctricamente neutro debía poseer la misma cantidad de protones y de electrones.

Con el descubrimiento del electrón y el protón parecía que la estructura del átomo estaba completada, sin embargo existían algunas irregularidades en la descripción de los pesos atómicos que hacían pensar en la presencia de otras partículas. Esta especulación estaba basada en el hecho de que la masa de los átomos de hidrógeno era muy aproximada a la suma de las masas del electrón y el protón. Sin embargo, la masa de todos los demás átomos es mayor que la suma de las masas sus protones mas sus electrones. En 1932 un alumno de Rutherford en Manchester de nombre James Chadwick (1891-1974), monitoreo a detalle experimentos con radiación γ confirmando la presencia de otra partícula presente en el núcleo de los átomos a la que le llamo Neutrón. A través de experimentos posteriores se determino

¹⁵ Menchaca, R., *El discreto encanto de las partículas elementales*, cit., en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/068/htm/sec_6.htm

¹⁶Cruz, Chamizo, Garritz, *Estructura atómica un enfoque químico*, cit., p. 132

que esta partícula carecía de carga y su masa era casi igual al de los protones, 1.675×10^{-24} g. Sin embargo, en la actualidad es difícil saber con precisión cuando esta partícula se incorporó como la segunda partícula elemental constituyente del núcleo atómico. Lo que es un hecho es que para 1932, el rompecabezas del átomo había sido descifrado a través de tres partículas elementales: electrones, protones y neutrones.

4.1.4 El primer modelo cuántico del átomo

La mecánica cuántica es una rama de la física moderna, sus postulados o ideas básicas comenzaron a desarrollarse con el inicio del siglo XX, como consecuencia de una serie de hechos científicos, que cuestionaron y evidenciaron las grandes dificultades de la física clásica para interpretar y explicar racionalmente las propiedades del átomo y sus constituyentes así como las propiedades de la radiación electromagnética y su relación con la materia. De esta forma la mecánica cuántica pretende describir y explicar las propiedades de los nanosistemas llámense moléculas, átomos, partículas elementales (electrón, protón, neutrón...quarks), sus interacciones entre sí y con la radiación electromagnética.

El comportamiento de la materia y la radiación a escala atómica no es tema fácil de entender, mucho menos de dominar, pues reviste suposiciones principalmente de carácter teórico que chocan con nuestras concepciones cotidianas, que en su mayoría derivan de mirar al mundo y sus regularidades en una escala macroscópica. Por su carácter intrínsecamente complejo, la mecánica cuántica atrajo la atención de los mejores científicos de la primera mitad del siglo XX, erigiéndola como una elegante y majestuosa construcción intelectual. La importancia de su estudio radica en que actualmente es el paradigma más sólido del que se vale la ciencia para estudiar y referenciar a la materia, siendo una herramienta teórica imprescindible de importantes disciplinas científicas como la química y la ciencia de los materiales por citar algunas. Además constituye una revolución científica sin precedentes, su construcción y consolidación está llena de aspectos históricos crudos y fascinantes, cuya divulgación creemos deben ser parte de la cultura científica integral que deben poseer los estudiantes bachilleres y universitarios de nuestra UNAM.

i. Las Primeras ideas Cuánticas: La razón del cuanto

Muchos trabajos sostienen que la fecha del nacimiento de la teoría cuántica fue el 14 de diciembre del año 1900, cuando el físico alemán Max Planck presentó el trabajo "*Zur Theorie der Gesetzes der Energieverteilung im Normal-Spektrum*" ("Sobre la teoría de la ley de distribución de energía en el espectro continuo"), ante la academia alemana de física. En este trabajo Planck presentaba una relación empírica que explicaba de forma coherente los datos experimentales reunidos sobre la radiación electromagnética emitida por un "cuerpo negro", un fenómeno que había robado la atención de los científicos más de treinta años.

A finales del siglo XIX se realizaron numerosos experimentos para estudiar el comportamiento de sistemas donde los cuerpos estuvieran en equilibrio con la radiación a ciertas temperaturas, se descubrió el brillo intrínseco a diversas frecuencias de algunos cuerpos y que este era cambiante, por ejemplo, al aumentar el calor de una fragua, una barra de hierro pasa del rojo oscuro al rojo vivo, al naranja, al amarillo y finalmente al blanco. Para aclarar este comportamiento, se estudiaron minuciosamente la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro, este era un absorbedor perfecto de radiación en un gran intervalo de longitudes de onda a cualquier temperatura. Se usa la palabra negro para denotar a una sustancia que absorbe toda la luz que le llega y no refleja nada de ella, como por ejemplo el carbón. Una muy buena aproximación a un cuerpo negro es una cavidad que se encuentra a una temperatura fija, completamente cerrada excepto por una pequeña apertura, de área conocida, a través de la cual la radiación puede entrar o salir¹⁷. Según el esquema que se muestra a continuación cualquier radiación al entrar al sistema tendría muy poca probabilidad de ser reflejada, por lo que es dispersada en las paredes del interior por reflexiones repetidas, absorbiendo casi toda la radiación incidente, con lo cual este sistema es un excelente absorbedor, y por tanto, un cuerpo negro.

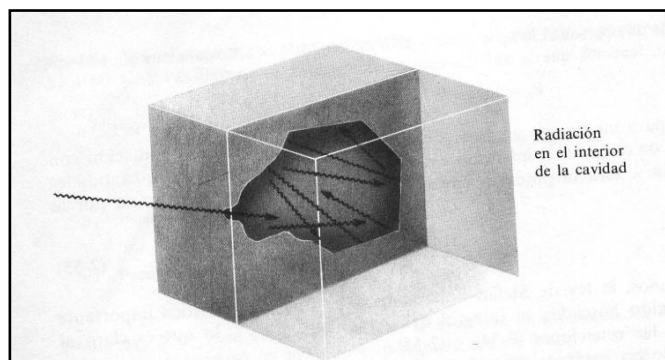


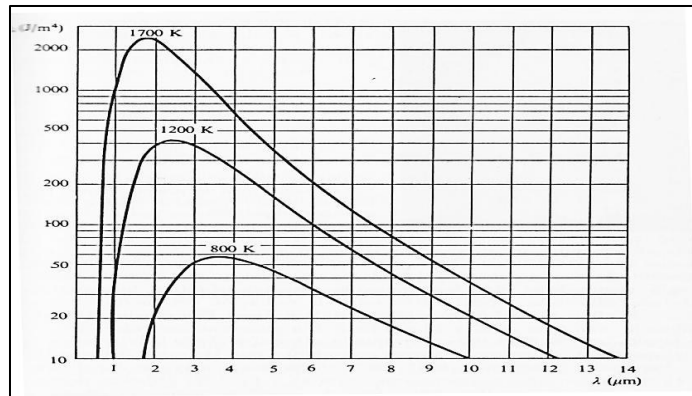
Figura 8. Una cavidad es una aproximación a un cuerpo negro.

Según los conocimientos atómicos con los que se contaba en esa época (modelo del pastel de pasas) un cuerpo negro estaría formado por átomos con electrones, los cuales, al oscilar serían los responsables de la emisión de radiación electromagnética. Ya que el cuerpo negro absorbe todas las longitudes de onda con igual probabilidad, y la emisión es sólo el proceso inverso, se esperaba que todas las λ fueran emitidas con igual probabilidad¹⁸. Entonces la emisión de este material debía implicar una energía que aumentara geométricamente. Los datos experimentales no corroboraron estas aseveraciones, se encontró que la intensidad de las emisiones disminuía a cierta λ máxima y que esta era una función de la temperatura, lo que constituía un verdadero problema que los postulados de la física clásica no podían resolver.

¹⁷ Ibid. p. 95

¹⁸ Menchaca, R., *El discreto encanto de las partículas elementales*, cit., en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/068/htm/sec_6.htm

Figura 9. Distribuciones experimentales de energía y longitud de onda a diferentes temperaturas de un cuerpo negro.



Dos físicos experimentales asumieron la tarea de dar explicación a este fenómeno usando refinados cálculos de la física clásica. En 1893, Wilhelm Wien (1864-1928) describe la distribución de energía del cuerpo negro cuando este emite la máxima energía, postulando lo que sería conocida como la ley o desplazamiento de Wien, que sostenía que la densidad de energía es una función que tiene un valor máximo para una longitud de onda inversamente proporcional a la temperatura¹⁹. Relación que era válida para describir frecuencias de emisión muy alta o λ pequeñas. Años más tarde, se realizaron experimentos para valores de las frecuencias mucho menores que las correspondientes a la región visible y se concluyó que la ley de radiación de Wien dejaba de ser válida en esos intervalos, al grado de ser errónea con los datos experimentales.

A mediados del año de 1900 el famoso físico inglés Lord Rayleigh (1842-1919), publicó un trabajo que al igual que Wien pretendía formular una teoría para explicar la energía de emisión del cuerpo negro donde aplicaba el teorema de la equipartición de la energía formulado por Maxwell, que consistía en asumir que las ondas eran una consecuencia de la oscilación de partículas cargadas propias del cuerpo negro, asignándoles un mismo valor de energía, obteniendo una distribución racional de las mismas a esta formulación se le conoce como ley de radiación de Rayleigh-Jeans.²⁰ Cuando se comparo el tratamiento matemático de esta ley con los datos experimentales, se comprobó que era coherente con la región de bajas frecuencias de radiación o λ grandes, precisamente en la región donde la ley de Wien fallaba. La formulación hecha por Rayleigh, no lograba describir la intensidad de la emisión de luz para las longitudes de onda correspondientes a la región ultravioleta, donde la energía presentaba una tendencia de aumento sin límite. Posteriormente se denominó catástrofe del ultravioleta a este comportamiento singular de la densidad de energía a longitudes de onda corta²¹.

Como una síntesis de lo anteriormente descrito, se puede afirmar que hacia la última mitad de 1900 se sabía que las ecuaciones de Wien y de Rayleigh no podían describir los resultados experimentales obtenidos para la distribución de la radiación de cuerpo negro,

¹⁹ Cruz, Chamizo, Garritz, *Estructura atómica un enfoque químico*, cit., p. 96

²⁰ Braun. E., *La faceta desconocida de Einstein*, FCE- colección ciencia para todos, 1997, p. 23

²¹ Cruz, Chamizo, Garritz, *Estructura atómica un enfoque químico*, cit., p. 96

haciendo uso de la física clásica. Parecía en cierto modo que ambas eran complementarias. Lo que hacía falta era una ley que para frecuencias grandes concordara con la de Wien, mientras que a bajas frecuencias concordara con la de Rayleigh²². Es cuando el alemán Max Planck entra a escena, el 19 de octubre de 1900 propone una ecuación que sintetiza y describe satisfactoriamente los resultados experimentales concernientes al comportamiento del cuerpo negro:

$$\mu_{\lambda}^p = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

donde μ_{λ} es una función matemática denominada densidad de energía que caracteriza la radiación electromagnética del cuerpo negro, c es la velocidad de la luz, k es la constante de los gases dividida entre el número de Avogadro (1.34×10^{23} J/K), h es la constante de Planck (6.6262×10^{-34} J. s) y T es la temperatura en K.

La pregunta era: ¿bajo qué postulados teóricos había construido Planck su ecuación?. La respuesta abriría una caja de pandora que derribaría el edificio de la física clásica construido durante más de tres siglos en lo referente a la explicación del mundo microscópico. Planck comprendió bien, que la mayoría de los complejos problemas matemáticos solo puede resolverse cuando ya se ha adivinado su solución²³. Empleó dos ingredientes para su tratamiento, la teoría electromagnética de Maxwell y sus amplios conocimientos sobre la termodinámica clásica-estadística, tomando como base una suposición teórica sumamente arriesgada, que le valió su trascendencia en el acontecer científico, supuso que la conversión de calor en luz no podía producirse en cualquier cantidad sino que se daba en forma de bloques cuyo tamaño dependía de la frecuencia producida.²⁴

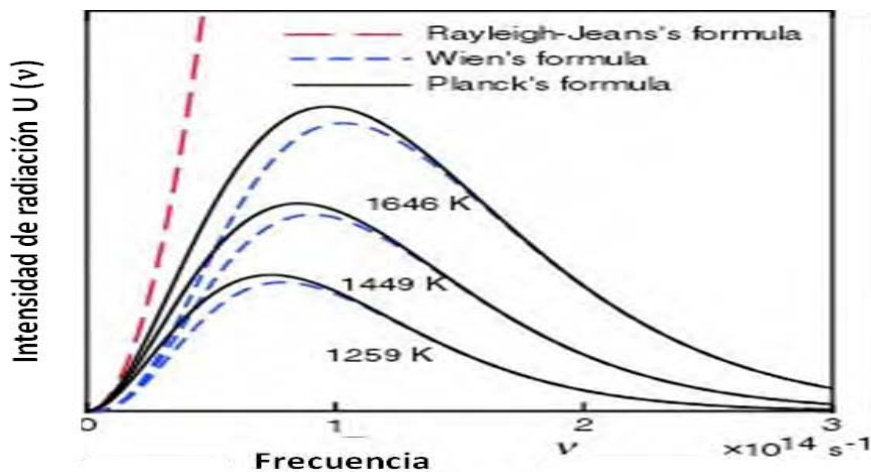


Figura 10. Comparación de las distribuciones obtenidas por Wien, Rayleigh y Planck al ajustar los datos experimentales correspondientes a la radiación emitida por un cuerpo negro.

²² Braun, E., *La faceta desconocida de Einstein*, cit., p. 24

²³ March, R., *Física para poetas*, cit., p.217

²⁴ *Ibíd.* p. 217

En otras palabras la energía de emisión y absorción producto de la oscilación de las partículas que constituyen al cuerpo negro se encontraba repartida en forma discontinua, en porciones finitas o pequeños paquetes de magnitud ϵ , a los que denomino “cuanto” o “quantum”. La cantidad más pequeña de energía calorífica que podía convertirse en luz de frecuencia ν estaba dada por la ecuación:

$$\epsilon = h\nu$$

donde h era presentada como una constante de proporcionalidad con un valor de de 6.6262×10^{-34} J. s, Planck también indico que sólo podían presentarse múltiplos enteros de esta cuantía, de tal forma que la energía de cada oscilador estaría descrita por $n h\nu$ ($n= 0,1,2,3\dots$), no siendo posible otro valor diferente²⁵. Con este postulado inédito, Planck logró establecer un puente y unificar las ecuaciones de Wien y Rayleigh, dando solución al problema del cuerpo negro. Sin embargo, el propio Planck era consciente que su trabajo respondía a una deducción meramente empírica cuyo significado físico era oscuro por lo que no le otorgo gran relevancia. Los físicos de su época asumieron la formulación como correcta, mostrándose muy renuentes a la idea de la cuantización. Planck describiría su trabajo al respecto de la siguiente forma:

“...o bien el quantum de acción era una magnitud meramente ficticia y, por lo tanto, toda la deducción de la ley de la radiación era ilusoria y un puro juego de formulas, o bien en el fondo de este método de derivar la ley de la radiación había un concepto físico verdadero. De admitirse esto último, el quantum tendría que desempeñar en la física un papel fundamental y anunciar el advenimiento de una nueva era, destinado a transformar por completo nuestros conceptos físicos que, desde que Leibniz y Newton introdujeron el cálculo infinitesimal, han estado basado en los supuestos de continuidad de todas las cadenas causales de acontecimientos.”²⁶

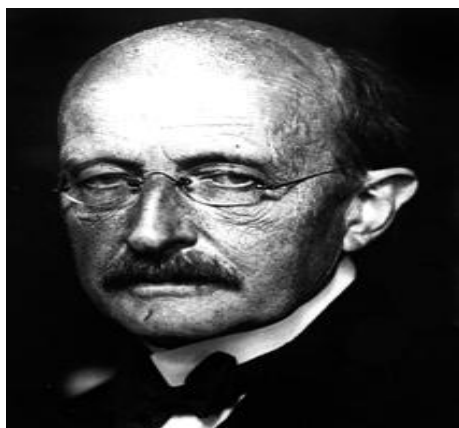


Figura 11. Max Planck (1858-1947). Fundador de la mecánica cuántica

²⁵ Cruz, Chamizo, Garritz, *Estructura atómica un enfoque químico*, cit., p. 104

²⁶ Mehra, J., Rechenberg, H., *The historical development of quantum theory*, Springer-Verlag New York Inc., vol. 1 (1), 1982

Las ideas de cuantización después de estar en tela de juicio por cerca de cinco años, serían retomadas y comenzarían a consolidarse dentro del seno de la física por los trabajos realizados por otro físico alemán e icono del pensamiento científico del siglo XX, el físico Albert Einstein (1879-1955) quien a través de la cuantización explicaría con toda lucidez el efecto fotoeléctrico. Finalmente es importante resaltar que Planck es un ejemplo de verdadera vocación científica, pues trabajó ardua y profesionalmente a pesar de que su vida estuvo colmada de fatales atrocidades.

ii. El Átomo de Bohr

En el año de 1911, otro físico eminente de nombre Niels Bohr (1885- 1962) fue atraído por el histórico laboratorio de Cavendish, aún dirigido por J.J. Thompson. Bohr durante su estancia trataba de traducir su tesis doctoral sobre la teoría electrónica de los metales del danés al inglés, con el objetivo de conseguir mayor audiencia, pero Thompson dio poca importancia a su escrito, Bohr siempre se manifestó distante y renuente al formalismo inglés que prevalecía en el Cavendish. Después de algunos meses conoció casualmente a Rutherford con quien entablo rápidamente una simpatía intelectual, cuestión que le obligo a visitar las instalaciones de la universidad de Manchester, de donde regreso predicando el evangelio del átomo nuclear²⁷. Este hecho molesto el ego de Thompson, por lo que en 1912, Bohr tuvo que partir a Manchester a culminar su estancia en Inglaterra.

La razón que condujo a Bohr a Inglaterra era su vocación por una serie de postulados e ideas nuevas denominada “teoría de los cuantos”²⁸, la cual, apenas comenzaba a sonar en los pasillos de las instituciones científicas británicas. Bohr confiaba que con la incorporación de esta teoría al modelo nuclear de Rutherford podría salvarse la explicación de la estabilidad de los sistemas atómicos. Su llegada a Manchester era considerada como un evento inusual, pues se conocía que Rutherford, el gran físico experimental sentía una gran aberración por colegas cuya formación era eminentemente teórica, como la de Bohr y cuando le preguntaban sobre los motivos de haber recibido a un joven teórico, Rutherford contestaba con el característico humor inglés: “Bohr es diferente. Él juega futbol”²⁹.

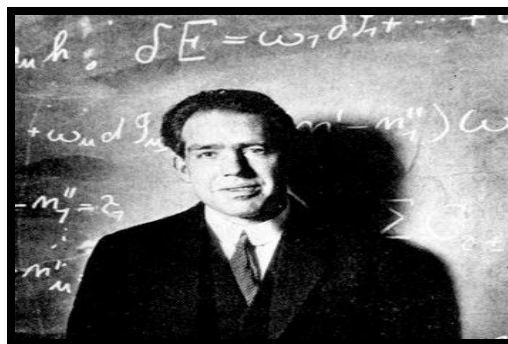


Figura 12. Niels Bohr (1885-1962), premio Nobel de física en 1922.

²⁷ March, R., *Física para poetas*, cit., p.214

²⁸ Ibid. p.215

²⁹ Ibid. p. 223

Su primera acción emprendida fue hacer funcionar el átomo nuclear, es decir, tratar de integrar las ideas de Planck y Einstein en la descripción del movimiento interno de los electrones, razón que lo llevo a postular que los electrones se encuentran distribuidos en el átomo en orbitas restringidas por hechos causales cuya explicación debería estar dada por la ecuación de Planck, $\epsilon = h \nu$. Bohr contaba con poco tiempo para continuar afianzando estas ideas, en el verano de 1912 se termino su beca de estancia en Inglaterra, realizo algunos cálculos pero sin datos experimentales regreso a Copenhague sin resultados sólidos.

En 1913 reinició su labor docente y abandono parcialmente el proyecto. Ese mismo año un espectroscopista de nombre Marius Hansen(1886-1956) quien fuera compañero de clase de Bohr, le preguntó si la teoría en que trabajaba podía explicar la fórmula de Jakob Balmer (1825-1898), la respuesta fue “¿Qué formula?” Hansen, aconsejó entonces a Bohr que la consultara³⁰. Cuando Bohr miró la fórmula, al igual que le sucediera a Planck años atrás, supo que había encontrado la solución del problema. Los datos espectroscópicos que se tenían sobre el átomo de hidrógeno y la fórmula de Balmer serían el respaldo experimental de su incipiente teoría.

Los espectroscopistas contaban con dos tipos de espectros los denominados espectros de emisión y absorción para estudiar la emisión de radiación electromagnética del hidrógeno, la explicación racional de ambos tipos de espectros era ambigua y desarticulada. Un espectro de emisión se obtiene cuando a un gas se le transfiere energía, como consecuencia se emite radiación electromagnética la cual puede separarse por la acción de un prisma, dando origen a líneas coloreadas específicas o señales que quedan registradas en una placa fotográfica oscura. Ejemplos familiares de emisión de luz de un gas son las lámparas de neón actuales. De la misma forma un espectro de absorción se obtiene cuando el gas es vaporizado e iluminado con luz blanca, obteniendo señales oscuras en un espectro continuo de colores, que son precisamente las radiaciones absorbidas por el átomo. Hoy en día la espectroscopia es una técnica muy útil para la industria e investigación química sobre la caracterización de las sustancias.

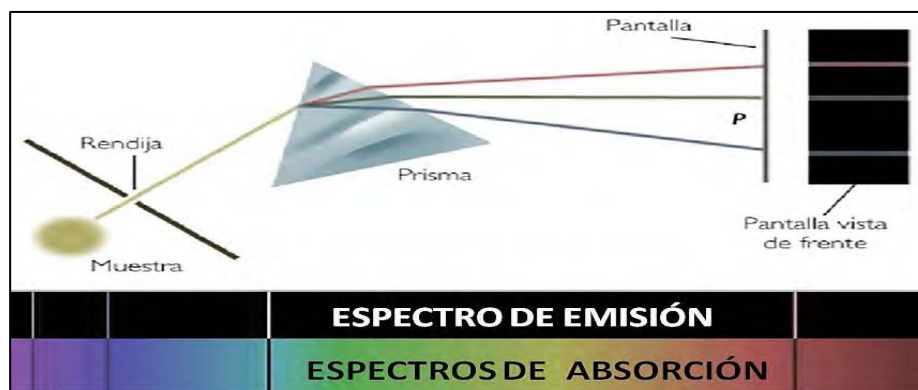


Figura 13. Dispositivo empleado para obtener un espectro de emisión (Arriba). Espectros de emisión y absorción del átomo de hidrógeno

³⁰ Ibid. p. 226

Jakob Balmer en 1885, encontró que las longitudes de onda de las cuatro primeras líneas de emisión del hidrógeno podían agruparse usando una fórmula empírica sencilla. Años más tarde Robert Rydberg (1854-1919), reescribió la fórmula de Balmer con el formato que se conoce actualmente, introduciendo una constante que lleva su nombre ($R_H = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$):

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad \text{para } n_1 > n_2$$

donde n_1 siempre es mayor que n_2 y ambas toman números enteros. Al conjunto de líneas que siguen esta relación con $n_2 = 2$ ($n_1 = 3, 4, 5$), se les denomina serie de Balmer y describen las líneas de emisión de el hidrógeno en la región visible del espectro. Posteriormente se descubrieron otras series espectrales del hidrógeno, las de Lyman en la región ultravioleta y Paschen en la región infrarroja.

En el año de 1913 la revista inglesa *Philosophical Magazine*, publica un trabajo de Bohr con el nombre “*On the constitution of atoms and molecules*”, donde se postula el primer modelo cuántico del átomo, el cual difiere radicalmente del modelo nuclear de Rutherford, que fuera el punto de partida de esta investigación. Este nuevo modelo atómico era consistente en la explicación del espectro de emisión del hidrógeno, la estabilidad de los sistemas atómicos y la descripción de importantes propiedades periódicas.

El modelo de Bohr se puede describir a través de tres postulados:

I. Las especies monoatómicas (H , He^+ , Li^{2+} , Be^{3+} , ...) están constituidos por un núcleo de carga $+Ze$, con una masa m que es A veces mayor a la del electrón (para el átomo de hidrogeno $A=1836.1$), el cual gira alrededor del núcleo en una órbita circular de radio r , con velocidad v constante.

