

MIGUEL ÁNGEL CASTRO ARROYO

Catedrático de universidad

Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Sevilla

Átomos y enlaces: amores eternos, inciertos o posesivos

LECCIÓN INAUGURAL DEL AULA DE LA EXPERIENCIA
DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA

CURSO ACADÉMICO 2026-2027



AULA DE LA EXPERIENCIA

Átomos y enlaces:
amores eternos, inciertos o posesivos

AULA DE LA EXPERIENCIA

Átomos y enlaces:
amores eternos,
incierto o posesivos

Miguel Ángel Castro Arroyo
Departamento de Química Inorgánica
Universidad de Sevilla



Sevilla 2026

Colección: Textos institucionales
Núm.: 135

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

© Editorial Universidad de Sevilla 2026
Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.
Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451
Correo electrónico: info-eus@us.es
Web: <https://editorial.us.es>

© Miguel Ángel Castro Arroyo 2026
Maquetación y realización electrónica:
Editorial Universidad de Sevilla

A don José María Trillo de Leyva,
maestro, mentor y ejemplo siempre a seguir,
con respeto y con admiración

*Sra. rectora magnífica de la Universidad de Sevilla,
Sr. director del Secretariado del Aula de la Experiencia,
autoridades académicas,
profesores,
personal técnico de gestión, administración y servicios,
alumnos, en especial los del Aula de la Experiencia,
señoras y señores.*

Introito

Las primeras palabras de esta lección deben ser de agradecimiento. De agradecimiento a mi Universidad, a la Sra. rectora magnífica, al vicerrector de Relaciones Institucionales, al director del Secretariado del Aula de la Experiencia por invitarme a realizar tan digna y respetable tarea y a la directora de la Editorial Universidad de Sevilla por la edición impresa de esta lección.

Y, a continuación, debo referirme sin pausa a la propia Aula de la Experiencia, que este curso cumple felizmente su trigésimo año de vida: ¡treinta vueltas al Sol! Esta Aula es un ejemplo paradigmático de la esencia universitaria. No en vano cubre en sus actuaciones una buena parte del contenido del primer artículo de los Estatutos de nuestra institución, que versa sobre la *Naturaleza de la Universidad*: se presta aquí, en esta encomiable Aula de la Experiencia, un

servicio público de educación superior y se desarrolla aquí, ahora ya por seis lustros, la función encomendada mediante el estudio, la docencia, el intercambio y la difusión del conocimiento y de la cultura, con una especial sensibilidad de nuestra vocación de servicio a la ciudadanía y a toda la sociedad, sin distinción de su edad. Esta lección va dirigida a los miles de estudiantes del Aula que demandaron nuestras ofertas académicas año tras año: a los que estáis hoy y a los que estuvieron. *¡Gaudeamus igitur!*

Si hay una fuente de atracción que se pueda aceptar, de manera general, para todas las personas que se acercan a nuestra Aula de la Experiencia, es el anhelo de la Educación. Pero no, no me refiero escuetamente a ninguna de las cuatro acepciones que incluye el *Diccionario de la lengua española* para este vocablo. Hablo de la Educación con mayúsculas: me refiero a la de Antonio Machado, a la de su heterónimo Juan de Mairena y me refiero a la de Francisco Giner de los Ríos y a la Institución Libre de Enseñanza. Me refiero, en suma, a la Educación que busca respuestas sabiendo que siempre generará muchas más preguntas.

Por ello, quiero que esta lección, aunque menuda sea, recuerde en este introito a nuestros profesores, como transformadores claves de nuestras vidas. Permítanme que lo haga a título personal. Seguro que lo podrán hacer suyo, cada uno en su realidad. Esta lección es un tributo a doña Pilar y a la señorita Isabel, de la Academia Pío XII donde cursé el

principio del primer nivel educativo, y a mi hermana Mari-chín, que me ayudó en la iniciación a la lectura y en el aprendizaje de las primeras tablas de multiplicar. Es también un recuerdo a don Nicolás Gelo, mi profesor de 4º de Enseñanza General Básica, y a don Luis González, a don José María Garrido y a don Luis Rey en mi enseñanza secundaria. Y es un agradecimiento infinito a don José María Trillo de Leyva, maestro, mentor y ejemplo, y a Robert Thomas, que me cuidaron y me educaron en mis etapas pre- y postdoctorales. Todas estas personas, junto a otras muchas que por mor del espacio disponible no puedo mencionar, fueron parte de mi educación, forjaron mi personalidad y hoy son el símbolo de lo que les quiero contar. No esperen hoy verdades absolutas. Pero sí espero que les despierte muchas más preguntas que respuestas; que les anime a preguntarse cada día más cuestiones; y espero, sinceramente, poder conseguir su atención para los próximos minutos.