El primer paso que emprendió Bohr en la integración de su modelo, fue postular una imagen para conceptualizarlo, para ello lo modelo como un sistema planetario conformado por orbitas de carácter circular con un centro de masa que estaría dado por el núcleo atómico, el cual sería 1836 veces más grande que un electrón y 10,000 veces más pequeño que el espacio total que ocupa un átomo. En estas orbitas circulares estarían girando los electrones a una velocidad constante. A través de una descripción clásica de las orbitas, Bohr señaló la acción conjunta y coordinada de dos fuerzas físicas que se compensan, evitando así que los electrones colapsaran en el núcleo, por un lado el potencial eléctrico (a) producto de la atracción de la carga $+Ze$ del núcleo y la carga intrínseca negativa del electrón y por el otro la fuerza centrífuga propias del electrón al girar en una órbita circular (b). Como se muestra en la siguiente expresión:

$$\begin{matrix} \text{(b)} & \text{(a)} \\ \boxed{-\frac{mv^2}{r} = -\frac{Ze^2}{r^2}} \end{matrix}$$

II. La cantidad de movimiento angular, esta cuantizados en múltiplos enteros de :“ $n \hbar$ ”.

Para describir el movimiento de los electrones, restringió y cuantizó las orbitas de un átomo en niveles de energía discretos que estarían dados por múltiplos enteros del operador del momento angular $n \hbar$. Bohr demostraba que la constante de Planck h era una unidad del momento angular. Nada en la obra de Planck ni Einstein indicaba ni por asomo que h pudiera utilizarse con tan atrevido fin, pues hasta la fecha h solo tenía razón de ser en la descripción energética de la radiación electromagnética.

La cuantización del momento angular fue un hecho clave en el trabajo de Bohr y surgió como consecuencia de un análisis riguroso de la ecuación y serie de Balmer. Desde entonces el operador del momento angular (\hbar), quedo definido de la siguiente forma:

$$mv \times \vec{r} = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar$$

Con $n \hbar$ (donde $n= 1, 2,3\dots$), la carga del electrón e y su masa m , Bohr determino con precisión los valores del radio de la primera orbita del átomo de hidrógeno y su energía obteniendo los valores $r_1 = 52.9 \text{ pm}$ y $E_1 = -2.18 \text{ aJ}$. A esta energía se le conoce como energía de ionización del átomo de hidrogeno, es decir, la energía necesaria para expulsar su único electrón.

III. Las orbitas permitidas por el segundo postulado son estacionarias. Sólo cuando el átomo cambia de un estado (1) con mayor energía a otro (2) con menor, se emite radiación electromagnética que viene dada por : $\Delta E = (E_{n1} - E_{n2})$

Posteriormente Bohr se dio a la tarea de explicar el espectro de emisión del hidrógeno con este modelo planetario. Para ello, supuso que las órbitas que conforman a los átomos son estacionarias, es decir, no emiten radiación electromagnética en su estado basal. Pero cuando son expuestos a una fuente de energía externa, los átomos se excitan originando transiciones electrónicas o los denominados saltos electrónicos en las orbitas atómicas. Los electrones como consecuencia de esta excitación absorben energía, posteriormente esta energía es emitida al perder energía el átomo en forma de radiación electromagnética, esta emisión está relacionada con el paso de los electrones de un estado de mayor energía (E_{n1}) a uno con menor energía (E_{n2}), esta energía puede caracterizarse por una diferencia entre ambos estados. Con la relación del tercer postulado y el principio de combinación de Ritz³¹, el físico danés reprodujo teóricamente la ecuación de Balmer, reportando un valor para la constante de

³¹ Fue enunciado por W. Ritz(1878-1909), en la año de 1908, este principio era una descripción de otra regularidad presente en el estudio de las líneas espectrales. Para un átomo dado, es posible encontrar una sucesión discontinua de frecuencias, llamadas términos espectrales, de manera que ν o λ , de cualquier serie espectral, puede determinarse por sumas o diferencias, entre dos términos espectrales. Bohr uso este principio para argumentar las transiciones energéticas responsables de la emisión de radiación electromagnética del hidrógeno.

Rydberg idéntico al experimental. De esta forma las líneas espectrales de emisión de hidrógeno (serie de Balmer), eran explicadas a través de transiciones electrónicas en niveles de energía cuantizados, en el texto publicado en 1913, aparecen minuciosos cálculos matemáticos que con una precisión asombrosa caracterizaban las frecuencias de las cuatro líneas correspondientes. Este modelo fue útil para explicar algunas propiedades periódicas como la distribución electrónica y la ionización de los elementos.

Sin embargo, el modelo planetario pronto presentó carencias restrictivas, la principal fue que no era consistente en la explicación de los espectros de átomos polielectrónicos, por lo que su descripción cuántica quedaba reducida a especies con un solo electrón o hidrogenoides como se les conoce en la actualidad. Actualmente numerosos textos de divulgación científica sostienen que la gran contribución de Bohr a la ciencia no fue el modelo del átomo planetario o primer modelo cuántico, sino la actitud metodológica en su construcción. Bohr adoptó una posición pragmática orientada por los hechos históricos y modernos, reconociendo la necesidad de reemplazar algunas de las ideas de la física clásica.

Como él mismo Bohr lo mencionaría en la presentación de su investigación a la academia danesa de física:

"Antes de terminar sólo quiero decir que espero haberme expresado con suficiente claridad, para que hayan ustedes apreciado a qué grado estas consideraciones chocan con el asombrosamente coherente grupo de conceptos que con propiedad reciben la designación de teoría clásica del electromagnetismo. Por otro lado, he tratado de comunicarles la impresión de que, haciendo hincapié en este conflicto, puede ser posible también, en el curso del tiempo, descubrir una cierta coherencia en las ideas nuevas"³².

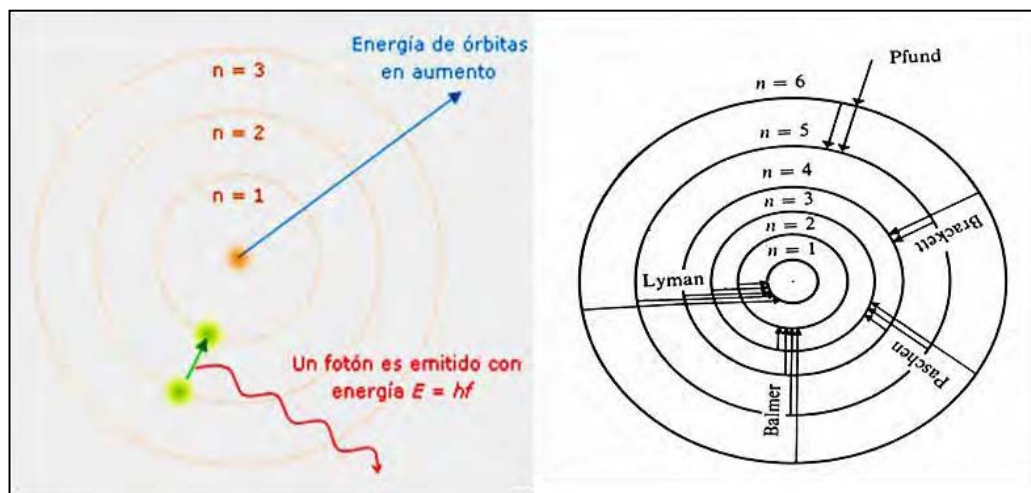
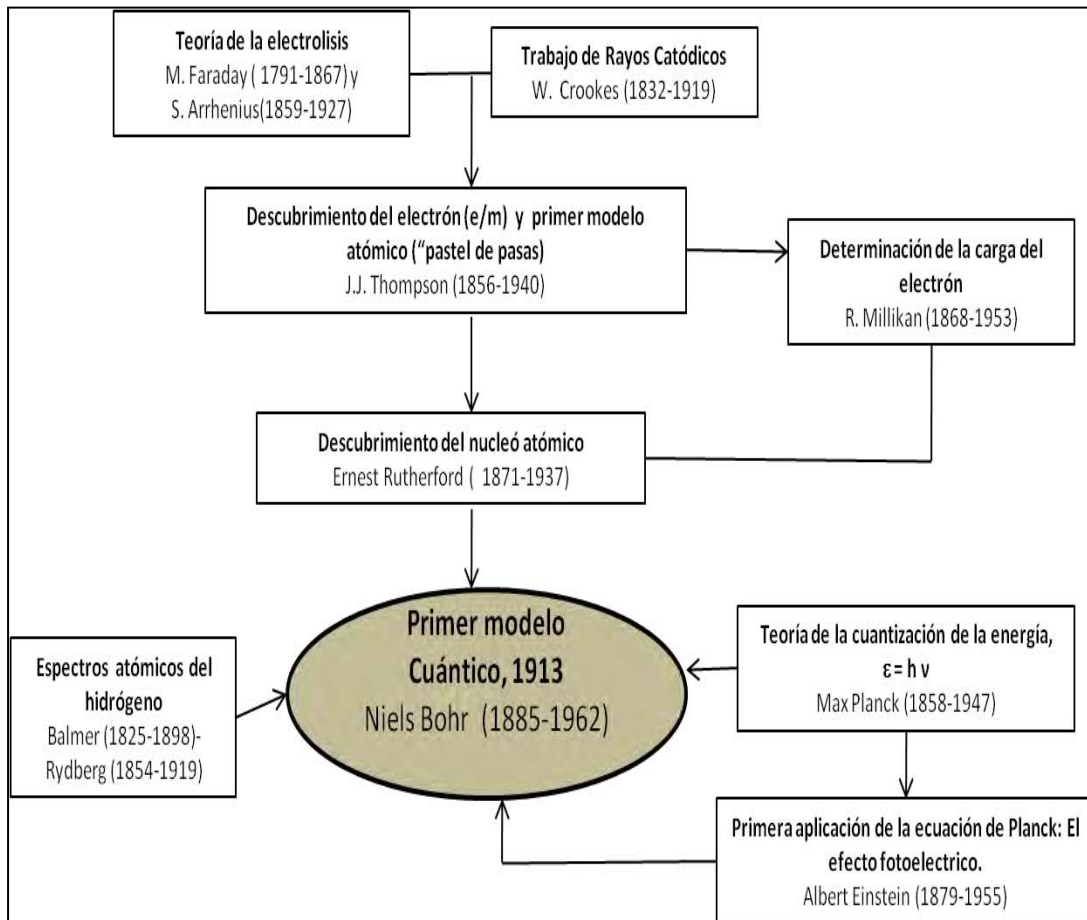


Figura 14. El modelo planetario de Bohr, establece órbitas cuantizadas o definidas en tamaño y energía. En la figura de la derecha se esquematizan las diferentes series espectroscópicas del hidrógeno, según el modelo planetario.

³² García-Colín, Mazari y Moshinky, *Niels Bohr: científico, filósofo, humanista*, FCE-colección ciencia para todos, 3ª reimpresión, 2003, p.37

El pragmatismo metodológico de Bohr, surtiría efecto inmediato en la próxima generación de físicos, que combinando la teoría clásica con suposiciones cuánticas, consolidaron a la mecánica cuántica como una línea de investigación científica de alto prestigio. Finalmente es importante mencionar que un fantasma mortífero atormentó la vida del laureado Bohr, pues él junto a con otros connotados científicos participó activamente en el proyecto Manhattan, que culminó con la creación de la bomba atómica. Después del atroz uso que dio el gobierno de los Estados Unidos a esta arma nuclear, militó activamente como pacifista, en junio de 1950 dirigió una carta abierta a las Naciones Unidas haciendo un llamado a este respecto, cuestión que seguramente no fue suficiente para aliviar su enorme pesar.

Mapa 1: Contribuciones históricas en el primer modelo cuántico del átomo.



4.1.5 El Modelo actual: El Átomo Cuántico Ondulatorio.

i. Las partículas se comportan como ondas. El postulado de de Broglie.

Para comienzos de 1920, las principales Universidades Europeas retomaban sus actividades con cierta normalidad después de la crueldad imperante en la primera guerra mundial. La naciente física cuántica emprendía la misión de aplicar el modelo planetario a otros elementos, el físico alemán Arnold Sommerfeld (1868-1951), agregaba una nueva regla cuántica al modelo de Bohr, para cada órbita circular habría algunas elípticas, cada una tan larga como el diámetro del círculo y con la misma energía.³³ La descripción atómica se tornaba entonces más compleja, pero se obtenían conclusiones interesantes, por ejemplo se hacían arreglos para explicar la distribución electrónica en función de los niveles energéticos de las orbitas, se sostenía ya que los electrones más externos (de valencia) serían los responsables de caracterizar el enlace químico de los compuestos, se especulaba sobre las posibles explicaciones de otras propiedades periódicas, etc. Cabría señalar que en la física de los veinte, existía esa posición relativista del “todo vale y se vale”, hoy tan presente en las disciplinas sociales y en el discurso de la filosofía posmoderna. Por fortuna, ese relativismo era físico no filosófico por lo que tenía que ser respaldado con la tradición del trabajo experimental.

En el año de 1924, un millonario y aristócrata francés, Louis de Broglie (1892-1987), realizó una tesis doctoral sobre el carácter ondulatorio del electrón que le valió el premio Nobel en 1929 y que constituiría el primer ladrillo del actual modelo atómico. Inspirado por el comportamiento dual onda-corpúsculo de la radiación, de Broglie especuló sobre la posibilidad que también la materia tuviera un comportamiento dual, esto es que las entidades físicas que consideramos como partículas (electrones, átomos, bolas de billar, etc.) pudieran en determinadas circunstancias manifestar propiedades ondulatorias.

Si Bohr, había utilizado correctamente la constante de Planck para cuantizar el momento angular y con ello explicar el movimiento interno de los electrones, no era absurdo especular sobre la posibilidad que h , estuviera relacionada con una clase de comportamiento ondulatorio. Admirador de los trabajos de Albert Einstein (1879-1955), de Broglie dedujo la longitud de onda asociada a una partícula, usando las ecuaciones del efecto fotoeléctrico y la relatividad espacial.

Desde 1917, era una cuestión probada que la luz estaba constituida por fotones cuya energía estaba descrita por la ecuación de Planck, $\epsilon = h \nu$. Esta ecuación fue analogada con la de la relatividad espacial $E=mc^2$, de la siguiente forma:

$$h\nu = mc^2 \quad (a)$$

³³ March, R., *Física para poetas*, cit., p.236

Considerando la definición del momento lineal $p = mc$, y la relación que guarda la frecuencia con la longitud de onda, según la teoría ondulatoria clásica; $\nu = c/\lambda$. Sustituyendo ambas ecuaciones en (a) obtenía:

$$\boxed{h \left(\frac{c}{\lambda} \right) = pc \rightarrow \therefore \lambda = \frac{h}{p}} \quad (b)$$

Con esta relación de Broglie deducía que la inversa de la longitud de onda tiene la misma relación con la frecuencia de una onda que el momentum con la energía en la descripción relativista de una partícula³⁴. Estableciendo su famosa hipótesis: “una partícula que viaja con momento lineal p , tiene asociada una longitud de onda $\lambda = (h/p)$, por lo que su movimiento estará regido por un carácter ondulatorio en su propagación”. En 1927 los físicos estadounidenses C. Davisson (1881-1958) y L. Germer (1896-1971) bombardearon con un haz de electrones un cristal de níquel, obteniendo patrones de difracción lo que demostraba consistentemente el trabajo del francés de Broglie sobre carácter ondulatorio del electrón, razón por la cual en el año de 1929 fue galardonado con el premio Nobel de Física.

ii. Mecánica Matricial vs Mecánica Ondulatoria

A pesar de los gigantescos avances que consiguió la investigación atómica en las dos primeras décadas del siglo XX una espesa niebla le cobijaba, la naciente teoría cuántica era un verdadero revoltijo de hipótesis, teoremas y principios enraizados en el empirismo del cálculo matemático y con serios problemas teóricos por resolver. Un ejemplo de ello era su ineficacia para explicar el hecho de que cierto tipo de experimentos requerían de una explicación ondulatoria de la materia y otros de la interpretación corpuscular, ¿cómo explicar que una partícula era una onda? Para hacer más densa esta bruma era claro que la cuantización de las variables físicas, hacía suponer que el mundo microscópico no tenía relación alguna con los sistemas clásicos, que su explicación atentaba contra el sentido común e incluso con la racionalidad científica heredada siglos atrás.

En 1925 un joven físico alemán de 24 años de edad, alumno de Sommerfeld y del propio Bohr, Werner Heisenberg (1901-1976), influenciado por la formalidad analítica del primero y la capacidad sintética del segundo, se propuso llevar a plan serio la formulación de una nueva mecánica, que permitiera analogar sistemas clásicos con cuánticos pero eliminando la apelación sistemática de la intuición. Heisenberg, sentó las bases de la mecánica cuántica, al renunciar a todo intento de descripción espacio-temporal de los sistemas atómicos, sustituyendo las variables de la dinámica clásica (posición (q) y momento (p) inobservables para las partículas químicas), por magnitudes medibles de radiación electromagnética. Con la colaboración de Max Born (1882-1970) y Pascual Jordán (1902-1980), Heisenberg dio a conocer la nueva mecánica matricial, la primera teoría consistente que explica la multiplicidad de fenómenos cuánticos. La mecánica matricial, ofrecía un cálculo matemático que contemplaba magnitudes

³⁴ Ibid. p. 238

no conmutativas y que desafiaba cualquier interpretación visualizable enfatizando el elemento de discontinuidad corpuscular.³⁵



Figura 15. Charla Maestro-Alumno: Niels Bohr (1885- 1962) y Werner Heisenberg (1901-1976)

La teoría de Heisenberg resolvió importantes datos experimentales provenientes de la investigación espectroscópica, por citar un ejemplo, en 1926 Wolfgang Pauli (1900-1958) dedujo el espectro del hidrógeno dentro de ésta dinámica de matrices. A pesar de ello, la mecánica matricial no fue recibida con total simpatía por la comunidad científica europea, por dos razones de gran peso, el algebra matricial no era del dominio común, realmente eran muy pocos quienes tenían sólidos conocimientos al respecto y su semántica era exacerbadamente formal, lo que impedía un modelaje tradicional, es decir, la acepción de una imagen física y con ello su concepción filosófica. Era una mecánica fría, compleja y atípica que lejos de develarse como progresista, era referenciada con cierta molestia, por las academias científicas que se mantenían distantes de los patrones metodológicos e ideológicos que imperaban en Gotinga y Copenhague.

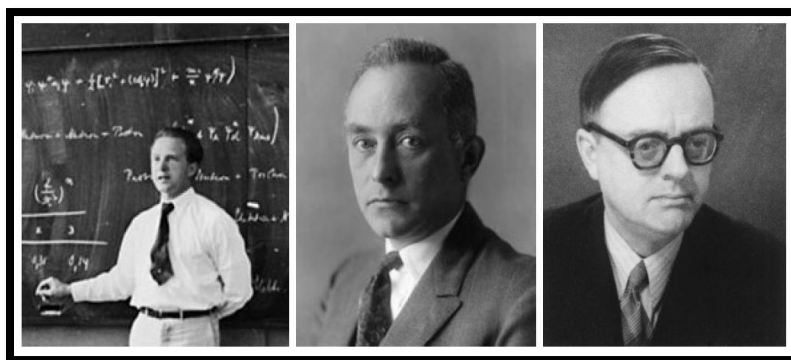


Figura 16. Los fundadores de la mecánica matricial: Heisenberg, Born y Jordan

Erwin Schrödinger (1887-1961), profesor de la universidad de Zúrich, influenciado por la teoría ondulatoria de De Broglie, experto en el cálculo diferencial y en los sistemas físicos de medios continuos³⁶, publicó en el año de 1926 en una de las revistas más de más tradición en la física; *Annalen der Physik*, cuatro textos con el nombre “*Quantisierung als Eigenwertproblem*” (cuantización como problema de autovalores), donde era presentada su celebrada ecuación de

³⁵ González, M., “Probabilidad y causalidad en la filosofía de Max Born”, *Anales del Seminario de Metafísica*, No. 38, Universidad Complutense de Madrid, 2005, pp. 241-269

³⁶ Bombal, F., “Los modelos matemáticos de la mecánica cuántica”, *Ciencia en el siglo XX: Seminario Orotava de Historia de la Ciencia*, Consejería de educación del gobierno de Canarias, pp. 115-146,1999, Islas Canarias, 1999. p.14

onda. Incomodo por la modelación matricial, Schrödinger, trabajo arduamente en obtener una teoría más visualizable y que solo empleara herramientas matemáticas clásicas en su descripción. La tesis general que postuló Schrödinger, fue que las partículas, en específico el electrón posee cierto movimiento ondulatorio, el cual puede ser descrito como una función de onda continua.

La ecuación de onda que posiciono al profesor de Zúrich como uno de los científicos más importantes del siglo XX, era el resultado de un tratamiento matemático que involucraba importantes cálculos de la mecánica clásica aplicados a la descripción ondulatoria, tal es el caso de la ecuación de Hamilton-Jacobi, que describía con precisión la acción de un sistema, también involucraba la relación encontrada por de Broglie en la descripción del carácter ondulatorio del electrón. La primera ecuación que reporta Schrödinger en esta descripción, era independiente del tiempo por lo que solo hacía referencia a estados estacionarios, es decir, a estados con energía bien definida.

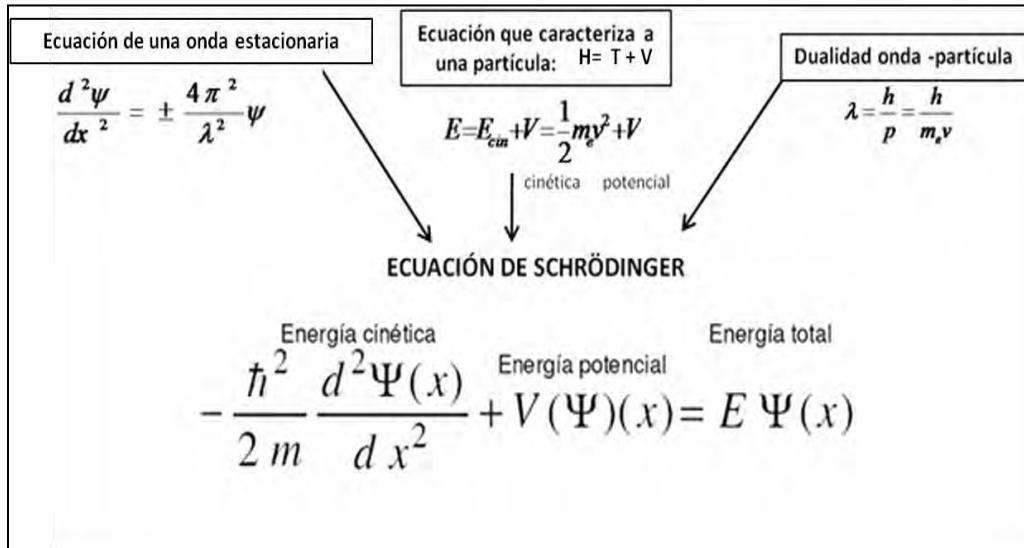


Figura 17. Ecuación de onda de Schrödinger para estados estacionarios o ecuación fundamental de la mecánica cuántica.

Originalmente, Schrödinger postuló que la función de onda Ψ fuese continua y de recorrido real, meses después estas restricciones fueron modificándose hasta obtener una ecuación dependiente del tiempo, más general, que describe todos los estados atómicos posibles³⁷. Schrödinger aplica su teoría a varias situaciones (oscilador armónico lineal, rotador rígido y vibratorio (molécula diatómica), etc., obteniendo resultados totalmente análogos a los que resultan de la mecánica de matrices³⁸. Finalmente el físico de Zúrich deduce los niveles energéticos del átomo de hidrógeno con la mecánica ondulatoria de forma natural,

³⁷ Casado, M., “De la equivalencia matemática entre la mecánica matricial y la mecánica ondulatoria”, *Gaceta de la real academia matemática española*, vol. 10 (1), pp. 103-128, 2007. p. 107

³⁸ Bombal, F., “Los modelos matemáticos de la mecánica cuántica”, cit., p.16

eliminando el método artificial del “salto cuántico” y las inoperantes orbitas del modelo planetario de Bohr, hecho que dota de una gran confiabilidad y simpatía a su labor. Estos éxitos llevan a Schrödinger a proponer una interpretación física de su formalismo, afirmando que: “el proceso mecánico real solo puede representarse apropiadamente, como un proceso ondulatorio y no por el movimiento de puntos materiales en el espacio...”³⁹.

Inmediatamente su formulación fue aplicada y validada en la resolución de problemas relacionados con la distribución discreta de la energía. Sus ideas son aceptadas de facto por la comunidad científica, dado que superaba lo que la mecánica matricial adolecía. Requería sólo del cálculo diferencial como herramienta matemática, cuestión que los físicos dominan desde siglos en oposición a diagonalizar matrices infinitas, y segundo su teoría resultaba más intuitiva y visualizable, ya que en este formalismo si existía una descripción espacio-temporal del sistema. A pesar de ello, la vanguardia de Copenhague y Gotinga en específico, Bohr, Born y más marcadamente Heisenberg, se mostraban renuentes a aceptar el paradigma ondulatorio, porque finalmente ambas teorías realizaban idénticas predicciones físicas, así que la batalla tendría que ganarse en el terreno del modelaje matemático.

A mediados de 1926, es el propio Schrödinger a través de la introducción de operadores a su mecánica ondulatoria, quien destraba la polémica, al demostrar la equivalencia matemática entre ambas teorías, ese mismo año se publica el texto con el nombre algebra cuántica o mejor conocido como teoría del operador, del físico británico Paul Dirac (1902-1984), el cual corrobora y perfecciona esta equivalencia matemática.

La ecuación de Schrödinger entonces superaba el trabajo matricial de Heisenberg por su posibilidad de modelaje tradicional, constituía la primera ley cuántica que podía aspirar a la clase de generalidad que tenían las leyes de Newton. Cubría cualquier fuerza y cualquier situación sin necesidad de supuestos adicionales o leyes arbitrarias⁴⁰. Además contaba con el apoyo de físicos eminentes como Einstein, Lorentz y el fundador de la teoría cuántica el alemán Max Planck.

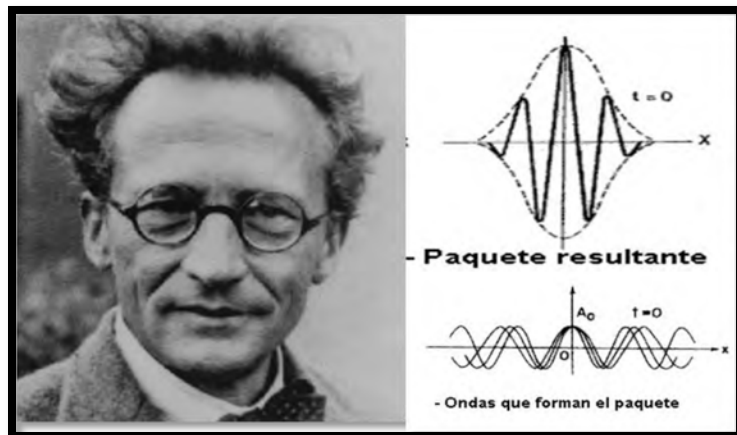


Figura 18. Erwin Schrödinger (1887-1961), estableció en 1926 la ecuación fundamental de la mecánica cuántica. Premio Nobel de Física en 1933.

³⁹ Ibid. p. 16

⁴⁰ March, R., *Física para poetas*, cit., p. 246

iii. El formalismo cuántico ondulatorio se perfecciona y consolida

Como es una tradición en la ciencia normal⁴¹, una nueva teoría sólo podrá consolidarse como paradigmática, si logra superar el mayor tipo de problemas epistemológicos de su campo de acción, cambiando las reglas que rigen su práctica. El modelaje ondulatorio de Schrödinger, tenía dos grandes problemas en su interpretación, así lo hicieron notar los físicos de Copenhague que volvían nuevamente a la carga. La función de onda Ψ dependiente del tiempo, arrojaba términos complejos, razón suficiente para realizar fuertes cuestionamientos; como por ejemplo, ¿Por qué no es real? si la materia está descrita por una función de onda ¿Qué realmente se suponía que estaba oscilando? y segundo funcionaba perfectamente para describir sistemas estáticos o atemporales, como el átomo de hidrógeno aislado, pero cuando se analizaba la función de onda de un electrón que colisionaba con otro átomo, se obtenían resultados confusos y contradictorios, lo que daba vida a la explicación corpuscular-matricial.

Schrödinger, no pudo superar tales interrogantes, la respuesta vino de sus críticos, de un fundador de la mecánica matricial, Max Born, quien después de meses de ardua polémica, reconocía inteligentemente el formalismo de Schrödinger como la formulación más profunda de las leyes cuánticas⁴². Sin embargo, esta interpretación hacía uso de una herramienta matemática que disgustaba a Schrödinger y a los físicos que lo respaldaban, como es el caso de Einstein y complacía a la vanguardia de Copenhague, la probabilidad.

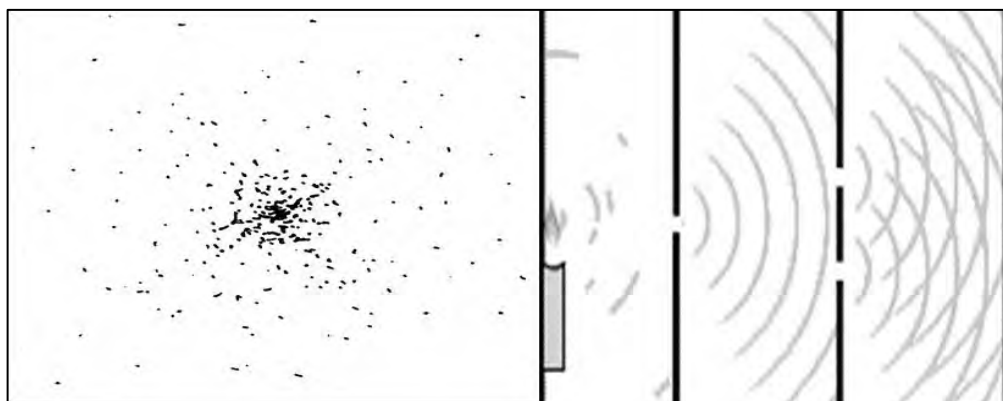


Figura 19. Mediciones repetidas de la posición de un electrón en la primera órbita de Bohr (izquierda). Difracción de electrones en una pantalla con dos rendijas (derecha).

Max Born, interpretó que la función de onda de Schrödinger elevada al cuadrado $|\Psi|^2$ era una densidad de probabilidad que permitía localizar un electrón; a esta función matemática se le conoce hoy en día como orbital atómico. De esta forma Ψ , se presentaba como el conjunto de toda la información que se posee para describir las propiedades dinámicas de una partícula. Con esta interpretación, las formas nubosas de Schrödinger adquieren un significado peculiar. No le dicen al físico dónde está el electrón en un momento dado sino tan

⁴¹ Kuhn, T., *La estructura de las revoluciones científicas*, FCE, 3ª edición, México, 2007. p.65

⁴² Bombal, F., "Los modelos matemáticos de la mecánica cuántica", p.17

sólo donde es probable que este⁴³. La probabilidad no era una novedad física, había sido usada muchos años atrás desde que los físicos empezaron a especular sobre el movimiento de los átomos, la cuestión estaba en su significado, que invitaba a reconocer la imposibilidad de medir y reconocer con precisión el mundo subatómico. La interpretación probabilística de Born, fue aplicada con gran éxito a los problemas de dispersión de partículas, pero era evidente que como entidad física no era posible modelarla con la causalidad del mundo real.

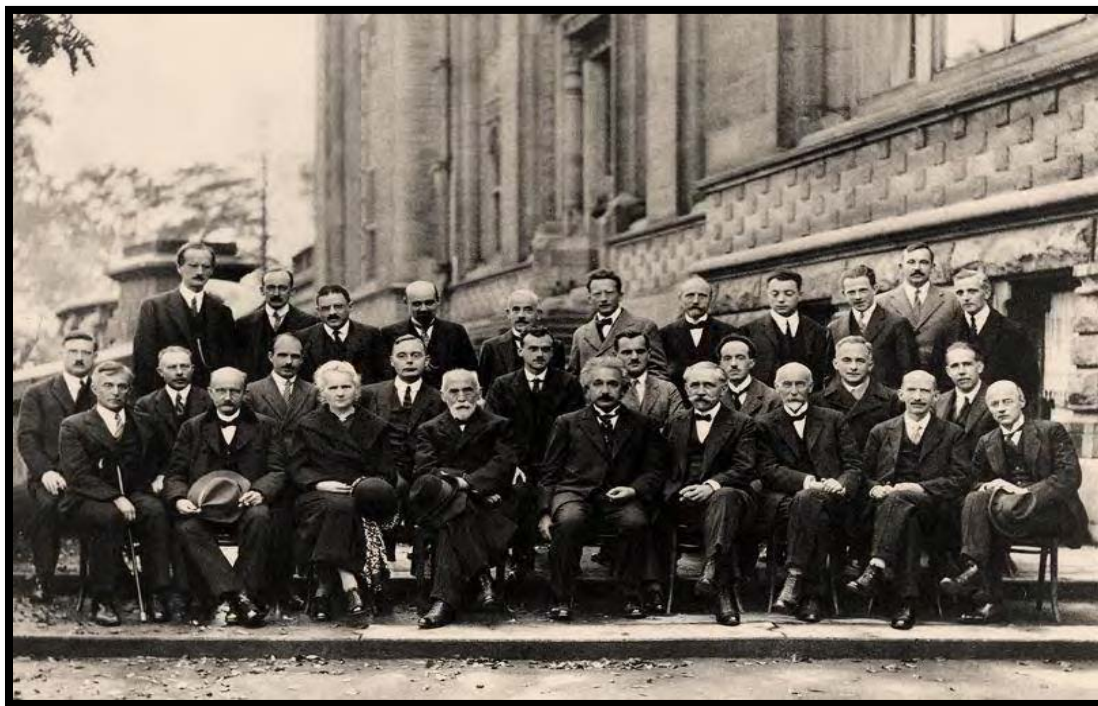


Figura 20. Asistentes al quinto congreso de Solvay, Bruselas, 1927.

Al considerar el experimento de T. Young (1773-1829), que monitorea la difracción de electrones con una pantalla de dos rendijas, la interpretación de Born no fue consistente para explicar la interferencia que reviste la distribución física de los electrones en la pantalla. Por tanto la función de onda asociada a la partícula debería tener una realidad física y no ser una mera función matemática⁴⁴. Fue Heisenberg, en marzo de 1927 con su principio de incertidumbre quien puso el último ladrillo de lo que hoy conocemos como mecánica cuántica, al dotar a $|\Psi^2|$ de cierta realidad física, nombrándola como onda de probabilidad asociada a una partícula, concibiéndolas como una formulación cuantitativa del concepto de *potencia* en la filosofía aristotélica, según el cual los acontecimientos no están determinados de una manera perentoria, y la posibilidad o tendencia a que suceden tiene una cierta clase de realidad⁴⁵.

⁴³ March, R., *Física para poetas*, cit., p. 253

⁴⁴ Bombal, F., "Los modelos matemáticos de la mecánica cuántica", cit., p.16

⁴⁵ *Ibid.* p.17

Este principio de incertidumbre dependía de leyes naturales expresables matemáticamente de la siguiente forma:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

donde Δx es la incertidumbre en la medición de la posición y Δp la medición del momento lineal. Heisenberg demostraba que no era posible medir la posición y la velocidad de un electrón, con una precisión ilimitada, cualquier acción que se emprenda para determinar el momento con mayor precisión redundara en una disminución en la exactitud de la posición determinada. Con este principio, la mecánica cuántica proporcionaba elegantemente una descripción ondulatoria de la materia, cuya descripción dinámica estaba basada en una distribución de probabilidad a través del cálculo estadístico. Planck, De Broglie, Einstein y Schrödinger no aceptaban la interpretación probabilística de Born-Heisenberg, pero no pudieron refutarla. Para octubre de 1927, cuando se realizó el esperado quinto congreso de Solvay, la mecánica cuántica era ya una edificación consolidada, fruto de una revolución científica sin precedente, que modificó el carácter filosófico de concebir la realidad. Su aplicación tecnológica ha sido inmensa, pero quedó manchada de muerte, cuando el poder a mitad del siglo pasado, orientó su campo de estudio a fines bélicos.

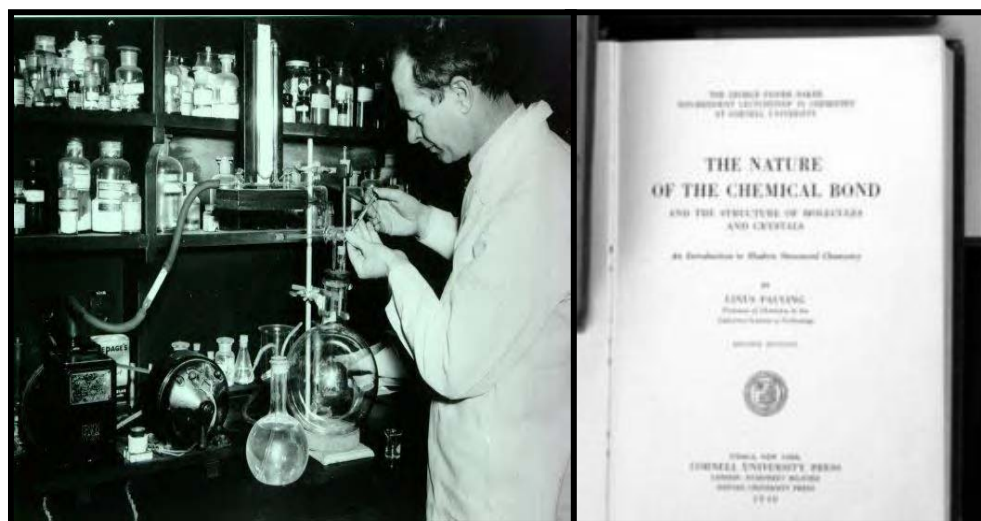
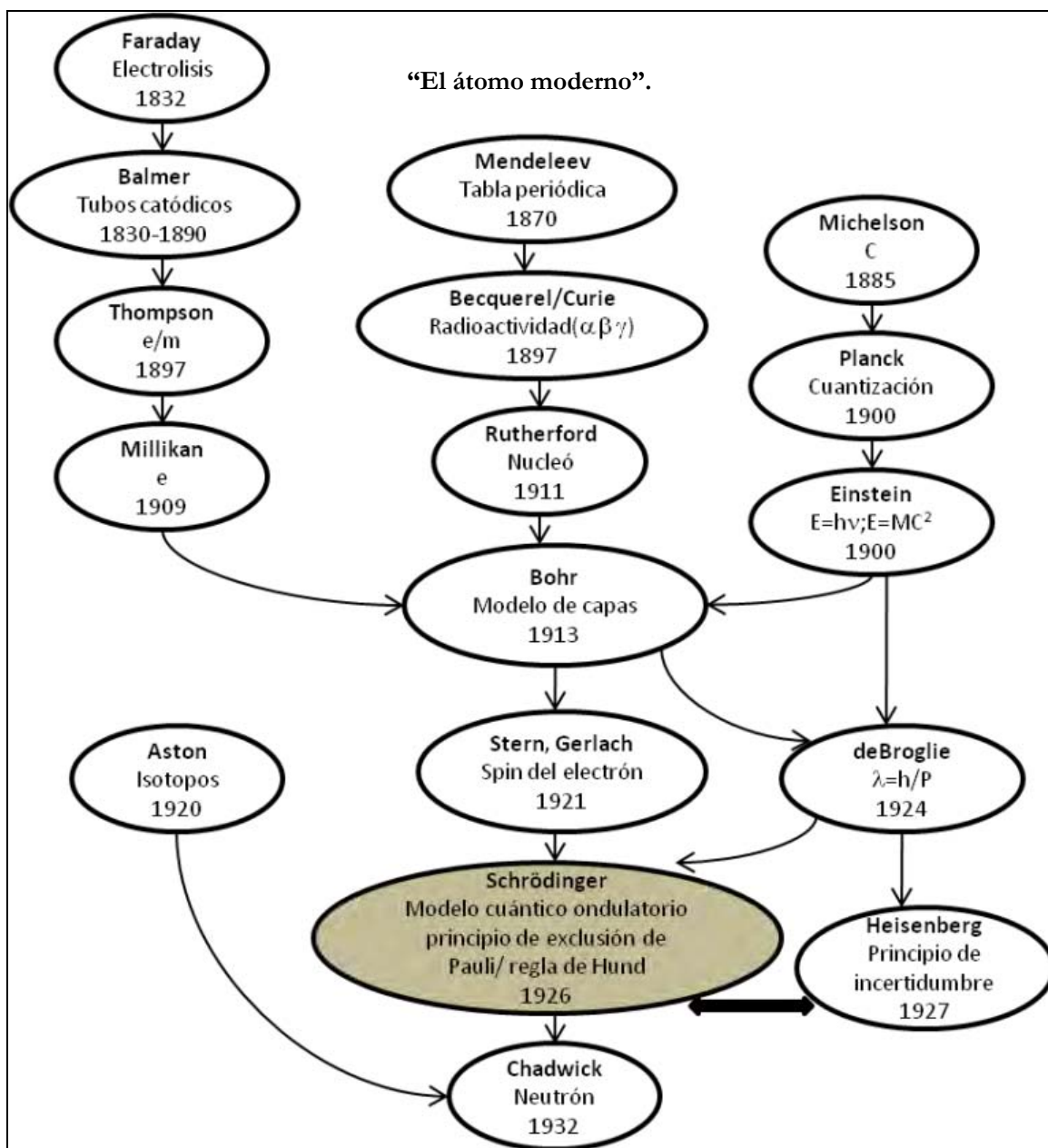


Figura 21. En el año 1939 Linus Pauling (1901-1994), publica el libro: “The nature of the Chemical Bond”. En esta publicación se consolida la primera explicación cuántica del enlace químico⁴⁶. Pauling recibe el premio Nobel por estos trabajos en 1954.

⁴⁶ Oregon State University: <http://osulibrary.orst.edu/specialcollections/coll/pauling/cronologia/page18.html>

Mapa 2: contribuciones teóricas y experimentales del paradigma atómico actual ⁴⁷



Nota: En el esquema se muestra a la figura histórica, su contribución y la fecha de la misma (quien, qué y cuándo).⁴⁸

⁴⁷ Leary, J. y Kippeny, T., “ A Framework for Presenting the Modern Atom”, *Journal of Chemical Education*, vol. 76 (9), pp. 1217-1218, 1999.

⁴⁸ Óp. cit. p. 1217

4.2. Dimensión Didáctica

4.2.1. Reflexiones Docentes

i. Los nanosistemas son constructos sociales

Una primera reflexión sobre los sistemas atómico-moleculares es su naturaleza utópica a más de 2000 años de que los griegos comenzaran a discutir sobre átomos, la humanidad y particularmente los científicos aun no se ponen del todo de acuerdo sobre su naturaleza. Ahora quien reanima el debate es una evidencia experimental, el inusitado desarrollo de las ciencias de los materiales ha permitido obtener imágenes que permiten visualizar átomos en las superficies de numerosos cristales como se muestra en la imagen No. 21. Los investigadores que desarrollan esta fructífera tecnología, consideran que las fotografías obtenidas con STM (espectroscopia por efecto túnel) son evidencias experimentales contundentes para afirmar que los átomos existen como entidades reales. Bajo este posicionamiento, importantes especialistas sobre el tema sugieren que los átomos deben abandonar su vieja armadura empírica y referenciarse ya como componentes reales de la materia. Es sorprendente como la búsqueda de lo más pequeño ha provocado un avance inusitado de la tecnología, la STM es una muestra claro de ello, la sociedad disfruta y necesita de estos logros, hoy en día por ejemplo, la búsqueda de fuentes alternativas de energía necesita mucho de la investigación atómica.

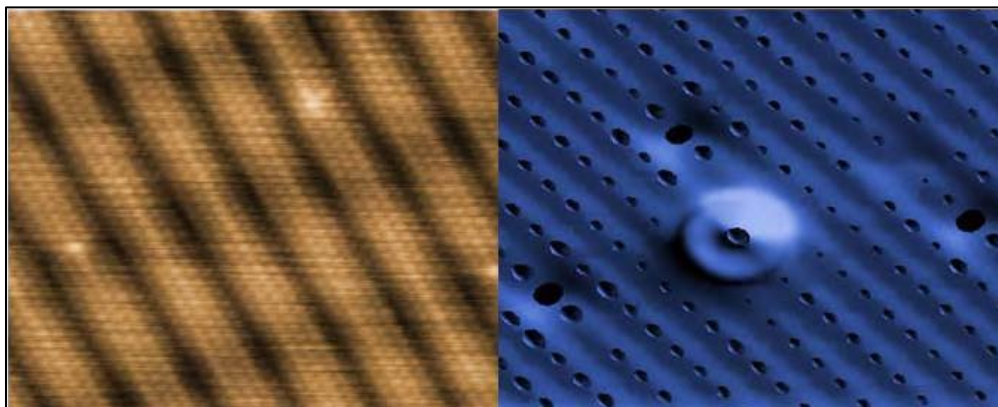


Figura 21. Izquierda, lámina de oro, donde se han resuelto los átomos individuales organizados en su estructura metálica. Derecha, átomo individual de xenón (resaltado por su mayor tamaño) sobre placa de níquel, donde se han resuelto los átomos individuales organizados en su estructura metálica. Puede apreciarse un átomo de níquel a través de la nube electrónica del xenón. Imágenes obtenidas por espectroscopia de barrido con efecto túnel (STM). Centro de Investigaciones de Almaden (California, USA), IBM.

Sin embargo, asumiendo que lo que vemos son átomos su simple imagen o retrato no cambia mucho su acepción disciplinar no así su concepción “filosófica” esto es importante tener en cuenta. Por lo anterior, el cuerpo de conocimientos de los nanosistemas debe presentarse de forma adecuada en el aula como modelos⁴⁹, es decir, constructos sociales

⁴⁹ En el apéndice 4 se cita un breve justificación sobre el uso y utilidad de los modelos en la enseñanza de la química.

productos del consenso de la comunidad científica para abordar la explicación de fenómenos de interés. En pleno siglo XXI la importancia de su estudio es operacional en la medida en que pueden aislarse, medirse o manipularse de forma indirecta a través de instrumentos tecnológicos de vanguardia y suscitar avances tecnológicos.

ii. El modelo atómico de Bohr y el concepto de Orbital contenidos básicos en la enseñanza de los sistemas atómicos-moleculares

El término revolución pareciera ser exclusivo de la teoría política o las ciencias sociales, se relaciona con la necesidad de cambio de estructuras dominantes debido a su incapacidad para resolver una crisis, siendo esta el motor de toda revolución. Las crisis y las revoluciones ocurren de la misma forma en el accionar científico, la diferencia estriba en que las estructuras dominantes de la ciencia son de naturaleza epistemológica y tecnológica no políticas. Es interesante citar este hecho porque la estructura de la materia es un paradigma⁵⁰ siempre trastocado durante las revoluciones científicas⁵¹. Jensen⁵², considera que son tres las revoluciones más significativas que ha sufrido la química, la primera (1770-1790) encabezada con los trabajos de Lavoisier que permitieron su consolidación disciplinar, la segunda (1855-1875) que comenzó con el modelo de Dalton y culminó con el desarrollo de la química orgánica, y finalmente la tercera revolución (1904-1924) que tuvo como eje a la mecánica cuántica. En todas ellas el debate sobre la constitución de la materia ha sido crucial, a tal grado que cada una de ellas puede ser categorizada por su acepción correspondiente: molar, molecular y eléctrica⁵³.

La última revolución estableció el paradigma que hoy rige el estudio de los sistemas atómico-moleculares; el modelo cuántico ondulatorio de Schrödinger. La química estuvo profundamente ligada en la construcción de este nuevo paradigma, fueron temas químicos los que suscitaron la necesidad de reformular teorías, por citar algunos, el fenómeno de la radiación, la naturaleza de los rayos X, la periodicidad así como la discontinuidad espectral de algunos elementos. Bohr postuló el primer modelo cuántico del átomo a través de un minucioso estudio del espectro de emisión del átomo de hidrógeno, Warner Heitler (1905-1981) y Fritz London (1900-1954) en 1927 desarrollaron la primera formulación matemática del enlace químico a través del tratamiento cuántico de la molécula de este mismo elemento, posteriormente Linus Puling (1901-1994) complementó este tratamiento aplicándolo exitosamente a otras moléculas con su famosa teoría de enlace unión-valencia. La descripción cuántica de la materia es un tema que mucho tiene que ver con la química con todo y que los créditos en la mayoría de los libros se los lleven los físicos. Dado lo anterior, es menester en este trabajo dar respuesta al siguiente par de preguntas ¿Qué contenidos cuánticos deben ser referenciados en el bachillerato? y ¿Cómo deben presentarse a los estudiantes?

⁵⁰ Son logros científicos universalmente aceptados que durante algún tiempo suministran modelos de problemas y soluciones a una comunidad de profesionales. (Kuhn, T., *La estructura de las revoluciones científicas*, cit., p.50)

⁵¹ Episodios de desarrollo no acumulativo en los que un paradigma antiguo se ve sustituido en todo o en parte por otro nuevo incompatible con él. (Ibid. p.186)

⁵² Jensen, W., *One Chemical Revolution of Three?*, *Journal of Chemical Education*, vol. 75 (8), 961-969, 1998.

⁵³ Óp.cit. p. 963

Atendiendo los resultados obtenidos en el primer capítulo sobre el CPC en la enseñanza de la estructura de la materia en el bachillerato, se encontró que los docentes consideran importante referenciar, al menos, el modelo atómico de Bohr ya que es un contenido presente en el plan de estudios. Respecto al modelo atómico vigente como se menciona con anterioridad se constató que es un contenido de poco dominio por el profesorado a tal grado que se sugirió omitirlo, sin embargo, como se argumentó en ese mismo capítulo consideramos que su inclusión es sustancial en el presente trabajo. De esta forma, se sugiere que en la enseñanza de la química en el nivel medio superior deben abordarse dos modelos cuánticos en el estudio de la estructura de la materia: el modelo de Bohr y el modelo atómico vigente del cual se desprende el concepto de orbital. Con ello se da respuesta a la primer interrogante, en cuanto a la segunda ¿Cómo deben presentarse? se debe considerar que estos contenidos plantean serios problemas de traducción de conocimientos, por lo que, un tratamiento literal de estos (el uso del empirismo matemático) es sin duda un proceso acrítico e inútil en el contexto de la enseñanza de la química del bachillerato, por esta razón, estamos convencidos que su tratamiento no debe rebasar el nivel gráfico o cualitativo. A continuación se presenta un breve análisis sobre la relevancia de estos dos contenidos disciplinares.