Voy a presentarles a continuación el tema que deseo desarrollar. Lo haré formulando una pregunta. Una pregunta que, les adelanto, no sabré responder con absoluta seguridad. La idea es la siguiente: si estamos hechos de la misma materia de la que está hecho el Universo, nuestras reacciones más íntimas (emociones, afectos, amores), ¿serán consecuencia natural de las atracciones naturales de las partículas que nos forman? ¿Es posible entender los amores descritos, vividos o soñados desde el conocimiento

que hoy poseemos de la naturaleza de los átomos que nos componen?

Les invito, a continuación, a conocer las teorías actuales sobre las partículas que nos conforman a nosotros y a todo el Universo: me refiero a los *átomos*. Les contaré cómo creemos que son y por qué, en ciertas condiciones, se unen unos a otros. Les mostraré el motivo principal de que se unan: la fuerza de la atracción. Y les enseñaré las similitudes que, a mi entender, esas atracciones tienen con los seres humanos: habrá así amores eternos, amores fatuos y amores posesivos. Y les pediré que se pregunten si están de acuerdo en las similitudes que presentaré. No espero respuestas inmediatas, pero sí espero que no dejen nunca de soñar y de creer en el milagro de la Educación.

Los primeros tiempos

Empecemos. Desde tiempos remotos el ser humano ha querido entender de qué están hechas las cosas, desde las más próximas que nos rodean y que podemos palpar con las manos hasta aquellas más remotas que apenas llegamos a percibir las con el sentido de nuestra vista. Las primeras teorías atómicas sobre la composición de la materia se las debemos al filósofo griego Demócrito (ca. 460-370 a.C.) y a su maestro Leucipo (siglo V a.C.). Demócrito afirmó que todas las cosas están constituidas de partículas indivisibles y empleó para su definición el término átomo; en griego ἄτομο: «que no se puede dividir». Para Demócrito, la realidad estaba constituida por estas partículas indivisibles, los átomos, y el resto era el vacío.

Su teoría atómica fue rechazada por Aristóteles (384-322 a.C.), quien negó la existencia de los átomos y, aún

más, del vacío. Aristóteles defendió, en contraposición a Demócrito y alineado con las ideas de Empédocles (ca. 495-435 a.C.), la teoría de los cuatro elementos: fuego, aire, tierra y agua; defendió la continuidad de la materia y añadió a la teoría clásica de los cuatro elementos un quinto elemento de naturaleza celestial: la quinta esencia. Aunque la teoría atómica de Demócrito tuvo sus partidarios, de manera muy notable contó con el apoyo de Epicuro (341-270 a.C.), el prestigio, la fama y la ascendencia de Aristóteles prevalecieron de tal modo que la defensa de la teoría atomista decayó por un gran tiempo hasta los albores de la ciencia moderna.

La llegada de la era científica

Aunque la teoría atómica, como tal, surge, o *resurge*, a partir de las ideas y los experimentos propios de la ciencia moderna que se expondrán a continuación, el conocimiento de la existencia de «elementos» con propiedades definidas se conoce desde tiempos inmemoriales. Es más, eran utilizados y trabajados para los usos más diversos. En la Antigüedad ya se conocían, y se empleaban, elementos tales como el cobre, el oro, el plomo, la plata, el hierro, el carbono, el estaño, el azufre o el mercurio. En consecuencia, tanto la teoría atómica de Demócrito como las ideas anti-téticas de Aristóteles han de considerarse un claro ejemplo de los caminos tortuosos del avance del conocimiento de la humanidad.

Avancemos, pues, y mostremos los avances sistemáticos de la ciencia en el desarrollo de una teoría atómica científica,

en el descubrimiento de los elementos químicos y en la clasificación de estos. Aunque el conocimiento actual de estas cuestiones es el resultado de una permanente revisión de las teorías, modelos y clasificaciones previamente propuestos, el desarrollo de esta nueva era de la teoría atómica tiene dos referentes claves: en primer lugar, se considera de manera muy extendida al alquimista, filósofo y teólogo anglo-irlandés Robert Boyle (1627-1691), uno de los fundadores de la *Royal Society*, el introductor del concepto «elemento químico» como aquella sustancia que no puede descomponerse en otras. Un elemento químico es, en suma, el cuerpo simple y primitivo que no está formado por otros. Con su obra *El químico escéptico* (1661), *The Sceptical Chymist*, se da un paso determinante para el inicio de la aplicación del método científico en la antigua alquimia. Y en segundo lugar, y a partir de la idea postulada por Boyle acerca de los elementos, el químico inglés John Dalton (1766-1844) publicó en 1808 su tratado *Un nuevo sistema de filosofía química*, *A new system of chemical philosophy*, en el que se desarrollan los principios de la primera teoría atómica basada en consideraciones científicas, según la cual la materia está compuesta de elementos fundamentales indivisibles, tal como expresó Boyle, pero en la que cada elemento tenía un tipo diferente de átomo, los cuales podrían representarse como esferas de distinto tamaño y composición dependiendo de la naturaleza de cada uno de esos elementos.