El átomo de Bohr es un contenido de gran significado histórico dado que fue el primer modelo atómico cuántico, el cual, consolidó la explicación de los sistemas microscópicos a través de la relación materia-energía. Su importancia disciplinaria reside en ser la primera formulación teórica que permitía entender la estabilidad de los átomos y las propiedades químicas de los elementos en función del número y la ordenación de los electrones en el átomo correspondiente. Fue Bohr quien propuso la existencia de capas electrónicas (K,L,M...) para explicar algunas propiedades periódicas, incluso, elaboró su propia tabla periódica⁵⁴.



Figura22. La demostración matemática un hábito del profesor Bohr.

El modelo de Bohr produjo éxitos inmediatos en la investigación atómica, por citar algunos, gracias a este se definieron las primeras escalas de radios atómicos tomando como referencia el radio calculado para el átomo de hidrógeno, se reprodujo la serie de Balmer en el espectro de emisión de este elemento, sus postulados se aplicaron con éxito en la explicación de la distribución de frecuencias de rayos X en átomos polielectrónicos, algunas técnicas modernas como PIXE aun utilizan el modelo de Bohr para enunciar sus principios físicos.

⁵⁴ Peniche, J., *la tabla periódica*” (*Los elementos y la estructura atómica*) en: http://cea.quimicae.unam.mx/~Estru/tabla/09_Estructura.htm

Aunque es un modelo útil solo para la descripción del átomo de hidrogeno o especies hidrogenoides, se considera un modelo eficaz en el campo educativo, ya que permite introducir a estudiantes principiantes de una carrera científica a temas y cálculos cuánticos superiores⁵⁵. Específicamente en el bachillerato el adecuado tratamiento de la estructura del modelo atómico de Bohr en el aula, constituye una base conceptual para abordar temas de gran importancia, por ejemplo, el modelo de capas que permite simplificar la escritura de las configuraciones electrónicas y el estudio de la periodicidad⁵⁶.

Respecto al modelos atómico vigente sostenemos que abordar el concepto de orbital puede ser de gran utilidad en la elaboración de estrategias didácticas que permitan mostrar de forma cualitativa aspectos sustanciales del modelo atómico actual, la razón es que los orbitales permiten centrar la didáctica de los nanosistemas en el estudio del comportamiento de los electrones y núcleos o cores, conceptos actualmente necesarios para aproximar a los estudiantes a una mejor comprensión de los proceso químicos. Otra ventaja que ofrece trabajar el concepto de orbital en el aula es su representación grafica, un aspecto crucial para explicitar a los estudiantes la importancia de la modelación la ciencia⁵⁷. A través de la representación grafica de los orbitales se puede explicar la razón de ciertas geometrías moleculares sin incurrir en la complejidad matemática.

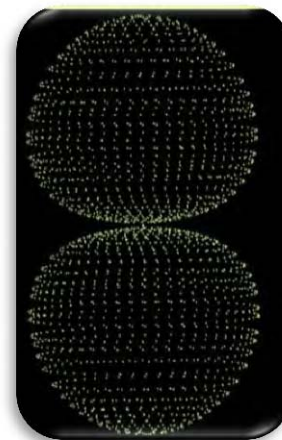


Figura 23. Orbital 2pz

De esta forma, las reacciones químicas pueden ser presentadas como la reconfiguración de electrones y cores entre las moléculas de las sustancias, siendo estas las entidades que conservan las propiedades de los materiales, razón por la cual, muchos investigadores consideran que son las moléculas las verdaderas entidades fundamentales de la materia⁵⁸. Es importante tener en cuenta esto, ya que, los átomos son entidades que no son estables de forma aislada en la naturaleza (son inestables desde el punto de vista electrónico porque su ultima capa no está completamente ocupada) a pesar de ello son una referencia obligada como punto de partida en la explicación molecular.

Hablar de átomos es conveniente porque ofrece importantes ventajas disciplinarias y educativas, al ser entidades concebidas con un solo núcleo, facilitan a los especialistas deducir propiedades físico-químicas mediante la mecánica cuántica resolviendo Ψ (la ecuación de onda de Schrödinger). Mientras que los sistemas reales polielectrónicos (agregados

⁵⁵ Tsarpalis, G. y Papaphotis, G., "High -school Students' Conceptual Difficulties and attempts at conceptual Change: The case of basic quantum chemical concepts", *International Journal of Science Educations*, vol. 31 (7), pp. 895-930, 2009.

⁵⁶ Gillespie, R., Spencer., J. y Moog, R., "Demystifyng Introductory Chemistry, Part. 1: electron configurations from experiments", *Journal of chemical education*, vol. 74 (7), pp. 617-622, 1996.

⁵⁷ Consultar apéndice 4.

⁵⁸ Taber, K., "The atom in the chemistry curriculum: Fundamental concept, teaching model or epistemological obstacle?", *Foundations of Chemistry*, vol. 5(1), pp. 43-84, 2003.

moleculares y redes) son extremadamente complejos de describir pues requieren el establecimiento de complejos métodos y teorías de cálculo. Razón por la cual, los científicos se ayudan del concepto de átomo para modelar de forma sencilla sistemas polinucleares, los cuales, generalmente son presentados como fragmentos mononucleares diferentes que interactúan entre sí por la acción de núcleos y electrones.

Considerando los resultados que ofrece la mecánica cuántica, los átomos pueden ser presentados a los preparatorianos como representaciones visuales articuladas por dos subestructuras, los cores y los electrones mas externos o más distantes del núcleo. De esta forma, todos los átomos se pueden visualizar como un core o corazón con una carga positiva (el núcleo y los electrones de los orbitales internos) rodeados por una región mucho más grande en magnitud en forma de nube donde se localizan los electrones mas externos, entre ellos, los electrones de valencia que son los participantes en los enlaces entre las moléculas. En este modelo los electrones dejan de concebirse como partículas girando en órbitas planas a una distancia fija del núcleo. El concepto de órbita es sustituido por el de orbital, una función matemática que informa sobre la región del espacio alrededor del núcleo donde es más probable encontrar un electrón.

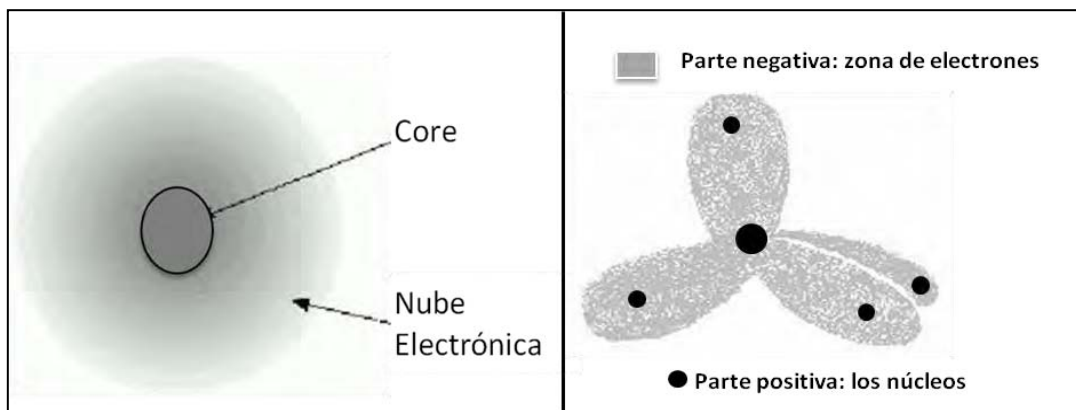


Figura 24. Izquierda, representación del modelo atómico vigente. Derecha, forma del ion amonio NH_4^+ , al igual que cualquier otra especie química, tiene una parte positiva (los núcleos) y una negativa (los electrones).

Finalmente, es importante mencionarle a los estudiantes que los orbitales son representaciones gráficas que devienen de complejas funciones matemáticas y describen de forma probabilística la distribución de los electrones en los átomos. Según resultados experimentales los orbitales difieren en tamaño, forma, orientación espacial y energía, lo que hace posible que en las moléculas solamente haya un acomodo posible de núcleos y electrones en el que la atracción es máxima y la repulsión, mínima. Como no es posible localizar los electrones con precisión, ni conocer sus trayectorias cuando se mueven, lo que se representa no son los electrones sino sus orbitales, modelos de gran fertilidad en la caracterización de la geometría molecular de las sustancias y materiales.

4.2.2 Identificación de concepciones alternativas: partículas y modelos atómicos

Las ideas previas o concepciones alternativas que se presentan en este apartado fueron tomadas en su mayoría de: “Relación entre el modelo de átomo de los estudiantes (16-17 años) y los diferentes modelos atómicos presentados en la enseñanza”⁵⁹ de Quezada, P., Valcárcel, V. y Sánchez, G, publicado enseñanza de las ciencias en el año 2005.

a) Sobre el átomo

- La mayoría de los estudiantes de bachillerato reconocen al átomo como la unidad constituyente de la materia, pero no establecen diferencias entre átomos, moléculas o iones para estudiar su comportamiento. Los alumnos aceptan que los átomos se unen unos a otros para formar sustancias pero no definen que entidad (átomo, molécula o ion) es responsable de sus propiedades.
- Al referirse a su tamaño ellos afirman: “Es muy pequeño, microscópico.... Como un virus (se refieren al virus como analogía de tamaños más no le consideran una entidad viva)...su tamaño depende de sus capas y sus electrones...pero es muy pequeño”. La mayoría considera que su dimensión tan pequeña hace imposible obtener una imagen aún haciendo uso de tecnología más vanguardista con que se cuenta.
- Al átomo le asignan algunas propiedades macroscópicas propias de las sustancias que forman: se dilatan, tienen propiedades distintas como el color, tiene densidad y resistencia. (Ya se mencionaron estas ideas alternativas en el capítulo anterior del MCM)

b) Sobre partículas atómicas: electrón, protón y neutrón

- La mayoría de los estudiantes reconocen al átomo como una entidad neutra, compuesta de protones, neutrones y electrones, diferenciando un núcleo y a su alrededor electrones girando. “Se refieren a capas, orbitas y niveles indistintamente”.
- En cuanto a la conceptualización de la estructura del núcleo y la corteza, todos localizan los protones en el núcleo, los electrones moviéndose alrededor y la mitad no tiene clara su localización de los neutrones. Al considerar a los electrones como partículas en movimiento su representaciones con orbitas elípticas y circulares son aceptadas como correctas, los diagramas que involucran el concepto de nube electrónica o de orbitales no son reconocidos por los estudiantes de bachillerato.
- Aunque admiten la existencia de diferentes niveles (no relacionan este concepto con la energía) en la estructura de los átomos, no hablan de subniveles y confunden capa,

⁵⁹ Quezada, P., Valcárcel, V. y Sánchez, G., “Relación entre el modelo de átomo de los estudiantes (16-17 años) y los diferentes modelos atómicos presentados en la enseñanza”, *enseñanza de las ciencias*, No. extra VII congreso, pp. 1-5, 2005.

orbita y orbital. Muy pocos hacen referencia a la estructura o distribución electrónica de los átomos y si la mencionan no utilizan notaciones y confunden simbología, por ejemplo hablan de orbitas s y capas p o d.

- Se acepta la existencia de interacción entre las partículas subatómica, admiten la existencia de dos tipos: de contacto y choque (“más intensas en el núcleo, al haber más partículas, “los electrones no las tienen porque no chocan”) y otras de naturaleza eléctrica atractivas y repulsivas (“los protones con las neutras no se repelen”... “ las cargas positivas y negativas se compactan”). Algunos no consideran interacciones entre el núcleo y la corteza (“ entre el núcleo y donde están los electrones hay un vacío que no deja que haya interacción entre ellos”).

c) Sobre los distintos modelos atómicos

- Cuando se muestra a los estudiantes los diferentes modelos atómicos formulados en el siglo XX y que habitualmente son presentados en los libros de texto, las preferidas de los alumnos son las de Bohr y Rutherford porque son las que más se adaptan a sus representaciones conceptuales, además de ser las más difundidas en los medios de comunicación. Sin embargo, resulta imposible para ellos diferenciarlas.
- También se muestran algunas preferencias por la representación de Dalton, pues aunque reconocen que les informa nada sobre la estructura atómica, es la más fácil de aprender e imaginar porque corresponde con la idea del nivel básico de que el átomo es una partícula redonda y maciza. El modelo de Thompson es poco reconocido y la representación de orbitales es irreconocible.
- Un extenso número de investigaciones señalan que la mayoría de los estudiantes presentan ideas alternativas erróneas y dificultades conceptuales muy grandes para reconocer y explicar modelos atómicos y moleculares sofisticados⁶⁰.

Este como otros trabajos relacionados con el cambio conceptual señala dos factores como responsables de esta problemática, por un lado la falta de referentes conceptuales de estos contenidos con la vida cotidiana⁶¹, lo que obliga a la complicada labor docente de interpretar la realidad a través de modelos y construcciones abstractas que muchas veces no llegan al puerto deseado. Por el otro, los libros de texto hegemónicos que en su mayoría de las veces hablan de átomos y partículas axiomáticamente, describiendo a los átomos primeramente con el modelo de Dalton y saltando acríticamente al modelo de Bohr omitiendo un análisis histórico-racional de los mismos.

⁶⁰ Tsarpalis, G. y Papaphotis, G., “High –school Students’ Conceptual Difficulties and attempts at conceptual Change: The case of basic quantum chemical concepts”, *International Journal of Science Educations*, vol. 31 (7), pp. 895-930, 2009.

⁶¹ *Ibid.*

4.2.3 Propuesta Didáctica

La propuesta didáctica para abordar este capítulo, está constituida por tres apartados, el primero de ellos consiste en una introducción conceptual que parte de la visión macro a la visión micro tal como lo recomienda la literatura, para tal fin, se elabora un mapa conceptual, que explique la constitución de la materia, para ello, se consultó la estrategia desarrollada por el Dr. Plinio Sosa Fernández. La segunda parte, es el tratamiento del modelo atómico de Bohr a través de un experimento que fue diseñado y realizado durante la práctica docente II de la MADEMS. Finalmente, el tercer apartado es un análisis cualitativo de los principales resultados experimentales que ofrece la mecánica cuántica para modelar al átomo, centrando la atención en el concepto de orbital por su relevancia para la química.

i. De lo que están hechas las cosas

La presente estrategia es una síntesis del comienzo del primer capítulo de la publicación: Conceptos básicos de Química, libro de apoyo para el bachillerato, CCH-UNAM, 2007 por el Dr. Plinio Sosa Fernández.

- ❖ Se pide a los alumnos que escriban 10 sustancias que recuerden o conozcan.
- ❖ Posteriormente que intercambien su lista con el compañero de al lado
- ❖ Se pide finalmente que los estudiantes con base a los nombres que anotó su compañero argumenten a favor o en contra e intenten llegar a un acuerdo sobre cuales sí son sustancias y cuáles no.

A través de una presentación digital se presentan imágenes de diversos materiales: madera, piedras de distinto tipo, metales, plásticos, burbujas de jabón, gases, medicamentos, alimentos, ropa, instrumentos tecnológicos, etc. Se indaga sobre lo difícil que ha sido para la humanidad averiguar de qué están hechas las cosas, mediante una explicación grafica se presenta la composición de algunos materiales de relevancia (acero, tabaco, agua, proteínas, etc.), así como la importancia que tiene para la química la instrumentación y el análisis. Se define material, mezcla y sustancia.

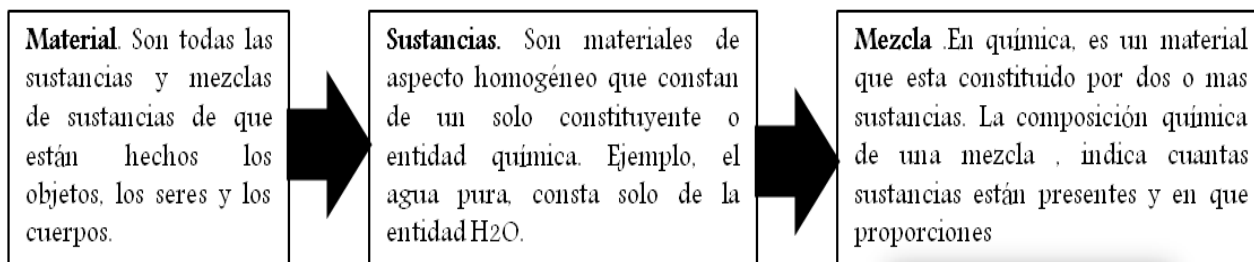


Figura 25. Definición de material, sustancia y mezcla⁶²

⁶² Sosa, P., *Conceptos Base de la Química*, CCH-UNAM, 2007, pp.15-16

Se recomienda abordar la clasificación química de las mezclas y sus características así como la relación que guarda con el concepto sustancia a través de relacionar fotografías y tablas de datos⁶³. Posteriormente se centra la atención en el aprendizaje del concepto de partículas químicas a través de un discurso analógico:

Imagina el objeto más pequeño que puedas. Bueno, pues las partículas que integran a las sustancias... ¡son todavía mucho más pequeñas! Para que tengas una idea, piensa que en un vaso de agua hay un cuatrillón de moléculas (...). ¿De qué tamaño tendrán que ser las partículas químicas para que un cuatrillón de ellas quepa en un vaso de agua? (...) a pesar de su extraordinaria pequeñez, las partículas químicas poseen una estructura interna, dicha estructura es de naturaleza eléctrica: tiene partes positivas (núcleos) y partes negativas electrones....⁶⁴

En la publicación se presentan las definiciones correspondientes a través de recuadros y diagramas que se muestran a continuación:

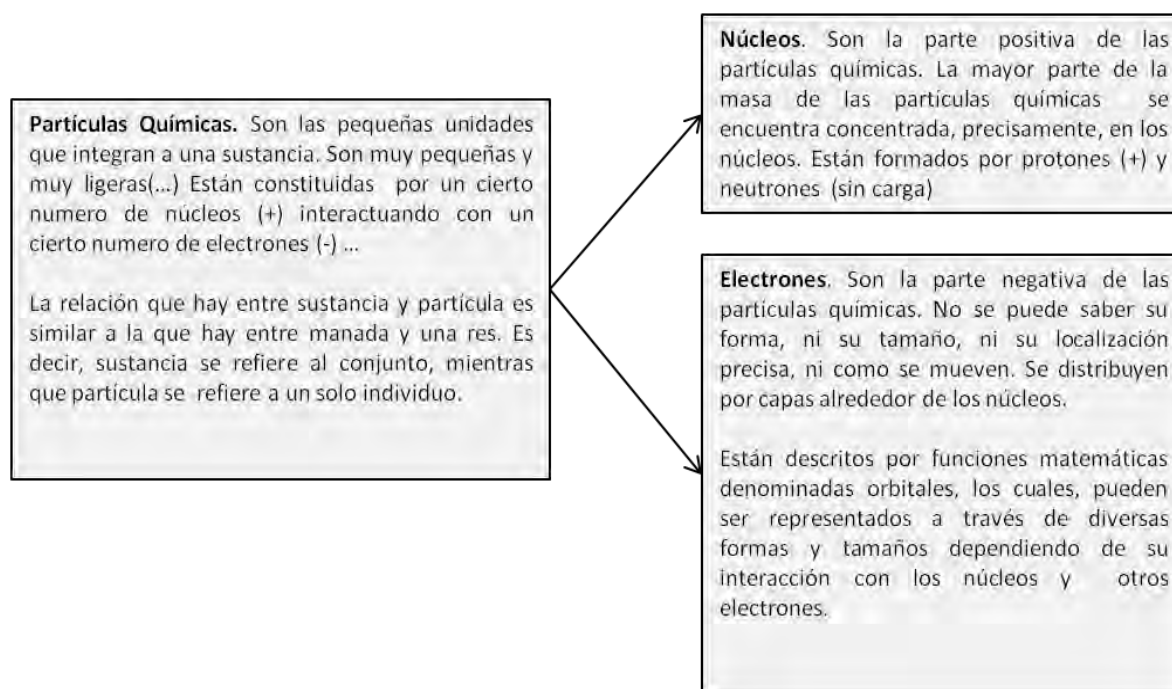


Figura 26. Definición de partículas químicas, núcleos y electrones.

También se sugiere explicar el efecto de las cargas eléctricas en las partículas químicas y caracterizarlas en función de esta propiedad:

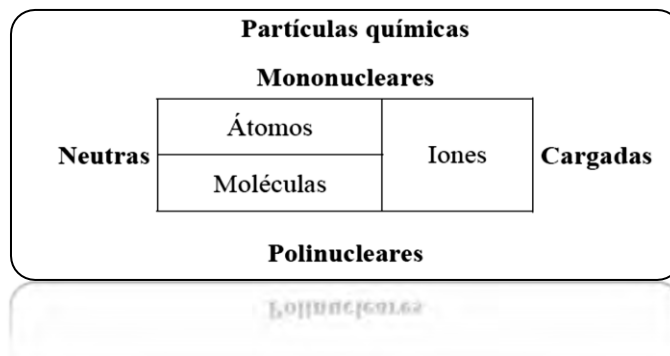
Si el número de cargas positivas y de cargas negativas es el mismo, la partícula será neutra (átomos o moléculas). Si hay más de unas que de otras, la partícula quedará cargada-las partículas cargadas se les denomina iones- los iones positivos se llaman cationes, los negativos, aniones⁶⁵.

⁶³ Óp. cit. pp.18-19

⁶⁴ Ibíd. pp. 19-20

⁶⁵ Ibíd. p. 20

Figura 27. Clasificación de las partículas químicas en función de la carga eléctrica.



Finalmente se resumen los contenidos abordados a través de un mapa conceptual que jerarquiza los conceptos de un nivel macro a un nivel micro de la siguiente forma:

A la pregunta ¿De qué están hechas las cosas?, la ciencia de hoy tiene la siguiente respuesta: todo lo que hay en el universo, todos los objetos, los cuerpos y los seres que existen, están hechos de materiales. Los materiales, a su vez, pueden estar formados por uno o varios constituyentes llamados sustancias. Las sustancias consisten de pequeñas partículas llamadas iones, moléculas y átomos. En el siguiente un mapa conceptual se resume dicha información⁶⁶.

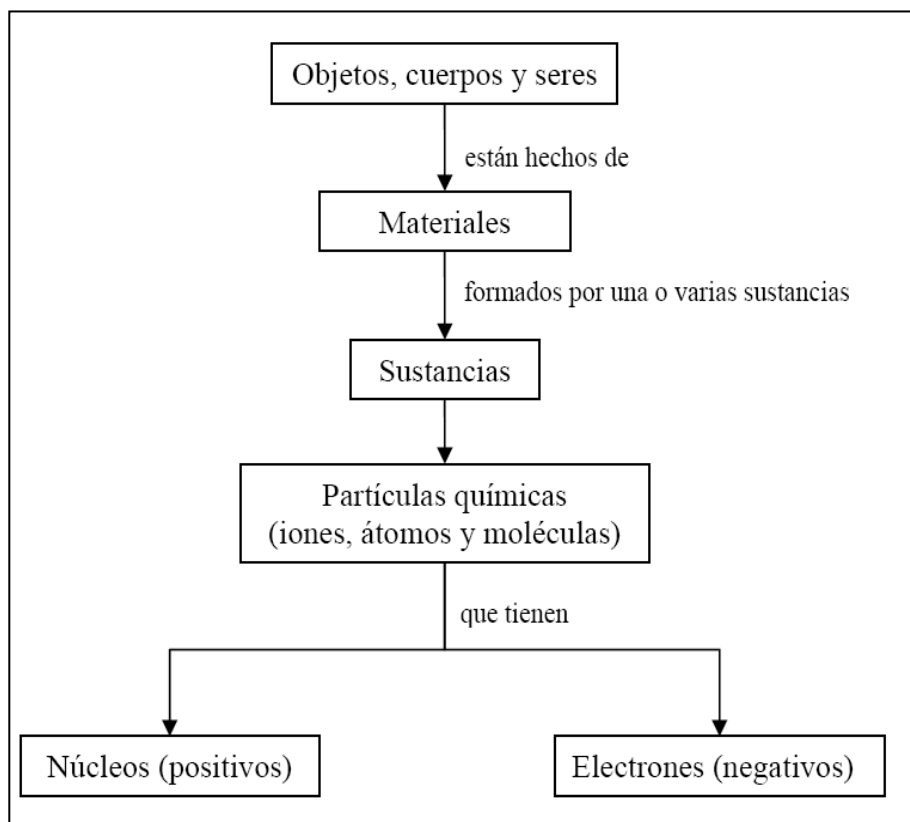


Figura No.28. Diagrama conceptual que explica la constitución química de la materia.

⁶⁶ Ibid. p.21.

ii. El modelo atómico de Bohr a través de un experimento.

El diseño experimental que se presenta a continuación es producto del curso de didáctica de la química y la práctica docente II del actual programa de la MADEMS. Fue presentado al grupo 559 del plantel No. 1, de la ENP, bajo la supervisión de la Mtra. Lilia Gasca Pineda a finales del año 2008. La referencia teórica que encauzó este diseño experimental fue el texto: fundamentos y diseño de las prácticas escolares de ciencias experimentales de Mercé Izquierdo y Neus Sanmartí⁶⁷. Un texto revisado y discutido en el curso de didáctica.

“Análisis de la luz emitida por sales metálicas al ser sometidos al efecto de una llama”

- a) **Objetivo:** Proveer de una explicación científica a la luz emitida por algunas sales metálicas al ser expuestas a la llama de un mechero usando el modelo atómico de Bohr.

Se diseñó un pequeño cuestionario⁶⁸ que debía resolverse grupalmente para conocer las ideas previas de los estudiantes sobre el fenómeno y monitorear su desempeño durante el experimento. Como primer paso en su elaboración se buscó un fenómeno analógico extraído de la vida cotidiana que tenga una relación directa con el contenido disciplinar, con el objetivo de incrementar el interés de los estudiantes sobre el experimento. La analogía fue indagar sobre la razón que hace que los fuegos artificiales sean tan espectaculares. Como recomienda la literatura, en este cuestionario también se exploraron las ideas de los estudiantes respecto al fenómeno al terminar el experimento, este cuestionario se puede consultar en el apéndice 5, así como algunos ejemplos en su resolución.

Un ejemplo de las ideas previas recabadas sobre la explicación del fenómeno analógico se presenta a continuación:

La Polvora tiene mezclados varios elementos que al reaccionar con el fuego explotan y liberan luces y sonidos diferentes.



Figura 29. La emisión de luz de los fuegos artificiales puede ser explicada con el modelo atómico de Bohr.

⁶⁷ Izquierdo, M., Sanmartí, N,y Espinet, M., “Fundamentación y diseño de las prácticas escolares de ciencias experimentales”, *enseñanza de las ciencias*, vol. 17 (1), pp.45-59, 1999.

⁶⁸ El cuestionario y las respuestas obtenidas del mismo puede consultarse en el apéndice No. 5.

Una vez que l@s alumn@s indagán sobre sus ideas del fenómeno, se sugiere proporcionarles pistas científicas a considerar durante la realización del experimento. En este caso concreto se les invita a considerar:

- La composición química (cuestión que ell@s manifiestan tener en cuenta).
- La estructura interna de los elementos, es decir, la existencia de núcleos y electrones.
- El efecto del calor o energía externa.

b) Diseño del experimento

El experimento fue secuenciado para resolver preguntas específicas que conduzcan al estudiante a la explicación científica del fenómeno a través de evidencias experimentales, para ello, la literatura sugiere tres preguntas: ¿qué tengo?, ¿qué hago? y ¿qué pasa? cuando se responden las tres preguntas a la vez y de manera coherente, los datos que obtengan tendrán sentido y la experiencia globalmente servirá para aprender.⁶⁹

¿Que tengo? ¿Qué hago? ¿Qué pasa?

- **¿Que tengo?** Para responder a esta pregunta se les presenta a los estudiantes el material por utilizar. Se cuenta con disoluciones saturadas de sales metálicas en diferentes atomizadores, donde los metales se encuentren en forma de iones, es importante que l@s alumn@s reconozcan el concepto de ion y disolución. Posteriormente se habla sobre la función y las precauciones al utilizar el mechero de Bunsen.

| <i>Disolución</i> | Metal en forma de ión | Coloración |
|-------------------|------------------------------|-------------------|
| LiCl | Li ⁺ | transparente |
| NaCl | Na ⁺ | transparente |
| KI | K ⁺ | transparente |
| CaCl ₂ | Ca ²⁺ | transparente |
| CuSO ₄ | Cu ²⁺ | azul |

Es importante que l@s jóvenes tomen nota sobre el aspecto de las disoluciones, pues más adelante notarán que no tiene relación con los colores que emiten estas sustancias.

- **¿Qué hago? o modelo de la acción.** Se explican las acciones por emprender. Esparcir las disoluciones lentamente colocando los atomizadores hacia arriba de la flama del mechero, esperar un instante a que hagan contacto con la llama y registrar lo que sucede.

⁶⁹ Óp. cit., p. 53

- **¿Qué pasa? ¿Hasta cuando pasa?** Los alumnos en sus bitácoras recolectaran observaciones de las diferentes luces observadas, sus características y emitirán hipótesis articulando las pistas científicas proporcionadas; es decir, darán una explicación macroscópica del fenómeno observado.

Es importante tener en cuenta que estas tres preguntas solamente conducirá a una explicación macroscópica del fenómeno, por lo que será necesario agregar otra pregunta que nos conduzca al modelo atómico de Bohr: **¿Por qué pasa?**

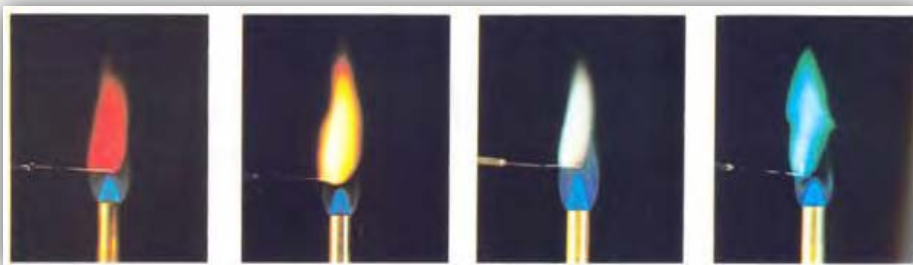


Figura 28. Luz emitida por litio, sodio, potasio y cobre al contacto con la flama de un mechero

Después de realizar los experimentos los alumnos redactaron sus explicaciones macroscópicas del fenómeno, a continuación se muestran un par de ejemplos:

observada por los metales en disolución? Li^+ - rojo $CaCl_2$ - naranja
 Que al reaccionar con Cu^{2+} - verde K^+ - rosa
 el calor reaccionan los elementos $NaBr$ - naranja

observada por los metales en disolución? Por que al contacto del fuego con la sustancia hay una combustión la cual provoca una reacción Química y por eso cambia de color y cada metal tiene su color

Los estudiantes asocian el cambio de color al efecto del calor sobre las sales, sin embargo sus ideas sobre el fenómeno siguen siendo erróneas, ellos argumentan que ocurrió una reacción química por el cambio de coloración, ya que este es uno de los criterios que caracteriza a un cambio químico. Lo que hace fundamental, proporcionar una explicación teórica que relacione el fenómeno observado con los postulados del modelo atómico de Bohr de forma cualitativa. Para ello, se uso un video dirigido a estudiantes de bachillerato que explica la relación de este modelos con la emisión de luz de los materiales, también se recomienda el uso de animaciones digitales sobre todo para explicitar a los estudiantes los saltos o transiciones electrónicas que describen la absorción y la emisión de energía y con ello la emisión de luz.

Relacionar los aspectos teóricos con las evidencias experimentales permitió obtener una explicación microscópica del experimento. Dado el carácter empírico del modelo, la explicación teórica se vuelve un hecho trascendente.

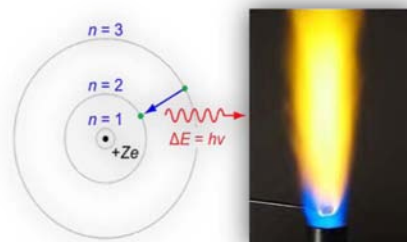


Figura 29. Las transiciones electrónicas del modelo de Bohr explican de forma la emisión de luz de los materiales.

¿Por qué pasa?

Para monitorear la explicación científica del experimento se les pide a los equipos que discutan y contesten las últimas dos preguntas del instrumento. Se muestran algunas respuestas obtenidas.

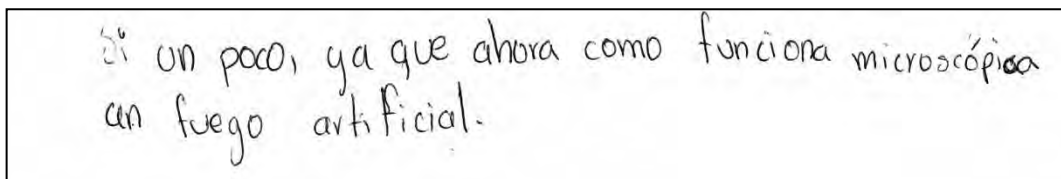
al arrojar el metal a la flama del mechero se excitan los iones dan saltos de orbitas de menores a mayores y regresan instantaneamente a la velocidad de la luz, la luz producida se asocia a este movimiento

observada por los metales en disolución? que cuando hay fuente de energía externa hay excitación de electrones lo cual provoca saltos de electrones a diferentes orbitas y al regresar a su órbita emiten luz la cual se llama energía de emisión.

En cuanto a la explicación microscópica del fenómeno estudiado se encontró al revisar los 10 instrumentos coincidencia en explicar el fenómeno como una relación materia – energía (iones, átomos, electrones que entran en contacto con el calor que proporcionado por el mechero). Sin embargo, sigue existiendo una confusión conceptual en cuanto al concepto de transición electrónica, algunos equipos escribieron que son los iones o los átomos los que saltan, es decir, se constata una multicitada dificultad conceptual para referenciar a la materia, los estudiantes tienden a confundir o entremezclar acriticamente los términos átomo, molécula, ion, electrón, etc. Cuestión que invita a emprender acciones didácticas para hacer más claro y concreta su comprensión, por ejemplo el uso del mapa conceptual citado en el anterior apartado podría ser de gran ayuda.

Los alumnos también identificaron que cada metal tiene un color diferente, hecho que puede usarse como puente para señalar la importancia que tiene la espectroscopia para el estudio de este modelo, la materia y la química en general. En general la mayoría de los equipos se esforzó en dar una explicación microscópica del fenómeno usando el tercer postulado del átomo de Bohr concerniente a la emisión de energía de los elementos.

Es clara cierta desarticulación conceptual en sus redacciones, hecho que es normal, dada su poca familiaridad con el trabajo experimental. Finalmente se les pide a los alumnos que contesten si cambió su concepción sobre el fenómeno analógico referenciado, la explicación sobre las luces emitidas por los fuegos artificiales. Se muestran una de sus respuestas.



Si un poco, ya que ahora como funciona microscópica en fuego artificial.

Como docente en formación es muy importante considerar, que algunas de las respuestas obtenidas en algunos casos fruto de la sinceridad y una comprensión adecuada del experimento, pero también en muchos otros, una repetición acrítica de lo abordado teóricamente o de lo que los alumnos creen que el profesor quiere ver en los cuestionarios. Una de tantas cuestiones subjetivas que hay que enfrentar en el aula. Lo que es un hecho es que aunque sus ideas previas no se modificaron significativamente como lo sostiene la teoría pedagógica, una buena parte de los estudiantes insertaron elementos adicionales a su marco explicativo previo, lo cual, consideramos como una cuestión positiva.

iii. El modelo atómico actual y el concepto de Orbital.

En la actualidad la estructura de la materia se estudia y se explica a través de un cuerpo de conocimientos físico-químicos desarrollados en el primer tercio del siglo XX denominados mecánica cuántica. A través de un modelo enraizado en complejos cálculos matemáticos, los científicos explican de forma racional la constitución y el comportamiento químico de todos los materiales y sustancias de que se tiene cuenta.

El modelo actual del átomo es referenciado en muchos libros como el modelo de “nube electrónica”, ya que la mecánica cuántica representa a los átomos como entidades constituidas por un pequeño core o corazón positivo rodeado de una enorme región donde se encuentran los electrones más externos en forma de una nube. De esta forma, la descripción cuántica de la materia centra su atención en el comportamiento electrónico tomando en consideración los siguientes resultados experimentales:



La ecuación de Schrödinger y su interpretación probabilística a través del principio de incertidumbre de Heisenberg son las bases de la descripción cuántica de la materia. En la fotografía Heisenberg (derecha) y Erwin Schrödinger (izquierda) con el Rey de Suecia en la ceremonia del premio Nobel en 1933.

- i. **No es posible localizar con precisión un electrón en el átomo.** Sólo es posible describir o pronosticar a través de cálculos probabilísticos las regiones donde pudieran encontrarse. Estos cálculos dan origen a las funciones de onda Ψ que son las que conocemos como orbitales, cuyo cuadrado (Ψ^2) representa una densidad de probabilidad en relación con la distribución de los electrones.



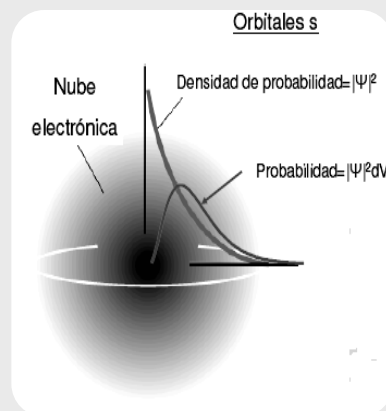
¿Los electrones se encuentran en los orbitales? ... ¿El sol sale por las mañanas?



Es común encontrar en algunos libros de texto de química o escuchar de los alumnos e incluso de los profesores la siguiente explicación: “*Los orbitales son regiones o lugares donde se encuentran los electrones*”. Esta aseveración es válida desde el punto de vista didáctico pero no es del todo correcta desde el punto de vista científico, en realidad esa frase **es una metáfora** como tantas que usamos en la vida cotidiana. Por ejemplo, decimos que el sol “sale” por la mañana y se “mete” por la noche, cuando en realidad el sol ni sale ni se mete a ningún lado. Cierto es que todas las mañanas se ilumina el cielo con mayor o menor intensidad por efecto del sol y que cualquier ser humano en cualquier parte del mundo relaciona un amanecer o un atardecer con la salida u ocultamiento del sol, sin embargo, esta explicación es científicamente incorrecta.

Desde hace siglos la astronomía atribuye la existencia del día y de la noche no a las puestas del sol, sino, al movimiento de rotación que realiza la tierra sobre su propio eje o un eje ideal que pasa por los polos del planeta, esta rotación tiene una dirección de Oeste-Este produciendo la impresión que es el cielo el que gira alrededor de la tierra. Nuestro planeta tarda 23 horas con 56 minutos en completar su movimiento de rotación, siendo de día el tiempo en que nuestro horizonte aparece iluminado por el sol, y de noche cuando el horizonte queda oculto a los rayos solares. La salida del sol en los días o su ocultamiento durante la noche es una metáfora práctica que hace entendible un fenómeno natural más complejo cuya veracidad pareciera absurdo discutir. Lo mismo ocurre en el caso de la enseñanza del concepto de orbital atómico, los orbitales no son precisamente regiones o zonas que contienen electrones, sino, representaciones gráficas de funciones matemáticas que describen la posible localización de los electrones a través de densidades probabilísticas.

El tratamiento matemático del concepto de orbital es poco relevante en la enseñanza de la química en el bachillerato, por lo que el uso de la metáfora antes mencionada es un recurso didáctico viable para aproximar a los estudiantes al concepto de orbital, sin embargo, es muy importante que los alumnos reconozcan que un orbital atómico **es una función matemática que describe la disposición espacial de los electrones en el modelo atómico actual**. Su relevancia química estriba en que a través de los orbitales es posible modelar los enlaces químicos y la geometría de las moléculas. Desde el punto de vista docente, sería importante considerar lo que se ha citado en capítulos anteriores: dotar de un sentido metafórico/analógico al discurso escolar hace más significativos nuestras clases de química.



- ii. Los orbitales son modelados con distintas formas, tamaños y disposiciones espaciales a través de lo que se conoce como números cuánticos. Los números cuánticos son valores numéricos (soluciones de la ecuación de Schrödinger) que permiten situar electrones dentro de los átomos y asociarles un estado energético, son utilizados para caracterizar algunas propiedades de los orbitales. Los números cuánticos que definen a un orbital son tres:

Los resultados experimentales muestran que los orbitales más cercanos a los núcleos son pequeños, mientras, que los orbitales más alejados del núcleo o más externos son de gran tamaño respecto a los primeros.

- ❖ Número Cuántico Principal (n). Indica el tamaño o volumen de un orbital. A mayor valor de “ n ” mayor tamaño del orbital. Puede tomar valores enteros de 1 a ∞ . Sin embargo, para el estudio de los elementos en la tabla periódica convencionalmente toma valores de 1 a 7 ya que este valor se asocia con cada uno de los periodos de la tabla periódica. La energía de un orbital depende del número cuántico principal “ n ”.
- ❖ Número Cuántico Secundario (ℓ). Muestra la forma del orbital atómico en cuestión. Puede tomar valores enteros desde 0 hasta $n-1$ ($\ell = 0, 1, 2, 3 \dots n-1$)
- ❖ Número Cuántico Magnético (m). Informa la orientación espacial de los orbitales atómicos. Puede tomar los valores enteros comprendidos entre $-\ell$ y $+\ell$, incluido el cero ($m = -\ell, \dots, 0, \dots, +\ell$).

En general la forma, tamaño y disposición espacial de los orbitales depende de su interacción con el núcleo y otros electrones.

Hay varios tipos de orbitales atómicos siendo los convencionales los orbitales de tipo: s, p, d y f.

- iii. La energía de los electrones dependerá de la forma y el tamaño de los orbitales en el que se encuentre. Entre más grande sea el orbital que describa el comportamiento de un electrón, mayor será la energía asociada a este.

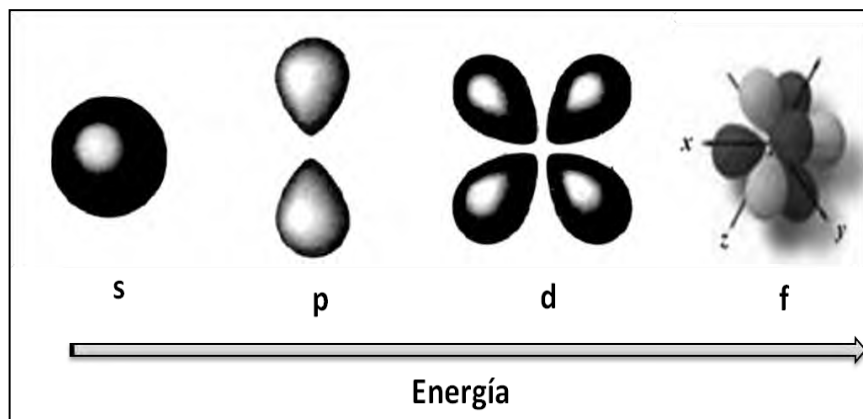
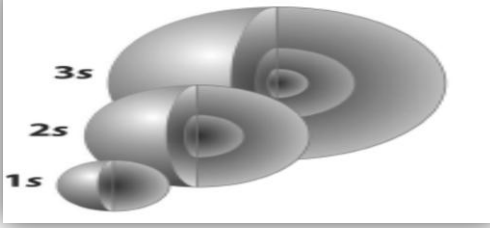
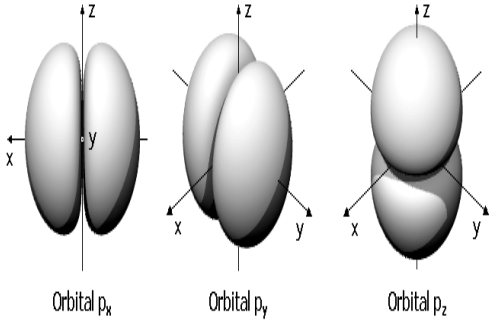
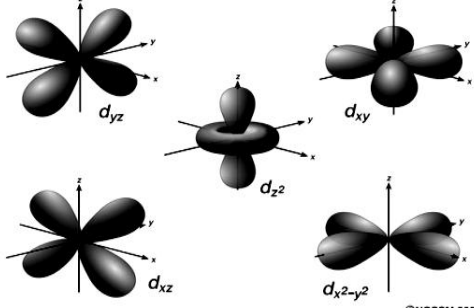
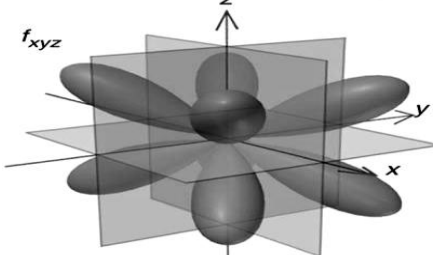


Figura 30. Variación energética de los electrones en los distintos orbitales atómicos considerando un mismo valor de n .

Los símbolos que se utilizan para denotar a los orbitales atómicos, están relacionados con la terminología que se utilizó para clasificar las líneas espectrales, en los primeros estudios espectroscópicos de los elementos químicos. Estos grupos de líneas se denominaron: **Sharp** (líneas nítidas pero de poca intensidad), **diffuse** (líneas difusas), **principal** (líneas intensas), **fundamental** (líneas frecuentes espectros). De estos nombres provienen las letras **s, p, d y f**, después de la letra **f** la

Tabla1. Características y formas de los orbitales.⁷¹

| Tipo de orbital | Características | Forma |
|-----------------|---|--|
| Orbitales "s" | Tienen forma esférica, están descritos por $\ell = 0$. En todas las capas electrónicas hay un orbital de tipo "s" y sólo uno. Con estos orbitales es posible estudiar el comportamiento de dos electrones (según el principio de exclusión de Pauli) ⁷⁰ |  |
| Orbitales "p" | Son tres orbitales con forma de dos esferas achatadas hacia un punto de contacto, uno vertical, otro horizontal y uno perpendicular. En estos orbitales $\ell = 1$. A través de ellos es posible estudiar el comportamiento de seis electrones ya que a cada uno de ellos se le asigna un par de electrones. Los tres tienen la misma energía. |  |
| Orbitales "d" | Son cinco orbitales con formas (lóbulos) y disposiciones espaciales diversas. Para estos orbitales $\ell = 2$. A través de ellos es posible estudiar el comportamiento de diez electrones, ya que, a cada uno de ellos se le asigna un par de electrones. Los cinco tienen la misma energía. |  |
| Orbitales "f" | Son siete orbitales con formas y disposiciones espaciales complejas con $\ell = 3$. A través de ellos es posible estudiar el comportamiento de catorce electrones ya que a cada uno de ellos se le asigna un par de electrones. Los 7 tienen la misma energía. |  |

⁷⁰ Principio de exclusión de Pauli. "En un átomo no puede haber dos electrones con los cuatro números cuánticos iguales". De este principio se deduce que en un orbital sólo caben dos electrones y deben tener spins opuestos.

⁷¹ Didácticamente, es recomendable presentar las imágenes de los orbitales atómicos a través de animaciones digitales.

- iii. **Los electrones se distribuyen por capas alrededor del núcleo.** Cada capa electrónica agrupa a un conjunto de orbitales con energías similares (no idénticas pero si con valores muy cercanos)⁷². Las capas electrónicas más cercanas al núcleo contienen orbitales más pequeños y de menor energía (potencial), mientras, que las capas más externas como la de valencia poseen conjuntos de orbitales más voluminosos y energéticos. Se sabe que las capas electrónicas más lejanas contienen un conjunto mayor de orbitales que las capas más cercanas al núcleo, las cuales, forman parte del core.

Los orbitales del mismo tipo, en diferentes capas electrónicas, tienen la misma forma, pero distintos tamaños y energías.

El modelo de capas es actualmente una herramienta didáctica consolidada para dar tratamiento a temas como la escritura de configuraciones electrónicas y propiedades periódicas de los elementos, lo peculiar de esta metodología, es que no centra su atención en el tratamiento de conceptos cuánticos, sino en evidencias experimentales, en específico, en la primera energía de ionización de los primeros 20 elementos de la tabla periódica⁷³. Con ellas se puede explicar la distribución electrónica de los átomos de los primeros 20 elementos. Se recomienda revisar a profundidad esta estrategia en el libro “Química Estructura y Dinámica” publicado por CECSA en el año 2000⁷⁴.

Para denotar las distintas capas electrónicas se hace uso de la siguiente metodología: se usa un coeficiente entero con el valor de **n**, que indica el número de la capa al cual se asocia un estado energético, posteriormente la letra asignada para cada uno de los orbitales involucrados; **s** ($\ell=0$), **p** ($\ell=1$), **d** ($\ell=2$) y **f** ($\ell=3$). Finalmente como superíndice en cada uno de los diferentes orbitales en cuestión se indica el número de electrones.



Figura 31. Notación utilizada en la escritura de configuraciones electrónicas según el modelo de capas.

Capas Electrónicas

| | |
|---------|-----------------------------|
| primera | $1s^2$ |
| segunda | $2s^2 2p^6$ |
| tercera | $3s^2 3p^6$ |
| cuarta | $4s^2 3d^{10} 4p^6$ |
| quinta | $5s^2 4d^{10} 5p^6$ |
| sexta | $6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$ |
| séptima | $7s^2 5f^{14} 6d^{10} 7p^6$ |

↓
Energía

La distribución por capas de los electrones en los orbitales atómicos se relaciona con tres postulados teóricos, el primero de ellos es la Ley de Coulomb que describe la atracción hacia el núcleo de los electrones de un átomo por tener cargas opuestas, el segundo es el principio de construcción progresiva (aufbau) o de mínima energía que indica que los electrones tienden a ocupar cuando hay varios orbitales disponibles los de menor energía y finalmente el principio de exclusión de Pauli, que explica la imposibilidad de que más de dos electrones puedan estar descritos por orbitales con iguales números cuánticos.