Junto al desarrollo de estas teorías, toda una pléyade de científicos ha contribuido al avance en el conocimiento de la estructura de la materia y de la clasificación de los diferentes elementos. No pudiendo ser exhaustivo en la enumeración de tantas personas ni en la presentación de cada uno de los progresos, sí se puede realizar una clasificación, dentro del propósito de esta exposición, de los tres tipos de avances realizados por la comunidad científica, a saber: una decisiva aportación se ha llevado a cabo en el descubrimiento, aislamiento y caracterización de los diferentes elementos químicos; una segunda se ha encaminado al desarrollo de teorías más avanzadas sobre la naturaleza de la estructura atómica; y una tercera ha consistido en la propuesta de diferentes teorías y aproximaciones para la clasificación del conjunto de los elementos químicos descubiertos.

El primero de los apartados, el descubrimiento y el aislamiento de los diferentes elementos químicos, abarca un período extraordinario de tiempo que comienza mucho antes de la aparición de las primeras teorías atómicas. El primer elemento extraído y utilizado por el ser humano fue el cobre, alrededor del 9000 a.C., mientras que el segundo elemento descubierto fue el oro, que se estima fue antes del 6000 a.C. En 1661, el año de la publicación de *El químico escéptico*, donde se introduce el concepto elemento, ya se conocía la existencia de una docena de ellos, lo que da muestras del complejo y entrelazado avance del conocimiento del ser

humano. Evidentemente, no conocemos los nombres de sus descubridores, aunque deben considerarse protagonistas de esta inmensa aventura. A partir de ahí, se ha ido produciendo un aumento progresivo de los elementos descubiertos hasta un total de 118 que son los actualmente aceptados por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) desde el 28 de noviembre de 2016. Han sido muy numerosas las personas involucradas en este apasionante recorrido. Permítanme citar solo a los descubridores españoles en esta gran gesta: Antonio de Ulloa (1716-1795), descubridor del elemento platino en 1735, Juan José D'Elhuyar (1754-1796) y Fausto D'Elhuyar (1755-1833), descubridores del elemento wolframio en 1783, y Andrés Manuel del Río (1764-1849), descubridor del elemento vanadio en 1801.

En cuanto al segundo de los apartados, las sucesivas teorías sobre la naturaleza de la estructura atómica, tras la primera teoría atómica de Dalton (1808), que consideraba a los átomos como esferas rígidas, se fueron sucediendo conforme los experimentos científicos de numerosos investigadores iban mostrando evidencias relevantes que obligaron a remodelar la visión inicial. De una manera sucinta, tres tipos de evidencias fueron decisivas para el progresivo avance en la sustitución del primer modelo por otros que se ajustaban más adecuadamente a los hechos experimentales.

La primera evidencia experimental clave para la revisión de la primera teoría atómica fue el experimento de *la lámina*

de oro realizado por un grupo de científicos dirigidos por el físico británico Ernest Rutherford (1871-1937), que consistió en bombardear una finísima lámina de oro con partículas diminutas llamadas alfa. La mayoría de ellas atravesaban la lámina sin cambiar su trayectoria, es decir, sin tropezar con nada a su paso. En consecuencia, se concluyó que los átomos deberían de tener una buena parte de su espacio completamente vacío y ya no se podrían explicar como esferas rígidas.

En cuanto al segundo tipo de hallazgos mencionados, de manera progresiva fueron encontrándose evidencias de la existencia de partículas aún más diminutas que los propios átomos y, en consecuencia, se fueron descubriendo partículas que podrían formar parte de los átomos y justificar el experimento de la *lámina de oro*: el descubrimiento del electrón por el físico británico Joseph J. Thomson (1856-1940) en 1897, del protón por el ya mencionado Ernest Rutherford en 1919, y del neutrón por el físico británico James Chadwick (1891-1974) en 1932 fueron piezas claves en las apariciones de los progresivos modelos atómicos.

Y, finalmente, el tercer tipo de evidencias que transformaron, y revolucionaron, la visión sobre la estructura atómica, aparecieron con el desarrollo de toda la rama de la física denominada mecánica cuántica, que estudia la naturaleza a escala extraordinariamente pequeña, tales como la de los propios átomos. Tres principios fundamentales deben mencionarse como piezas claves para el desarrollo

de las nuevas teorías atómicas: el principio de incertidumbre del físico alemán Werner Heisenberg (1901-1976), según el cual no se puede saber con total precisión y al mismo tiempo la posición y la velocidad de una partícula; el principio de exclusión del físico austriaco Wolfgang Pauli (1900-1958), que establece que dos electrones no pueden tener el mismo estado en un mismo átomo, y la dualidad onda partícula propuesta por el físico francés Louis-Victor de Broglie (1892-1987), que establece que la materia posee propiedades típicas tanto de partícula como de onda.