Figura 32. Variación energética en las diferentes capas electrónicas

⁷² Sosa, P., *Conceptos Base de la Química*, cit., p. 72

⁷³ Gillespie, Spencer y Moog, “Demystifying Introductory Chemistry. Part1: Electron Configurations from experiments”, *Journal of Chemical Education*, vol. 73 (7), pp. 617-622, 1996

⁷⁴ Spencer, N., Bodner G., y Rickard, L., “Química Estructura y Dinámica”, CECSA, México, 2000, pp. 93-110

De este principio también se deduce la razón de un cuarto número cuántico denominado spin, al cual, se asocia con la propiedad de giro de los electrones. Estos tres principios junto con la regla de máxima multiplicidad de Hund son los fundamentos teóricos de la distribución por capas de los electrones, sin embargo, se recomienda que su tratamiento con los alumnos sea superficial e incluso puede omitirse si se trabaja con la metodología descrita por Spencer⁷⁵ o del Dr. Plinio Sosa⁷⁶.

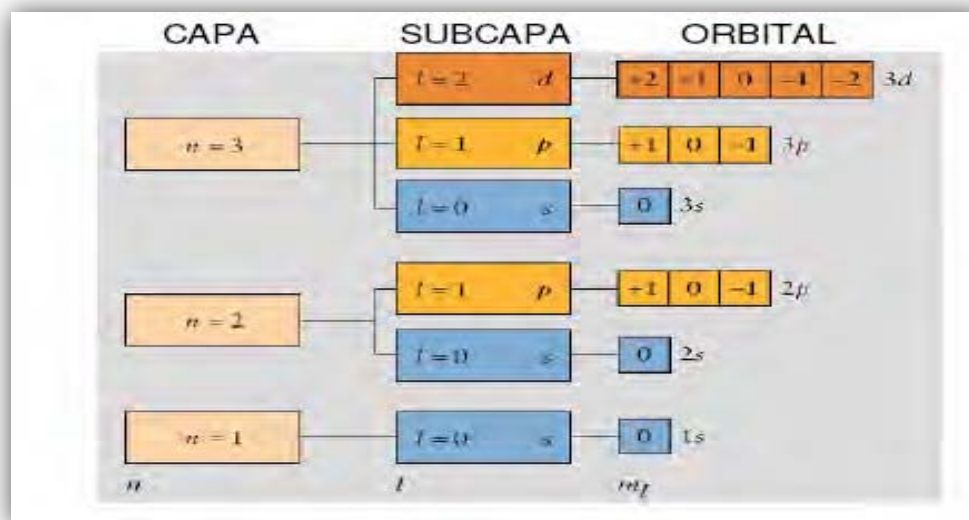


Figura 32. Combinaciones permitidas de los números cuánticos n y l en las tres primeras capas electrónicas. A la derecha de estas combinaciones se muestran los orbitales resultantes.

Es muy importante, explicarle a los estudiantes el gran significado que tiene la modelación por capas de la distribución electrónica para los procesos químicos, en los cuales, la última capa ocupada y la primera vacía son las protagonistas principales en las reacciones químicas, porque son las que están involucradas en la donación y aceptación de electrones.

Cuando una partícula gana un electrón, este ocupará algún dominio de la primera capa vacía⁷⁷. Esta modelación refuerza la comprensión del átomo de acuerdo al paradigma cuántico actual, con un core integrado por el núcleo y una última capa denominada capa de valencia porque algunos de los electrones presentes en esta son los denominados electrones de valencia. No son todos los electrones presentes en la última capa los de valencia, son solamente, los más externos, es decir, los menos atraídos por el núcleo, los que pueden interactuar con mayor facilidad con otras partículas químicas.

En general, los electrones de valencia están descritos por los orbitales de la última capa.

⁷⁵ Spencer, N., Bodner G., y Rickard, L., “Química Estructura y Dinámica”, cit., pp. 95-110





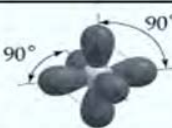
⁷⁶ Sosa, P., *Conceptos Base de la Química*, CCH-UNAM, cit., pp. 76-89.

⁷⁷ *Ibid.*, p 82

Se puede afirmar que el tratamiento del modelo cuántico y el concepto de orbital favorecería la enseñanza una visión unitaria del enlace químico⁷⁸. Por ejemplo, cuando este se produce entre átomos idénticos, la distribución de probabilidad de los electrones de valencia se encuentra muy localizada en la región internuclear. En los enlaces covalentes entre átomos diferentes, dicha distribución se encuentra desplazada hacia el átomo más electronegativo (originando moléculas polares), siendo en los sólidos iónicos tan grande este desplazamiento, que es una aproximación razonable considerarlos constituidos por iones. En el caso extremo de los metales se tienen distribuciones de probabilidad que se extienden por todo el cristal, es decir, existencia de electrones deslocalizados, que explican su elevada conductividad eléctrica.

Finalmente como se ha mencionado en este apartado otra propiedad química a considerar que se atribuye a los orbitales es la comprensión de la geometría molecular de las sustancias, por ejemplo, las denominadas estructuras de Lewis (un modelo de electrones puntuales que no incluye orbitales) en la mayoría de los libros de texto pueden ser explicadas a través de la representación de orbitales híbridos (combinaciones lineales de orbitales mononucleares). De esta forma, se puede afirmar, que la geometría molecular dependerá del número de orbitales alrededor de un core central, así que, la mayoría de los sistemas químicos estructurales son combinaciones de triángulos, tetraedros, pirámides, octaedros, etc.

Tabla 2. Modelación de la geometría de algunas moléculas representativas a través de orbitales híbridos

| No. de pares e ⁻ | Ejemplos | Estructura de Lewis (ejemplo) | Geometría | Hibridación | Modelación Geométrica |
|-----------------------------|---|--|---------------------|--------------------------------|---|
| 2 | BeF ₂ , CO ₂ , CO, N ₂ | $\begin{array}{c} \text{:} \\ \text{O}=\text{C}=\text{O} \\ \text{:} \end{array}$ | Lineal | sp |  |
| 3 | NO ₃ ⁻ , O ₃ , SO ₂ , O ₂ | $\left[\begin{array}{c} \text{:O:} \\ \text{N} \\ \text{:O:} \end{array} \right]^-$ 120° | Triangular | sp ² |  |
| 4 | CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O, OH ⁻ | $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$ 108.70 pm | Tetraédrica | sp ³ |  |
| 5 | PCl ₅ , SF ₄ , I ₃ ⁻ , XeF ₂ | $\begin{array}{c} \text{:Cl:} \\ \text{:Cl:} \\ \text{:Cl:} \\ \text{P} \\ \text{:Cl:} \\ \text{:Cl:} \end{array}$ | Bipirámide trigonal | dsp ³ |  |
| 6 | SF ₆ , XeF ₄ , BrF ₅ , SbCl ₅ ²⁻ | $\begin{array}{c} \text{:F:} \\ \text{:F:} \\ \text{:F:} \\ \text{S} \\ \text{:F:} \\ \text{:F:} \end{array}$ | Octaédrica | d ² sp ³ |  |

⁷⁸ Solbes, j., Silvestre V. y Furió C., "El desarrollo histórico del enlace químico y sus implicaciones didácticas", *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*, No.24, pp. 83-106, 2010, p.102

4.3. Bibliografía

- Bombal, F., “Los modelos matemáticos de la mecánica cuántica”, *Ciencia en el siglo XX: Seminario “Orotava” de Historia de la Ciencia*, Consejería de educación del gobierno de Canarias, pp. 115-146, 1999.
- Braun, E., *La faceta desconocida de Einstein*, colección ciencia para todos, FCE, México, 1997.
- Casado, M., “De la equivalencia matemática entre la mecánica matricial y la mecánica ondulatoria”, *Gaceta de la real academia matemática española*, vol. 10 (1), pp. 103-128, 2007
- Cruz, Chamizo, Garritz, *Estructura atómica un enfoque químico*, Addison-Wesley, E.U.A, 1987.
- García-Colín, Mazari y Moshinky, *Niels Bohr: científico, filósofo, humanista*, 3ª reimpresión, colección ciencia para todos, FCE, México, 2003.
- Gillespie, R., Spencer, J. y Moog, R., “Demystifying Introductory Chemistry, Part. 1: electron configurations from experiments”, *Journal of chemical education*, vol. 74 (7), pp. 617-622, 1996.
- González, M., “Probabilidad y causalidad en la filosofía de Max Born”, *Anales del Seminario de Metafísica*, vol. 38, Universidad Complutense de Madrid, pp. 241-269, 2005.
- Izquierdo, M., Sanmartí, N,y Espinet, M., “Fundamentación y diseño de las prácticas escolares de ciencias experimentales”, *enseñanza de las ciencias*, vol. 17 (1), pp.45-59, 1999.
- Jensen, W., “One Chemical Revolution of Three?”, *Journal of Chemical Education*, vol. 75 (8), 961-969, 1998.
- Kuhn, T., *La estructura de las revoluciones científicas*, 3ª edición, FCE, México, 2007.
- Leary, J. y Kippeny, T., “A Framework for Presenting the Modern Atom”, *Journal of Chemical Education*, vol. 76 (9), pp. 1217-1218, 1999.
- March, R., *Física para poetas*, 12ª edición, siglo XXI , México, 2003.
- Mehra, J., Rechenberg, H., “The historical development of quantum theory”, *Springer-Verlag New York Inc.*, vol. 1 (1) 1982.
- Menchaca, R., *El discreto encanto de las partículas elementales*, FCE, 1996 en biblioteca digital ILCE : http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/068/htm/sec_6.htm
- Oregon State University:
<http://osulibrary.orst.edu/specialcollections/coll/pauling/cronologia/page18.html>
- Peniche, J., *La tabla periódica (los elementos y la estructura atómica)* en: http://cea.quimicae.unam.mx/~Estru/tabla/09_Estructura.htm
- Quezada, P., Valcárcel, V. y Sánchez, G., “Relación entre el modelo de átomo de los estudiantes (16-17 años) y los diferentes modelos atómicos presentados en la enseñanza”, *enseñanza de las ciencias*, No. extra VII congreso, pp. 1-5, 2005.

Rutherford, E., “the structure of the atom”, *Philosophical Magazine*, vol. 27, pp. 488-498, 1914.

Sosa, P., *Conceptos Base de la Química*, CCH-UNAM, México, 2007.

Solbes, J., Silvestre V. y Furió C., “El desarrollo histórico del enlace químico y sus implicaciones didácticas”, *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*, No.24, pp. 83-106, 2010.

Spencer, N., Bodner G., y Rickard, L., *Química Estructura y Dinámica*, CECSA, México, 2000.

Taber, K., “The atom in the chemistry curriculum: Fundamental concept, teaching model or epistemological obstacle?”, *Foundations of Chemistry*, vol. 5(1), pp. 43-84, 2003.

Thomson, J., J., “The discovery of the electron In: The Autobiography of Science”, R. Moulton. & J. J. Schifferes, *New York: Doubleday*, pp. 503-506, 1960.

Tsarpalis, G. y Papaphotis, G., “High –school Students’ Conceptual Difficulties and attempts at conceptual Change: The case of basic quantum chemical concepts”, *International Journal of Science Educations*, vol. 31 (7), pp. 895-930, 2009.

Comentarios Finales

El presente trabajo estuvo guiado por una serie de reflexiones docentes sobre los contenidos que consideramos clave en el tratamiento químico de la estructura de la materia en el nivel preuniversitario. En concreto, se propusieron dos aspectos para mejorar la docencia sobre el tema: el uso de la historia como herramienta interpretativa en la organización curricular y la incorporación adecuada de contenidos actualizados en su didáctica.

La historia como recurso educativo es imprescindible para entender la naturaleza de la ciencia, cuestionar el dogmatismo, mejorar la comprensión disciplinar y dotarla de sentido humano. La historia permite fomentar una visión más heurística y menos abstracta de la ciencia haciéndola más cercana a los estudiantes y la sociedad en general. Como se mencionó con anterioridad, lo que este texto pretende es invitar al profesorado a que se apoye en la historia de la teoría atómica para tomar decisiones sobre qué enseñar, estableciendo criterios que le permitan clarificar a los estudiantes el cómo y por qué se construyeron ciertos conocimientos disciplinares, más aún, la orientación histórica se propone en oposición a la deshumanización que permea a las carreras científicas y técnicas en décadas anteriores, y concretamente en México, como una renovación del compromiso de los universitarios con la sociedad.

El segundo aspecto es didáctico y tiene que ver con el tratamiento formal de algunos contenidos que los docentes en la actualidad incorporan implícitamente en su discurso, pero que no reconocen explícitamente. En el análisis sobre el CPC (conocimiento pedagógico del contenido) presentado en el primer capítulo, se pudo constatar, que el modelo de Dalton y el MCM (modelo cinético molecular) continúan siendo la base disciplinar con la que los docentes agotan la explicación de la estructura de la materia en el bachillerato, restándole importancia a los modelos de naturaleza cuántica argumentando que su complejidad matemática los hacen intratables e incomprensibles para los estudiantes. Sin embargo, los docentes entrevistados y en general, consideran al enlace químico como un tema esencial en la enseñanza de nuestra disciplina y para explicarlo hablan de electrones de valencia, partículas subatómicas (electrones y protones), cargas asociadas a estas partículas, distribuciones electrónicas, geometrías de enlace, orbitales, etcétera. Todos estos conceptos y modelos de naturaleza cuántica, los cuales, no son abordados formalmente cuando se referencia a la materia. La consecuencia de esta omisión agudiza los problemas epistemológicos que reporta la literatura cuando se exploran los conocimientos de los bachilleres sobre el tema.

Somos conscientes que esta problemática es compleja y tiene que ver con todas las esferas que dan contexto al trabajo educativo, y no se resuelve sólo con la inclusión de ciertos contenidos disciplinares. A pesar de ello, estamos convencidos que la inclusión cuidadosa y adecuada de ciertos conceptos y modelos cuánticos es una contribución mínima en el campo de la didáctica que merece el beneficio de ser emprendida con toda seriedad. Por esta razón, en el último capítulo de esta tesis se presentaron reflexiones y estrategias docentes para el tratamiento de estos contenidos, consideramos que esta es la contribución esencial del trabajo.

Sostenemos que el correcto tratamiento del primer modelo cuántico del átomo; el modelo de Bohr, es fundamental como puente conceptual para explicarles nuestros preparatorios de forma conveniente, temas como las configuraciones electrónicas de los elementos, y la periodicidad química usando el modelo de capas. Estamos convencidos también que presentar a través de un discurso analógico los aspectos esenciales del modelo atómico vigente es pedagógicamente deseable porque permite resaltar la importancia que tiene el concepto de orbital atómico en la caracterización química de los sistemas atómico-moleculares en la actualidad. Posibilita además explicar su comportamiento como la interacción de electrones y núcleos, aproximando a los estudiantes a una mejor comprensión de los procesos químicos. Otra ventaja del uso adecuado del concepto de orbital es su representación gráfica, que a su vez favorece la modelación de estructuras moleculares a través de geometrías relativamente sencillas como tetraedros, pirámides y octaedros.

Adequar contenidos científicos, es decir, hacer que temas de alta complejidad disciplinar sean accesibles a la ciudadanía no es una labor fácil de emprender, requiere de una sólida formación disciplinar y sobre todo gran experiencia docente. Es por ello, que el área de divulgación científica generalmente está conformada por los mejores científicos de una institución académica. Razón por la cual, se hace imprescindible, agradecer a la Dra. María del Pilar Rius de la Pola, por su valiosa contribución en la parte analítica no solo de este menester sino del trabajo en general.

Finalmente quisiera invitar a los profesores que consulten este trabajo y que emprenden la noble labor de la investigación educativa, a dotar a la docencia de este fascinante tema de un carácter más contemporáneo, crítico e innovador debido a que el contexto social, cultural y tecnológico en el que vivimos así lo demanda.

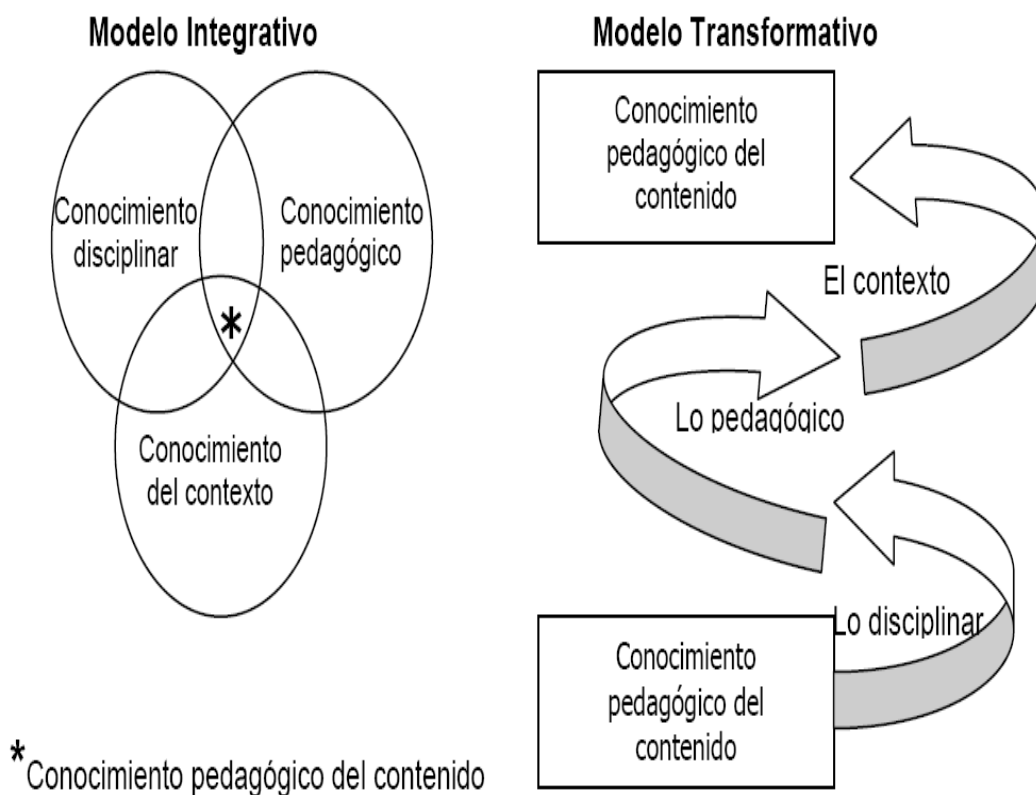
Apéndices

Apéndice 1

“Respuestas recabadas por profesores del bachillerato universitario en el instrumento CoRe”.

A continuación se presenta las repuestas del instrumento CoRe tal como fueron recabadas por los tres docentes entrevistados. La resolución de este instrumento se llevo a cabo durante el transcurso del semestre 2009-II, es decir, en el lapso de tiempo comprendido entre los meses de febrero a mayo del 2009, cuando se cursaba la práctica docente III del programa de estudios de MADEMS-Química. Se presentan también comentarios adicionales sobre el CoRe hechos por los profesores.

*El CPC como modelo del conocimiento docente.*¹



¹ Francis, S., "El conocimiento pedagógico del contenido como categoría de estudio de la formación docente", Actualidades investigativas en educación, vol. 5 (2), Universidad de Costa Rica, pp. 1-18, 2005. p. 9

CoRe No.1

| "EJES TEMÁTICOS" | Ideas y contenidos sobre el concepto: "Materia", antes de Dalton | El Átomo de Dalton | Modelo cinético molecular | Espectro Electromagnético y Modelo atómico de Bohr | Modelo atómico Schrödinger (contemporáneo) y orbitales atómicos |
|--|---|---|---|--|--|
| De la manera más atenta, se le solicita que conteste a detalle el siguiente cuestionario. |  |  |  |  |  |
| 1.0 ¿Considera usted, que es importante abordar este tema en el contexto de la enseñanza de la química, en la ENP? ¿Por qué? | Por su puesto, ya que es el objeto de estudio de la química, y ésta es una ciencia con un fundamento teórico y categorías bien definidas. La química como otras ciencias se han construido en contextos sociales bien determinados, la ciencia no está terminada. De ahí la importancia de la historia de la ciencia. | Indudablemente, ya que el tema permite mostrar que la química esta en desarrollo teórico, pero además como se construyen los paradigmas a través de las rupturas epistemológicas, el tema es clave en la enseñanza de la química, ya que dio pauta a la construcción de las categorías de elemento y compuesto químico. | El MCM, permite explicar los estados de agregación y los cambios de estado, a partir del concepto de molécula. Temas esenciales en los cursos de química general. | Tanto el espectro electromagnético como la teoría de Planck son el antecedente al modelo de Bohr. Temas fundamentales en el desarrollo de la construcción teórico del modelo actual del átomo. | A pesar de la complejidad del tema, considero que los alumnos de bachillerato deben conocer el modelo actual que explica la estructura del átomo, en especial los de sexto área II., es como si no se quisiera hablar de la teoría de la evolución en Biología, se debe explicar su interpretación física y su importancia para los temas de enlace y tabla periódica. |
| 2.0 ¿Cuáles son los conocimientos que considera esenciales en la enseñanza de estos temas? | Concepto de ciencia, y teorías científicas. Así como, el de categoría, paradigma, revolución científica, que es análisis y síntesis, una ruptura epistemológica. | Átomo, postulados de la Teoría de Dalton, | Átomo, molécula, estados de agregación, cambios de estado, energía, | Espectro electromagnético, teoría de Max Planck, efecto fotoeléctrico, la luz, fotones, cuanto, espectros a través de Modelo de Bohr. | Modelo atómico Schrödinger, orbital, subnivel atómico, |
| 3.0. ¿Considera usted que la historia y la filosofía de la química son herramientas útiles, en la enseñanza y aprendizaje de estos contenidos? Y ¿Por qué? | En bachillerato se debe hablar de la historia de la ciencia, filosofía es otra herramienta, quizá en este nivel no la considero oportuna. | Indudablemente, ya que la historia de la química ofrece planteamientos que permiten explicar la construcción del conocimiento y en qué momento hay una ruptura epistemológica. | A través del conocimiento de la historia podemos comprender su estado actual. | Pero, también, el desarrollo científico de las comunidades científicas de los químicos que han construido la teoría atómica, y esto da pauta, al porque de en algunas países hay tradición científica y tienen la vanguardia en el desarrollo tecnológico. | Asimismo, explicar el desarrollo histórico permite explicar los países hegemónicos de la química, tal es el caso de Inglaterra, Francia, Alemania y los Estados Unidos, sólo basta ver la nacionalidad de los científicos que descubrieron los elementos. ** |
| 4.0 Si su respuesta a la anterior pregunta fue afirmativa ¿Cómo hace uso de la historia o filosofía de la química? | Los estudiantes realizan lecturas cortas, extractos del libro de <i>La Teoría atómica moderna</i> de Mieli. A pesar de ser un libro muy especializado o el Brock. | También otro recurso metodológico es el ensayo biográfico, de los clásicos, Dalton, Avogadro, Becquerel etc. | Tanto la lectura como el ensayo biográfico que en este caso pueden ser extraídos de varios libros, deben de ir acompañado de preguntas que guíen las lecturas. | Tanto la lectura como el ensayo biográfico que en este caso pueden ser extraídos de varios libros, deben de ir acompañado de preguntas que guíen las lecturas. | Tanto la lectura como el ensayo biográfico que en este caso pueden ser extraídos de varios libros, deben de ir acompañado de preguntas que guíen las lecturas. |
| 5.0 ¿Qué ideas previas ha identificado en los estudiantes al desarrollar esta temática? (Ver a pie de página*) | La energía. De su cultura general, es muy rescatable la etapa de la Ilustración, la Revolución francesa, La Revolución Industria | En algunos cursos he solicitado que dibujen un átomo; para ellos el átomo lo dibujan como una esfera rígida. | Carga eléctrica. | Reflexión de la luz | Elemento, compuesto. *En general, como influye en el aprendizaje, sin duda a mayor cantidad de conceptos previos el alumno mejora su aprendizaje. |
| 6.0 ¿Cuáles son las dificultades y limitaciones que ha identificado en el aprendizaje de los | Quizá en estos temas no haya tanta dificultad. Entre las dificultades: es la falta de hábitos de lectura | Quizá en estos temas no haya tanta dificultad. | Quizá en estos temas no haya tanta dificultad. | Pero, al llegar al tema de la Teoría de Planck, el grado de complejidad y de abstracción es mayor | No se diga de Schrödinger, la situación es aún más compleja. |

| | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|
| alumnos sobre estos contenidos? | y metodología para analizar las lecturas. | | | | |
| 7.0 ¿Cuáles son las dificultades y limitaciones que ha identificado en el proceso de enseñar estos temas? | Entre las dificultades: es la falta de hábitos de lectura y metodología para analizar las lecturas. Por parte de los maestros, están formados en sistemas educativos en que la historia de la ciencia no está incluida en el currículo. La mayoría de ellos dicen, nosotros somos muy "concretos" | Una de las limitaciones es la poca literatura en torno a la historia de la química y las que hay no se pueden implementar de manera directa en las estrategias de aprendizaje del profesor. | Falta de equipo, como lo es el tubo de rayos catódicos en buen estado y sus accesorios, los tubos de descarga, y espectroscopios. | Una limitación es la falta de conocimientos de física o ingeniería, para explicar los principios con más detalle de los equipos antes citados. | Una limitación es la complejidad del tema aunado a la falta de materiales didácticos como DVD, simuladores., etc. |
| 8.0 ¿Dimensiona estos contenidos con el actual entorno social o tecnológico? Y si es así, ¿Cómo lo hace? | Ejemplos de tipo de materia desde la más cotidiana hasta los materiales más complejos en nuestra sociedad. | Mostrar a los elementos en su estado natural | Cambios de estado | La televisión, como aplicación de los rayos catódicos. Aplicación de los rayos X en Medicina o la celda fotoeléctrica. | Cómo funciona una cinta grabadora. Colores y colorantes. Considero que no logramos explicar estas aplicaciones. |
| 9.0 ¿cómo evalúa estos contenidos? | Reportes de lecturas, resumen de lecturas, glosarios, comentarios orales. | Pregunta cerrada o de opción múltiple, | Pregunta cerrada o de opción múltiple. | Pregunta cerrada o de opción múltiple, La práctica sobre la coloración de la llama de las sales. | Pregunta cerrada o de opción múltiple, |

COMENTARIOS GENERALES

Quizá en tu cuadro falta ponderar en qué momento la comunidad científica acepta como categoría epistemológica: sustancia pura, átomo y molécula y ubicar bien el contexto histórico, una cuestión es Siglo XVII y XVIII, y otra cuestión es siglo XIX; además no hay nada de leyes de los gases, no puedes hacer planteamientos, sin contextos epistemológicos.

COMENTARIO 2.


En el apartado ideas y contenidos sobre el concepto: "Materia", antes de Dalton, que tan conveniente sería cuestionar el concepto de energía, al igual que el de materia, como ustedes lo indican.

Al igual, ¿Qué ideas previas ha identificado en los estudiantes al desarrollar esta temática? En algún momento apliqué cuestionarios a manera de examen diagnóstico?, Ustedes los han realizado en los grupos de su práctica docente, creo que ayudaría a responder este apartado y a fundamentar.

** En los programas de química del bachillerato nacional no está incluido la enseñanza de la historia de la química, no consideran a la historia de la ciencia como una herramienta didáctica en la disciplina. Por otra parte, en los cursos de licenciatura es muy difícil encontrar a los docentes entrecruzar los contenidos de su disciplina con el desarrollo histórico (son contados, pero los hay).

Una de mis reflexiones en su cuestionamiento que hacen es ¿Cuál es el estado actual de estos temas en los nuevos programas de estudio que están en reestructuración? También, su propuesta es muy ambiciosa para bachillerato, que tanto lo abordan, y ¿cómo lo abordan? en los cursos en la FQ.

CoRe No.2

| "EJES TEMATICOS" | Ideas y contenidos sobre el concepto: "Materia", antes de Dalton | El Átomo de Dalton | Modelo cinético molecular | Espectro Electromagnético y Modelo atómico de Bohr | Modelo atómico Schrödinger (contemporáneo) y orbitales atómicos |
|--|--|--|---|--|--|
| De la manera más atenta, se le solicita que conteste a detalle el siguiente cuestionario. |  |  |  |  |  |
| 1.0 ¿Considera usted, que es importante abordar este tema en el contexto de la enseñanza de la química, en la ENP? ¿Por qué? | Considero que es importante ya que se muestran las etapas históricas de la química previas a los modelos atómicos. Con lo que los alumnos identifican a la Química como una actividad en constante evolución. | Si considero que es importante abordar este tema ya que les permitirá a los alumnos valorar el uso de modelos en Química para explicar el comportamiento y transformaciones de la materia. | Si considero pertinente la impartición de este tema ya que los alumnos pueden utilizar el modelo cinético molecular para representar los estados de agregación de la materia y sus cambios. También permite identificar la naturaleza corpuscular de los gases, aplicándolo también a sólidos y líquidos | Este tema si creo que sea pertinente integrarlo, aunque desde una visión superficial en cuanto la evolución de los modelos atómicos analizando las ventajas y desventajas de los modelos de Thomson, Rutherford y Bohr, para explicar la estructura interna del átomo. | No creo que sea conveniente abordar este tema, ya que requiere de conocimientos matemáticos para poder interpretar las ecuaciones y las figuras tridimensionales de orbitales. |
| 2.0 ¿Cuáles son los conocimientos que considera esenciales en la enseñanza de estos temas? | Teoría atomista de Demócrito y Leucipo. Ley de las proporciones definidas Ley de la conservación de la materia. El análisis químico como herramienta para la identificación y obtención de compuestos y elementos. La síntesis química para la formación de compuestos. | Analizar que son los modelos en ciencias. Teoría atómica de Dalton. Destacar la importancia y alcance del modelo de Dalton. A partir de su hipótesis atómica, Dalton explica la constitución de las sustancias simples y compuestas, así como el significado de reacción química y las leyes ponderales. | Definición y clasificación de la materia. Cambios químicos. Teoría cinética molecular. Estados de agregación de la materia. | Contexto histórico de la teoría atómica Importancia y alcances del : Modelo de Thomson. Modelo de Rutherford Espectros continuos y discontinuos | |
| 3.0. ¿Considera usted que la historia y la filosofía de la química son herramientas útiles, en la enseñanza y aprendizaje de estos contenidos? Y ¿Por qué? | Sí, por que permiten la reflexión sobre la naturaleza de los modelos y procesos que caracterizan a la disciplina en un contexto histórico, social y cultural. | Es una herramienta útil que permite una exposición elemental de ideas y métodos de la química | El establecimiento de teorías atómicas desde Dalton hasta el modelo atómico de Bohr en la química, corresponden a acontecimientos que no se pueden reconstruir, como episodios aislados en donde un grupo de evidencias, o un conjunto de cánones de evaluación, son los responsables de que los científicos involucrados abandonen la vieja teoría en favor de la nueva. | En este periodo de transición se hace evidente la rivalidad y la competencia entre enfoques teóricos alternativos, el abandono de unos y la adopción de otros; son hechos en donde la aceptación de una nueva teoría científica debe exigir el rechazo de un paradigma más antiguo, siendo evidente que existen razones de fondo por las cuales el desarrollo científico resulta discontinuo y no acumulativo. Mostrando así que las teorías científicas tienen alcances y limitaciones y siempre están evolucionando. | |
| 4.0 Si su respuesta a la anterior pregunta fue afirmativa ¿Cómo hace uso de la historia o filosofía de la química? | Analizando las teorías atomistas de la antigua Grecia. Analizando la importancia de la alquimia a la Química, sobre todo la concepción que se tenía de las sustancias. Contrastando los trabajos de Lavoisier y Berceius | Contrastando el modelo atómico de Dalton con los modelos atomistas griegos. Destacando la importancia, los alcances y las limitaciones de la teoría atómica de Dalton. Identificando los modelos (representaciones) de los átomos y compuestos propuestos por Dalton (lenguaje). | Valoran los alcances y limitaciones del uso de modelos en la explicación de los cambios de la materia. Utilizan el modelo cinético Molecular para representar los estados de agregación de la materia y sus cambios. | Analizando las ventajas y desventajas de los modelos de Thomson, Rutherford y Bohr, para explicar la estructura interna del átomo. | |
| 5.0 ¿Qué ideas previas ha identificado en los estudiantes al desarrollar esta temática? | Los alumnos piensan que la materia es continua Identifica a esta idea como una de las más arraigadas en | No utilizan las ideas corpusculares en toda su extensión, pues sólo ofrecen respuestas de | Los alumnos creen que el espacio entre las partículas está ocupado Esta idea surge por la falta | A los alumnos se les dificulta visualizar la dimensión de los espacios vacíos en el interior del | |

| | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| | los estudiantes, haciendo al modelo continuo de la materia tan poderoso que a pesar de la enseñanza formal la mayoría de los estudiantes sólo utilizan un modelo corpuscular primitivo, que conserva aspectos del punto de vista ingenuo. Al respecto los estudiantes piensan que: | bajo nivel microscópico. El espacio entre las partículas no existe o está lleno, o que las partículas se expanden cuando se calientan. | de evidencias sensoriales referentes al vacío, por lo que la evidencia visual puede ayudar a cambiar las ideas de los estudiantes porque sólo entonces se dan cuenta de lo inadecuado de su punto de vista ingenuo. Las partículas de gas están distribuidas uniformemente, lo explican sugiriendo que existen fuerzas de repulsión entre ellas, esto a su vez, implican que son estáticas. | átomo. | |
| 6.0 ¿Cuáles son las dificultades y limitaciones que ha identificado en el aprendizaje de los alumnos sobre estos contenidos? | Los estudiantes no tienen una noción histórica sobre fechas, contexto social y cultural. | Los alumnos no ven los alcances y limitaciones de esta teoría sino la recitan de forma textual. | El idioma de la química causa confusión. Los estudiantes se encuentran con muchos términos diferentes en la química. | Los alumnos piensan que los modelos atómicos son ideas acabadas. Por lo que piensan que así son los átomos en la realidad. | |
| 7.0 ¿Cuáles son las dificultades y limitaciones que ha identificado en el proceso de enseñar estos temas? | Una dificultad es proporcionar a los estudiantes una idea del tamaño de las partículas. Considero útil mostrar su tamaño microscópico mediante diferentes imágenes, del microscopio, de objetos pequeños que | El nivel de abstracción de los alumnos se dificulta, ya que la idea del átomo tardó casi 2000 años antes de ser aceptada y en este sentido no se debe presionar a los estudiantes para que la asimilen de manera | Con frecuencia la teoría de las partículas se enseña de forma aislada. Esto no ayuda a los estudiantes a apreciar el comportamiento de las partículas en otras situaciones. | Se dificulta la relación entre los espectros electromagnéticos y el modelo atómico de Bohr. | |
| | normalmente no podemos ver a simple vista, por ejemplo, los detalles de insectos, bacterias, virus. | rápida. | Por lo que es útil la terminología de las partículas al hablar sobre reacciones químicas o cambios de estado | | |
| 8.0 ¿Dimensiona estos contenidos con el actual entorno social o tecnológico? Y si es así, ¿Cómo lo hace? | He recurrido a la elaboración de líneas del tiempo, que se relacionen con acontecimientos relevantes de otras disciplinas (referencias contextuales). | Lecturas dirigidas sobre el tema, en donde se muestre el contexto histórico. | Elaboración de modelos bidimensionales o tridimensionales sobre los estados de agregación de la materia contrastándolos con los modelos científicamente aceptados. | Uso videos y lecturas sobre el tema, en donde se muestre las aplicaciones tecnológicas actuales. | |
| 9.0 ¿Cómo evalúa estos contenidos? | Exposición de líneas el tiempo. Reflexión y comentario grupal. | Lectura y síntesis de la misma. Cuestionario | Exposición de los modelos realizados. | Ejercicios. Tabla comparativa entre modelos. Resaltando sus alcances y limitaciones. | |

CoRe No. 3

| "EJES TEMATICOS" | ideas y contenidos sobre el concepto: "Materia", antes de Dalton | El Átomo de Dalton | Modelo cinético molecular | Espectro Electromagnético y Modelo atómico de Bohr | Modelo atómico Schrödinger (contemporáneo) y orbitales atómicos |
|--|---|---|--|--|---|
| De la manera más atenta, se le solicita que conteste a detalle el siguiente cuestionario. |  |  |  |  |  |
| 1.0 ¿Considera usted, que es importante abordar este tema en el contexto de la enseñanza de la química, en la E.NP? ¿Por qué? | Si, el avance de los modelos del átomo nos muestra el avance de la ciencia, por ejemplo en un principio se restringe al uso del pensamiento y la imaginación. Al avanzar la tecnología permite buscar evidencias que sustentan otros modelos. | Si, permite que el alumno conozca el primer modelo de átomo y hacer reflexiones conforme se avanza en la clase sobre los postulados de esta teoría y cuáles aún son vigentes y explicar porque algunos postulados han sido superados. | Si, este tema permite explicar fenómenos cotidianos como el aroma de un perfume o saber que se está cerca de una panadería. | Espectro electromagnético no lo considero fundamental; sin embargo el átomo de Bohr sí ya que es la base del modelo cuántico actual. Pero se hace referencia sólo como eso, sin profundizar demasiado. | En esta asignatura (Química III) no es abordado más que como una muy ligera explicación, mencionando que se trata de el modelo actual únicamente. |
| 2.0 ¿Cuáles son los conocimientos básicos que considera necesarios en la enseñanza de estos temas? | No muchos, únicamente un recorrido por los filósofos griegos y por supuesto Demócrito. | Ninguno | Conceptos de átomo, molécula, elemento monoatómicos y moleculares. Básicamente las propiedades más importantes de los gases. | Partículas subatómicas, Conocimiento sobre: ondas (longitud de onda, frecuencia, etc.) Diferente tipo de radiaciones. Espectro de absorción y emisión. Radiactividad, descubrimiento del electrón, protón y neutrón, como antecedente histórico. | Configuración electrónica. |
| 3.0. ¿Considera usted que la historia y la filosofía de la química son herramientas útiles, en la enseñanza y aprendizaje de estos contenidos? Y ¿Por qué? | Si, ya que son filósofos los que explicaron primero la posible conformación de la materia (Demócrito, por ejemplo). Se pone de manifiesto la gran capacidad de razonamiento del ser humano. | Si, sin el apoyo de la historia no se entendería el planteamiento de este modelo. | No, tal vez porque no he buscado información acerca de cómo se fueron elaborando dichos postulados. | Si, se comprende mejor si se hace un recorrido histórico (reactividad, tubo de rayos catódicos, descubrimiento del electrón, etc) y los modelos atómicos que le antecedieron. | No, en cuanto que este tema no lo platicamos mucho en clase, se queda en un nivel de comentario. |
| 4.0 Si su respuesta a la anterior pregunta fue afirmativa ¿Cómo hace uso de la historia o filosofía de la química? | Uso real, no. Sólo se comenta con los alumnos de la importancia de la reflexión en la ciencia. Se lleva a cabo un breve recorrido por los filósofos griegos y Demócrito. | Se habla con los alumnos del tiempo transcurrido entre el modelo de los filósofos y el Dalton, y de qué manera pudo llegar a sus planteamientos. | | Se va avanzando en la clase conforme las fechas de descubrimientos importantes y su repercusión en la formación de nuevos modelos atómicos. | |
| 5.0 ¿Qué ideas previas ha identificado en los estudiantes al desarrollar esta temática y cómo influyen en el proceso de enseñanza-aprendizaje? | Realmente no me he percatado de las ideas previas. | Realmente no me he percatado de las ideas previas. | Que los gases no son considerados como materia. | Mezcla del modelo de Bohr con configuración electrónica. Consideran a s, p, d y f como los orbitales del modelo de Bohr. | Realmente no me he percatado de las ideas previas |
| 6.0 ¿Cuáles son las dificultades y limitaciones que ha identificado en el aprendizaje de los alumnos sobre estos contenidos? | En este tema no existen grandes dificultades. | Ninguno | Los postulados son "raros" para el alumno, los aceptan sin entender, la introducción del tema es muy teórico | Son bastante teóricos y en ocasiones el alumno no cuenta con la capacidad de abstracción necesaria. | Son bastante teóricos y en ocasiones el alumno no cuenta con la capacidad de abstracción necesaria. |
| 7.0 ¿Cuáles son las dificultades y limitaciones que ha identificado en el proceso de enseñar estos temas? | Uno de los problemas es caer en el exceso de información, riesgo de dar fechas y nombres sin significado. El problema de la enseñanza de estos temas es que sea de una manera enciclopédica. | Uno de los problemas es caer en el exceso de información, riesgo de dar fechas y nombres sin significado. El problema de la enseñanza de estos temas es que sea de una manera enciclopédica. | Las analogías, que si bien son útiles, sino se realizan con cuidado, crean ideas equivocadas. Por ejemplo los alumnos pueden quedarse con la idea de que los átomos tienen color o bien, que todas las partículas son esferas, etc. | El alumno al carecer de la capacidad de abstracción necesaria, es necesario brindarle apoyos como representaciones y analogías, lo cual en ocasiones es complicado ya que no se desea generar en el alumno ideas equivocadas. | Requiere un grado alto de abstracción. |
| 8.0 ¿Dimensiona estos contenidos con el actual entorno social o tecnológico? Y si es así, ¿Cómo lo hace? | No. A lo más se hace referencia a la importancia de la reflexión y pensamiento ante la carencia de experimentación sistemática. | Se le pide a los estudiantes, conforme se avanza en los temas que cuestionen los postulados de Dalton. | Si, en cuanto a la contaminación. Por ejemplo, cuando el alumno sabe que los olores son materia, se cae en la cuenta de que todo lo que percibes por la nariz es materia, ya sea agradable, como un perfume o desagradable como materia fecal. | Se busca que el alumno este en posibilidad de explicar fenómenos que se dan en la cotidianidad. Por ejemplo la explicación de las luces de los juegos pirotécnicos. | No |
| 9.0 ¿cómo evalúa estos contenidos? | No se evalúan | Se evalúan pidiendo a los alumnos que expliquen la pertinencia de los postulados a partir de conocimientos adquiridos como isótopos, etc. | Pidiendo explicación sobre algún fenómeno cotidiano con base en la teoría cinético molecular. | Con explicación de fenómenos como el mencionado en el inciso anterior. | Con la escritura y entendimiento de las configuraciones electrónicas. |

Apéndice 2

“Concepciones Alternativas de los estudiantes sobre la estructura de la materia”.²

a) Introducción: El término de “concepciones alternativas”.

En la actualidad es claro que en el proceso de enseñanza de las ciencias, es necesario que el profesor cuente con información de lo que el alumno sabe al llegar al aula; así, la literatura sobre la didáctica de las ciencias tiene muy diversos estudios acerca de la comprensión de los estudiantes sobre los fenómenos naturales. Estos estudios han encontrado que inclusive antes de tener alguna enseñanza, los estudiantes cuentan con sus propios puntos de vista y explicaciones, así como un lenguaje propio; siendo todos ellos usualmente diferentes a los generados por los científicos. Osborne y Bell (1983), hacen una distinción entre lo que llaman la *ciencia de los estudiantes* y la *ciencia de los científicos*; con la primera se refieren a los puntos de vista acerca del mundo y los significados de las palabras que los estudiantes tienden a adquirir antes de que reciban alguna enseñanza de las ciencias de manera formal; con la segunda se refieren al punto de vista científico generalmente aceptado.

Los estudiantes, como los científicos, usan similitudes y diferencias para organizar hechos y fenómenos y, en la observación de éstos, buscan elementos y relaciones entre ellos para construir estructuras. Además, los estudiantes, como los científicos, reúnen hechos y construyen modelos para explicar hechos conocidos y hacer predicciones. Sin embargo, hay por lo menos tres aspectos en los cuales la *ciencia de los estudiantes* difiere de la *ciencia de los científicos*: 1) los estudiantes más pequeños tienen dificultad con las formas de razonamiento abstracto que los científicos llevan a cabo; 2) los estudiantes sólo se interesan en explicaciones particulares para hechos específicos, y, 3) el lenguaje diario de nuestra sociedad lleva frecuentemente a los estudiantes a tener un punto de vista distinto al de los científicos. Por otro lado, también se piensa que los estudiantes traen a las clases de ciencia no sólo sus puntos de vista acerca del mundo y sus significados de las palabras, sino también sus propios métodos de investigación, sus propias ideas acerca de lo que constituyen explicaciones adecuadas, y su propia perspectiva sobre la ciencia. Todo esto influye profundamente sobre el aprendizaje, incluyendo la motivación para encontrar cómo y por qué las cosas se comportan como lo hacen (Osborne y Bell, 1983; Treagust, Duit y Nieswandt, 2000).

Algunos estudios sugieren que los puntos de vista que los estudiantes traen consigo a las lecciones de ciencia son, para ellos, lógicos y coherentes, y que estos puntos de vista tienen una influencia considerable sobre cómo y qué aprenden los estudiantes de sus experiencias en el salón de clases. Según esto, la gente tiende a construir significados que son consistentes con el aprendizaje previo. El aprendizaje puede ser esperado y entendido en términos de lo que los estudiantes traen a la situación de aprendizaje, más cómo construyen el aprendizaje al relacionar ellos los estímulos de la clase con sus experiencias previas. Dicen Ausubel, Novak y Hanesian (1983), la manera de mejorar el aprendizaje es „averiguar lo que el aprendiz ya sabe y enseñarle de acuerdo con ello“.

² Velasco, R. y Garritz, A., “Revisión de las concepciones alternativas de los estudiantes de secundaria sobre la estructura de la materia”, *Educación Química*, vol. 14 (2), pp. 93-105, 2003

Por lo tanto, la enseñanza de las ciencias debe considerar una reestructuración de las ideas previas del estudiante, más que una simple adición de información al conocimiento existente. En consecuencia, es importante tener la información sobre las ideas que el estudiante trae al salón de clases en la enseñanza de las ciencias, las ideas previas que ellos manejan derivadas de sus experiencias anteriores. En la literatura existen varios trabajos de revisión al respecto (Wandersee, Mintzes y Novak, 1994; Furió, 1996). A este conocimiento con que el alumno interpreta y explica los hechos y fenómenos naturales, se le ha asignado una gran variedad de términos, tales como: nociones, ideas previas, concepciones o creencias de los alumnos, conceptos erróneos, fallos de comprensión, errores conceptuales, preconcepciones, ciencia de los niños, creencias ingenuas, ideas erróneas, teorías culturales, modelos personales de la realidad, etcétera. (Fensham, 1983; Jiménez, Solano y Marín, 1994; Wandersee, Mintzes y Novak, 1994). Cada uno de estos términos implica una toma de postura desde un punto de vista teórico respecto a la construcción del conocimiento; así, pueden ubicarse dos enfoques diferentes: uno, centrado en el conocimiento científico que toma como referencia los modelos científicamente aceptados; otro, centrado en el conocimiento de los sujetos, cuya atención se focaliza en la naturaleza de las concepciones de las personas. Sin embargo, actualmente existe coincidencia en que ambos enfoques tienen características que se superponen y la división no es tan drástica, de tal manera que las distintas denominaciones han sido empleadas como sinónimas (Rodríguez, 1999).

De acuerdo a esto, cada vez un mayor número de investigadores ha adoptado el término „concepciones alternativas“ para designar el conocimiento que el estudiante trae al aula, por considerar que no sólo se refiere a las explicaciones construidas por el estudiante basadas en la experiencia, para hacer inteligibles los fenómenos y objetos naturales, sino que también expresa respeto al estudiante, ya que implica que las concepciones alternativas son contextualmente válidas y racionales, y por otro lado tiene como fondo una visión interactiva y evolutiva del proceso de aprendizaje: ya que pueden llevar a concepciones más fructíferas por ejemplo, las concepciones científicas (Wandersee, Mintzes y Novak, 1994; Furió, 1996). Además, el término *concepción* es uno de los más neutrales e indica cómo el sujeto construye una representación mental del mundo que le permite entender el entorno y actuar de forma apropiada, y el adjetivo *alternativa* establece una distinción con las concepciones científicas y, al mismo tiempo, concede a la concepción derecho propio, entidad en sí misma (Rodríguez, 1999). Por estas razones, en este trabajo se adopta este término.

En las investigaciones realizadas por lo menos en las últimas dos décadas, las concepciones alternativas tienen toda una serie de características especiales (Wandersee, Mintzes y Novak, 1994): Los estudiantes acuden a la enseñanza de las ciencias con un conjunto diverso de concepciones alternativas respecto a los hechos y objetos naturales; éstas son permeables a la edad, la capacidad, el género y las fronteras culturales de los estudiantes; son resistentes al cambio mediante estrategias de enseñanza tradicionales; guardan semejanza con explicaciones de fenómenos naturales ofrecidas por generaciones previas de científicos y filósofos; tienen su origen en un conjunto diverso de experiencias personales, incluyendo la observación directa y la percepción, así como las explicaciones de los profesores y de los materiales instruccionales; los profesores a menudo tienen las mismas concepciones alternativas que los estudiantes; las concepciones alternativas de los

estudiantes interactúan con las presentadas durante la instrucción, dando como resultado muy diversos resultados de aprendizaje.

b) Las concepciones alternativas sobre la estructura de la materia.

En la literatura existe una gran cantidad de trabajos respecto a las concepciones alternativas que mantienen los estudiantes en el área de la química (Pozo, Gómez-Crespo, Limón y Sanz, 1991; Garnett y Hackling, 1995; Gómez Crespo, 1996; Pfund y Duit, 1998; Barker, 2000). Dentro de estos trabajos se encuentran los que tratan con la estructura de la materia (Novick y Nussbaum, 1978, 1981; Nussbaum y Novick, 1982; Nussbaum, 1985; Llorens, 1988; Andersson, 1990; Renström, Andersson y Marton, 1990; Haidar y Abraham, 1991; Gabel y Bunce, 1994; de Vos y Verdonk, 1996; Pozo, Gómez y Sanz, 1999; Benarroch, 2000 a y b, 2001; Gallegos, 2002), un tema muy estudiado ya que se encuentra en cualquier currículo del nivel medio, así como por su importancia para la comprensión de otros temas de la química y su relevancia social (Andersson, 1990). En este apartado se citan de forma muy general algunas de las concepciones alternativas de los estudiantes de nivel medio sobre la estructura de la materia.

Todos los estudios al respecto coinciden en señalar que los estudiantes mantienen sus concepciones alternativas sobre la estructura de la materia, aún después de realizar estudios formales de química; esto es, mantienen sus representaciones macroscópicas, basadas en la apariencia directa de la realidad que conciben la materia como continua, estática y sin espacios vacíos entre sus partes; este pensamiento de la vida diaria es dirigido hacia lo concreto y observable. Los alumnos no alcanzan a dar explicaciones a los fenómenos naturales. Suceden así „porque sí“. Ante la observación de que el aire es compresible y el agua líquida no, algunos estudiantes dirán: „Es así. El aire se puede apretar y el agua no“.

Cuando los alumnos trascienden esta etapa de pensamiento continuo de la materia, penetran en otra en la que piensan que la materia está constituida por partículas, no precisamente iguales a los átomos y las moléculas de las ideas científicas, sino las cuales muchas veces mantienen algunas características de la materia en su conjunto. Es decir, si la materia es de color ocre, esto sucede porque sus partículas son ocre también (Albanese y Vicentini, 1997); si la materia se expande al pasar al estado gaseoso, ello ocurre porque las partículas se expanden igualmente; si un metal es maleable, ello sucede porque los átomos que lo constituyen también lo son (Ben-Zvi, Eylon y Silberstein; 1986). Como vemos éste es un modelo de constitución de la materia que no tiene que ver con la concepción científica al respecto y, sin embargo, es una concepción alternativa muy arraigada entre los estudiantes.

Existe en la literatura una gran cantidad de trabajos sobre esta temática. A los interesados sobre este temática se recomienda consultar a profundidad la referencia citada en este apartado³, ahí mismo encontrarán una extensa bibliografía al respecto.

³ Velasco, R. y Garritz, A., “Revisión de las concepciones alternativas de los estudiantes de secundaria sobre la estructura de la materia”, cit.

Apéndice 3

Reactivos para la evaluación del MCM.

El proceso de evaluación se considera, cada vez más como un aspecto esencial del aprendizaje y la enseñanza de las ciencias, pues entre otras finalidades sirve como punto de partida para una reflexión posterior que facilite la mejora continuada del profesor. Evaluar el conocimiento que un alumno tiene sobre algo implica, básicamente, observar cómo actúa en una situación dada y comparar la información obtenida con algún criterio previamente establecido para emitir un juicio sobre la adecuación o inadecuación del conocimiento manifestado en la información recogida⁴. Para tal fin consideramos adecuado presentar algunos reactivos que pudiesen ser usados en la práctica docente. Estos guardan relación con el MCM. Los reactivos fueron tomados del *banco de reactivos de opción múltiple y formativos, para la evaluación en química I del CCH*⁵, cuya coordinación está a cargo de la Maestra en educación Maritza López Recillas.

El banco de reactivos revisado contiene preguntas apropiadas y congruentes con los contenidos, temas, grado de dificultad y nivel cognitivo solicitado en el programa de estudio. Estos reactivos son, de selección y elaboración de respuesta; están diseñados para hacer pensar y reflexionar al alumno cada una de las posibles respuestas y así lograr que sean críticos y analíticos, sin descuidar el desarrollo de sus habilidades intelectuales. Un banco de reactivos, es además, la herramienta que el profesor puede utilizar en el momento de diseñar sus instrumentos de evaluación como son los exámenes o series de ejercicios⁶. El banco de reactivos consultado ha diseñado sus reactivos de tal forma que pueda medir el nivel cognitivo de los estudiantes en tres niveles.

- ✓ *Nivel 1, habilidades memorísticas.* En este nivel el alumno demuestra su capacidad para recordar hechos, conceptos, procedimientos, al evocar, repetir, identificar. Se incluye el subnivel de reconocer.
- ✓ *Nivel 2, habilidades de comprensión.* El alumno muestra capacidad para comprender los contenidos escolares, elaborar conceptos; caracterizar, expresar funciones, hacer deducciones, inferencias, generalizaciones, discriminaciones, predecir tendencias, explicar, transferir a otras situaciones parecidas, traducir en lenguajes simbólicos y en el lenguaje usado por los alumnos cotidianamente; elaborar y organizar conceptos. Hacer cálculos que no lleguen a ser mecanizaciones pero que tampoco impliquen un problema.
- ✓ *Nivel 3, habilidades de indagación y pensamiento crítico.* El alumno muestra su capacidad para analizar datos, resultados, gráficas, patrones, elabora planes de trabajo para probar hipótesis, elabora conclusiones, propone mejoras, analiza y organiza resultados, distingue hipótesis de teorías, conclusiones de resultados, resuelve problemas, analiza críticamente⁷.

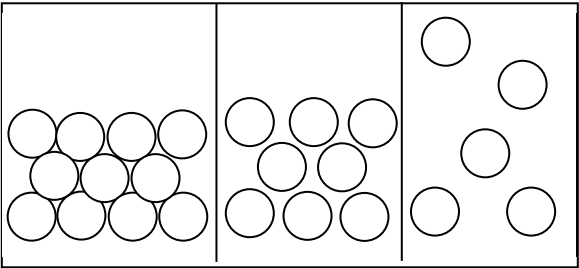




⁴ Pérez de Landazabal., M., *Evaluación y detección de dificultades en la enseñanza de la física y química en el segundo ciclo de la ESO*, CIDE del Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid, 1998. p. 3

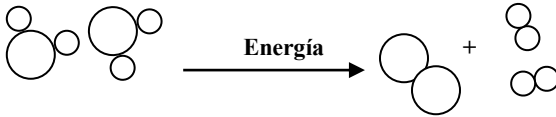
⁵ López, M., *Seminario para la evaluación de los aprendizajes en ciencias, CCH-UNAM, Septiembre, 2007*

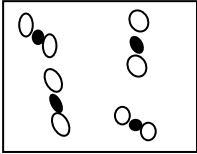
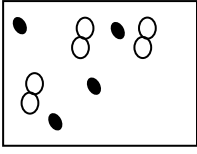
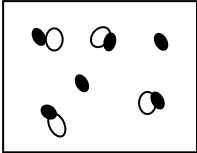
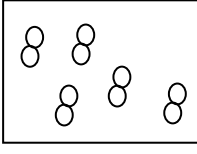
⁶ Óp.Cit p.2

⁷ Ibid. p. 6

Reactivos de evaluación validados para el MCM.

| I. REACTIVO | OPCIONES | NIVEL COGNITIVO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|------------------------|-----|---|---|---|---|----|-----|---|-----|----|---|---|---|-----|-----|---|-----|---|----|---|
| No se pueden separar por procesos químicos. | A) Elementos * B) Compuestos C) Mezcla homogénea D) Mezcla heterogénea | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| El estado de la materia depende de la: | A) Temperatura y presión * B) Temperatura y calor C) Presión y densidad D) Calor y olor | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>De los siguientes modelos de estados de agregación identifica cuál representa el sólido, líquido y gas</p>  <p style="text-align: center;">I III II</p> | <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td></td> <td>S</td> <td>L</td> <td>G</td> </tr> <tr> <td>a</td> <td>I</td> <td>II</td> <td>III</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>III</td> <td>II</td> <td>I</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>I</td> <td>III</td> <td>II*</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>III</td> <td>I</td> <td>II</td> </tr> </table> | | S | L | G | a | I | II | III | b | III | II | I | c | I | III | II* | d | III | I | II | 3 |
| | S | L | G | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| a | I | II | III | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| b | III | II | I | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| c | I | III | II* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| d | III | I | II | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Se dice que una sustancia se encuentra en estado sólido porque: | A) Es dura y rígida B) Su volumen se comprime fácilmente C) Toma la forma del recipiente D) Sus átomos o moléculas están muy próximas * | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Escoge los coeficientes, a, b y c que balancean correctamente la siguiente:</p> <p>$a \text{H}_2 + b \text{O}_2 \rightarrow c \text{H}_2\text{O}$ son respectivamente:</p> | A) $a = 2, b = 2, c = 1$ B) $a = 2, b = 1, c = 2$ * C) $a = 1, b = 2, c = 2$ D) $a = 1, b = 1, c = 2$ | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| El modelo que representa a la molécula del agua es: | <p>A) </p> <p>B) </p> <p>C) </p> <p>D) </p> | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------|----|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----|----|----|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|
| <p>¿Cuál es el símbolo que representa al hidrógeno y oxígeno?</p> | <p>A) H₂ y O₂ *</p> <p>B) He y N₂</p> <p>C) H y O</p> <p>D) N₂ y F₂</p> | <p>3</p> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>El siguiente diagrama representa la reacción de descomposición del agua mediante el paso de corriente eléctrica directa.</p>  <p>Elige el inciso que representa simbólicamente la reacción del diagrama anterior.</p> | <p>A) $2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$</p> <p>B) $2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{O}_2 + \text{H}_2$</p> <p>C) $\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2$</p> <p>D) $2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2$ *</p> | <p>3</p> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>¿Cuál de los siguientes esquemas contiene la representación simbólica de una mezcla?</p> | <p>A) <table border="1" data-bbox="979 846 1170 989"> <tr> <td>O</td> <td>CO</td> </tr> <tr> <td>O₃</td> <td>O₂</td> </tr> </table> *</p> <p>B) <table border="1" data-bbox="974 1008 1175 1167"> <tr> <td>CO₂</td> <td>CO₂</td> </tr> <tr> <td>CO₂</td> <td>CO₂</td> </tr> </table></p> <p>C) <table border="1" data-bbox="971 1178 1179 1346"> <tr> <td>CO</td> <td>CO</td> </tr> <tr> <td>CO</td> <td>CO</td> </tr> </table></p> <p>D) <table border="1" data-bbox="971 1360 1179 1495"> <tr> <td>O₃</td> <td>O₃</td> </tr> <tr> <td>O₃</td> <td>O₃</td> </tr> </table></p> | O | CO | O ₃ | O ₂ | CO ₂ | CO ₂ | CO ₂ | CO ₂ | CO | CO | CO | CO | O ₃ | O ₃ | O ₃ | O ₃ | <p>3</p> |
| O | CO | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| O ₃ | O ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CO ₂ | CO ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CO ₂ | CO ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CO | CO | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CO | CO | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| O ₃ | O ₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| O ₃ | O ₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>En la ecuación</p> $2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \longrightarrow 2 \text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g})$ <p>se cumple:</p> | <p>A) El H₂ y O₂ son los reactivos.</p> <p>B) El H₂O y O₂ son los productos</p> <p>C) El O₂ es uno de los reactivos y el H₂O un producto</p> <p>D) El H₂O es un reactivo y el H₂ uno de los productos *</p> | <p>2</p> | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | |
|--|--|----------|
| <p>El aire que respiramos, está constituido principalmente por:</p> | <p>A) O₂, Ar B) N₂, O₂ * C) Br₂, Cl₂ D) N₂, F₂</p> | <p>2</p> |
| <p>¿Qué modelo representa al nitrógeno diatómico que contiene el aire?</p> | <p>A) </p> <p>B) </p> <p>C) </p> <p>D)  *</p> | <p>3</p> |

* Es la respuesta correcta

Apéndice 4

El uso de modelos en la enseñanza de la química

Los sistemas atómico-moleculares son un cuerpo de conocimientos que se estudia a través de modelos generalmente teóricos (matemáticos) enraizados en evidencias experimentales. El uso de modelos es uno de los pilares sobre el cual se edifica la ciencia, en el campo de la educación química, el uso de modelos enfatiza la representación audiovisual de imágenes y prototipos para representar diversos aspectos conceptuales o procedimentales de ciertos contenidos, específicamente en la enseñanza de los sistemas atómico-moleculares estas representaciones son muy diversas, van desde dibujos, diagramas, fotografías, simulaciones computacionales hasta complejas ecuaciones matemáticas. Por su relevancia educativa, en los siguientes párrafos se indagará de forma sintética sobre la definición de modelo, su uso y utilidad en la enseñanza.

Existe en la literatura una gran cantidad de definiciones sobre modelos, actualmente el punto de vista más aceptado sobre este menester, es que un modelo constituye una representación de una idea, objeto, acontecimiento, proceso o sistema creado con un objetivo específico, en el caso particular de la química, este objetivo específico es hacer o enseñar química. La palabra representación no se usa solo en aquellos casos en los que exista un tipo de exhibición de aspectos visuales de la entidad modelada, sino también como una representación parcial que al mismo tiempo *«abstrae de»*, y *«traduce de la forma»* la naturaleza de esa entidad⁸. En consecuencia, podríamos citar de forma alternativa que los modelos son representaciones mentales mediante las cuales los científicos razonan y se comunican.

El uso de modelos en la ciencia permite: simplificar fenómenos complejos, ayudar en la visualización de entidades abstractas, servir de apoyo en la interpretación de resultados experimentales y en la elaboración de explicaciones. Habría que añadir también que son elementos que poseen relevancia histórica y son de gran utilidad en la validación o contrastación de las teorías científicas⁹.

Bohr postula electrones que describen órbitas, por analogía con el sistema planetario. El modelo de la gota líquida para el núcleo atómico explica la fisión nuclear por analogía con la división de una gota líquida en dos gotas más pequeñas. El modelo nuclear de capas se desarrolló recurriendo a una analogía entre el núcleo atómico y las capas de electrones extranucleares. Esto concuerda con el punto anterior de que los modelos teóricos tienen por objeto proporcionar una representación útil de un sistema (...)¹⁰

⁸ Justi, R., "La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos", Enseñanza de las Ciencias, vol.24 (2), pp. 173-184, 2006, p. 175

⁹ Chamizo, J., "Los modelos de la Química", Educación Química, vol. 17 (4), pp.476-482, 2006.

¹⁰ Op.cit. p. 478

Es fundamental considerar que existen modelos para hacer ciencia y modelos para enseñar ciencia a estos últimos algunos autores les denominan modelos didáctico-analógicos¹¹. Es importante diferenciarlos debido que en muchas ocasiones los docentes caemos en el error de pretender traducir modelos científicos literalmente en el aula sin considerar el contexto escolar. Un modelo científico contiene la articulación de un gran número de hipótesis de alto nivel de abstracción y pertinente a un cierto campo problemático de la realidad, el alto grado de formalización de un modelo científico hace que éste a menudo fuera de las capacidades operatorias y la disponibilidad conceptual de los estudiantes. Mientras que los modelos didácticos son construcciones epistémicas, que implican, una visión selectiva y crítica de contenidos conceptuales situados en el contexto escolar. Los modelos didáctico-analógicos tienen como objetivo la integración del conocimiento disciplinar a través de un discurso lingüístico propio y original que facilite a los estudiantes el acceso a las formas más altas de la representación científica¹².

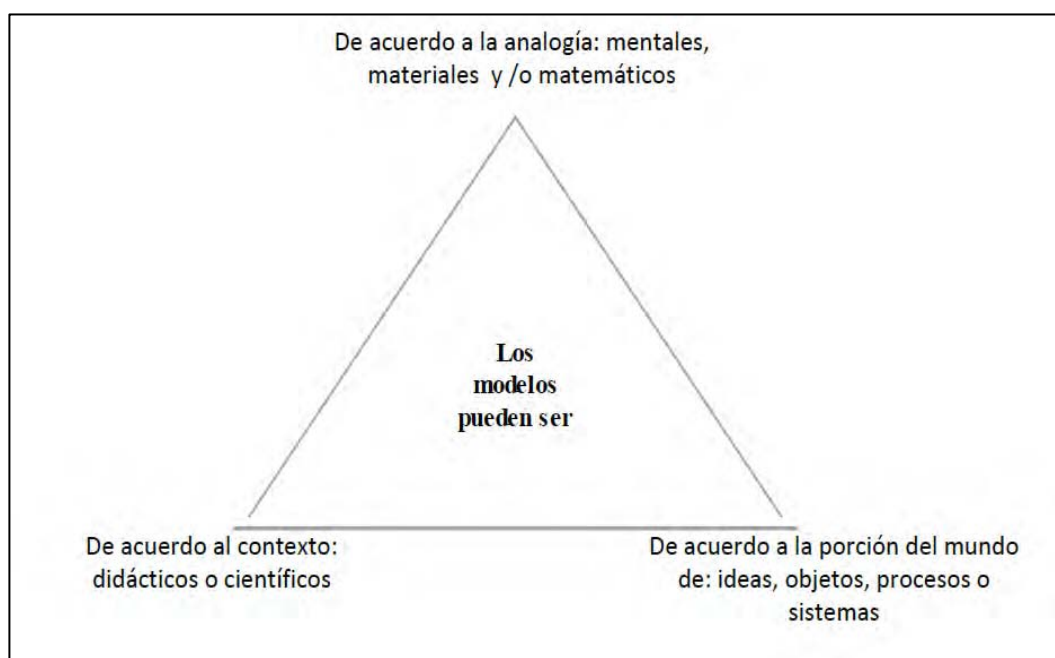


Figura1. Tipos de modelos¹³

La literatura en didáctica de las ciencias recomienda usar modelos en el aula basados en postulados pedagógicos que permitan dotar de dinamismo y relevancia su uso, convirtiéndose así, en una herramienta valiosa que favorezca la argumentación racional, la capacitación experimental, teórica, procedimental e interpretativa en los estudiantes. A continuación se cita una estrategia¹⁴ que consideramos puede ser de gran utilidad cuando referenciamos modelos en el proceso de enseñanza de la química.

¹¹ Galagovsky, L. y Andúriz, A., "Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico", *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 19 (2), pp. 231-242, 2001, p. 232

¹² Op.cit. p. 232

¹³ Chamizo, j., "Una tipología de los modelos para la enseñanza de las ciencias", *Eureka*, vol. 7(1), pp. 26-41, 2010.

¹⁴ Guevara M., y Valdez, R., "Los modelos en la enseñanza de la Química: algunas de las dificultades asociadas a su enseñanza y a su aprendizaje", *Educación Química*, vol. 15(3), pp.243-247, 2004.

- *Usar modelos didácticos analógicos (MDA)*¹⁵. El razonamiento analógico es la llave que permite el acceso a los procesos del aprendizaje, ya que todo nuevo conocimiento incluye una búsqueda de aspectos de similitud entre lo familiar y lo no familiar. La idea básica para construir un modelo didáctico analógico es dominar profundamente un tema que se requiere enseñar, abstraer sus conceptos nucleares y traducir aspectos importantes a una situación proveniente de la vida cotidiana o del sentido común.
- *Los aspectos centrales de las metáforas, analogías y características determinantes de los modelos importantes deben ser activamente discutidos con los estudiantes.* No puede esperarse que los estudiantes interpreten adecuadamente modelos que no han sido diseñados por ellos o con los cuales no han experimentado. Aun cuando ellos aseguren “saber” acerca de las analogías, las metáforas o los modelos deben revisarse su comprensión antes de volver a utilizarlos.
- *La naturaleza arbitraria de los modelos y su uso como herramientas del pensamiento deben hacerse explícitos.* Si bien la naturaleza contradictoria de algunos modelos puede ser entendida por el maestro o por los autores de libros, los modeladores inexpertos (como los estudiantes) pueden no compartir esta visión. Los maestros deben tener en cuenta las diferencias entre modeladores expertos (como ellos mismos) y los modeladores novatos (sus estudiantes).
- *La validez y conveniencia de los modelos debe resaltarse desde un inicio y durante todas las discusiones de aprendizaje.* La habilidad de modelar es una herramienta del pensamiento que no puede ser aprendida como un contenido, sólo se alcanza mediante la práctica y durante un periodo de tiempo prolongado.
- *Los maestros deben estar alertas de la evolución de las concepciones de los estudiantes respecto a las metáforas, analogías y modelos que se utilizan en las clases.* En este sentido, destacan tres líneas de acción que parecen ser especialmente útiles: la escritura de explicaciones cualitativas del significado del modelo; la resolución de problemas basados en modelos y permitir que los estudiantes elaboren, jueguen y exploren con diferentes modelos. Los maestros que son sensibles a la evolución de las concepciones de los estudiantes parecen entender mejor la “zona de desarrollo proximal” de sus estudiantes.

¹⁵ Galagovsky, L. y Andúriz, A., “Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico”, cit., p. 237

Apéndice 5

Respuestas obtenidas por los estudiantes en el experimento: “Análisis de la luz emitida por sales metálicas al ser sometidos al efecto de una llama”

A continuación se presenta algunos instrumentos resueltos que se utilizaron en el experimento que se usó como estrategia didáctica para abordar el modelo atómico de Bohr. Es importante tener en cuenta que la resolución del cuestionario se realizó por equipo, cada equipo estaba conformado por entre 4 y 7 estudiantes.



Figura 1. La actividad experimental es una herramienta imprescindible en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la química.



ANÁLISIS A LA LLAMA DE ALGUNOS ELEMENTOS METÁLICOS



Objetivo: Proveer de una explicación científica a la luz emitida por algunas sales metálicas al ser expuestas a la llama de un mechero.

Actividades:

1.0 ¿Que hace que los fuegos artificiales se vean tan bien, que hasta emocionan?

La pólvora que contienen mezclada con algunos metales y al estallar emiten la luz de diferentes colores.

2.0 ¿cuál es la explicación macroscópica del fenómeno estudiado, es decir, de la emisión de luz observada por los metales en disolución?

Los metales tienen diferente color al estar en contacto con el calor externo

3.0 ¿cuál es la explicación microscópica del fenómeno estudiado, es decir, de la emisión de luz observada por los metales en disolución?

Cuando los electrones cambian de una órbita pequeña a una más grande ocurre la absorción y cuando el electrón regresa a su órbita original escando se da el color esto ocurre cuando es expuesto al calor externo.

4.0 La explicación científica del fenómeno estudiado es una integración de la explicación macro y micro del fenómeno ¿cuál es la explicación científica al fenómeno observado?

Cada metal contiene un color diferente que es observado cuando se le aplica calor externo esto sucede por que los electrones se excitan al estar en contacto con el calor provocando que pasen de una órbita ;chica a una grande y viceversa a la velocidad de la luz.

5.0 Cambio tu concepción del fenómeno después de realizar la práctica, comparen la respuesta de la pregunta 4 con la pregunta 1 y denme su opinión en tres renglones.

Si un poco, ya que ahora como funciona microscópica en fuego artificial.

Objetivo: Proveer de una explicación científica a la luz emitida por algunas sales metálicas al ser expuestas a la llama de un mechero.

Actividades:

1.0 ¿Que hace que los fuegos artificiales se vean tan bien, que hasta emocionan?

Que a la mezcla de la pólvora le agregan distintos minerales, al ser detonada la pólvora los minerales toman una coloración distinta.

2.0 ¿cuál es la explicación macroscópica del fenómeno estudiado, es decir, de la emisión de luz observada por los metales en disolución?

Debe a que los elementos tienen distinta estructura a nivel molecular, a la hora de someterlos a la fuente de calor emiten distintos colores.

3.0 ¿cuál es la explicación microscópica del fenómeno estudiado, es decir, de la emisión de luz observada por los metales en disolución?

El mechero excita los electrones de los elementos provocando un cambio de órbita y esto ocurre a la velocidad de la luz.

4.0 La explicación científica del fenómeno estudiado es una integración de la explicación macro y micro del fenómeno ¿cuál es la explicación científica al fenómeno observado?

Lo que observamos fue un cambio ocasionado por el mechero, que ocasiona un fenómeno luminoso, que no es específicamente el color de los protones de los iones de cada elemento.

5.0 Cambio tu concepción del fenómeno después de realizar la práctica, comparen la respuesta de la pregunta 4 con la pregunta 1 y denme su opinión en tres renglones.

Si, porque en lugar de distintos minerales, es un cambio de orbitales lo que origina un cambio de color.

Objetivo: Proveer de una explicación científica a la luz emitida por algunas sales metálicas al ser expuestas a la llama de un mechero.

Actividades:

1.0 ¿Que hace que los fuegos artificiales se vean tan bien, que hasta emocionan?

Que a la mezcla de la pólvora le agregan distintos minerales, al ser detonada la pólvora los minerales toman una coloración distinta.

2.0 ¿cuál es la explicación macroscópica del fenómeno estudiado, es decir, de la emisión de luz observada por los metales en disolución?

Debe a que los elementos tienen distinta estructura a nivel molecular a la hora de someterlos a la fuente de calor emiten distintos colores.

3.0 ¿cuál es la explicación microscópica del fenómeno estudiado, es decir, de la emisión de luz observada por los metales en disolución?

El mechero excita los electrones de los elementos provocando un cambio de órbita y esto ocurre a la velocidad de la luz.

4.0 La explicación científica del fenómeno estudiado es una integración de la explicación macro y micro del fenómeno ¿cuál es la explicación científica al fenómeno observado?

Lo que observamos fue un cambio ocasionado por el mechero, que ocasiona un fenómeno luminoso, que no es específicamente el color de los protones de los iones de cada elemento.

5.0 Cambio tu concepción del fenómeno después de realizar la práctica, comparen la respuesta de la pregunta 4 con la pregunta 1 y denme su opinión en tres renglones.

Si, porque en lugar de distintos minerales, es un cambio de orbitales lo que origina un cambio de color.