El tercer y último apartado de esta sección se refiere al reconocimiento de los avances realizados en las diferentes teorías y aproximaciones encaminadas a encontrar una clasificación adecuada del conjunto de los elementos químicos. Una vez aceptado el concepto de átomo, conforme iba avanzando el número de elementos descubiertos, los intentos de encontrar similitudes y series entre los elementos ya identificados fueron una constante de numerosos científicos con el ánimo de encontrar un orden racional y universal a todo este escenario repleto de elementos químicos que estaban formados por unidades fundamentales, los átomos, entendidas de manera global. Se trataba de colocar a cada uno en un sitio que expresara su naturaleza y permitiera reconocerlo con otros de propiedades similares.

Esta tarea ha sido otra gran aventura donde se produjeron colaboraciones, aprendizajes y también obstáculos y

luchas de poder. Sin ánimo de realizar un relato detallado de todos los científicos participantes y de todas las clasificaciones presentadas, se exponen los principales hitos de esta maravillosa historia. En 1817, el químico alemán Johan Wolfgang Döbereiner (1780-1849) enunció su teoría de las tríadas, en la que agrupaba elementos, en grupos de tres, con algunas propiedades similares a partir de la relación de sus pesos atómicos. Sin embargo, conforme se intentaba agrupar a todos los elementos conocidos, los más pesados empezaban a tener dificultades de acoplarlos al modelo. Posteriormente, debe destacarse la propuesta, en 1862, del tornillo telúrico del geólogo francés Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois (1820-1886). En su propuesta los elementos se ordenaban por sus pesos atómicos y se enrollaban sobre un cilindro vertical, de modo que los elementos similares quedaban situados sobre la misma generatriz. Desgraciadamente, el encaje adecuado de los elementos solo se producía para los elementos más ligeros. Dos años más tarde de la presentación del tornillo telúrico, el químico inglés John Alexander Reina Newlands (1837-1898), con la colaboración del propio Chancourtois, propuso la ley de las octavas, según la cual, al ordenar los elementos en función de sus pesos atómicos, cada ocho elementos, el siguiente tenía ciertas propiedades similares al anterior. El ordenamiento prescindía del hidrógeno y aún no contemplaba ciertos elementos desconocidos, tales como los gases nobles.

Un paso decisivo en esta carrera por ordenar racionalmente los elementos químicos lo dio, en 1869, el químico ruso Dmitri Ivánovich Mendeléiev (1834-1907), quien debe considerarse el padre de la actual Tabla Periódica de los elementos. En su primera tabla ordenó los elementos a partir de los valores crecientes de sus pesos atómicos en columnas, de manera que en cada fila contenía elementos de propiedades semejantes. Esta primera tabla se fue remodelando a partir del descubrimiento de nuevos elementos, tales como los gases nobles, y se fueron alojando otros grupos, como las actuales tierras raras. Aunque Mendeleiev murió antes de los descubrimientos que condujeron a la concepción actual del átomo, había conseguido, sin saberlo, ordenar a los elementos a partir de su número atómico. Para poder entender este concepto, el número atómico, es necesario presentar la visión actual de la estructura del átomo. A eso nos dirigimos.

La estructura del átomo

Un átomo, de cualquier elemento de los 118 existentes, está constituido por un núcleo y una corteza electrónica. El núcleo está compuesto por dos tipos de partículas: los protones y los neutrones. Estas partículas tienen la misma masa, pero el protón tiene carga eléctrica +1 y el neutrón no tiene carga. Ellos ocupan la parte central del átomo, poseen la práctica totalidad de la masa, pero ocupan un espacio muy reducido. Por su parte, la corteza electrónica está ocupada por los electrones, que prácticamente no tienen masa, pero tienen una carga eléctrica negativa -1. Si el núcleo de un átomo ocupara un espacio similar al de un balón de fútbol, la corteza electrónica ocuparía un espacio superior al de 100 estadios de fútbol. Es comprensible que en el experimento de la lámina de oro la mayoría de las partículas pasaran sin colisionar con ningún obstáculo.

Respecto de las partículas del núcleo, el número de protones que contiene un átomo es su «número atómico», se representa por la letra Z , y es su señal de identidad. Cada elemento químico tiene un número atómico propio y es el que determina su naturaleza: el hidrógeno es $Z = 1$, el helio es $Z = 2$ y así, sucesivamente, hasta el $Z = 118$ (el oganesón). Por su parte, el número de neutrones que acompaña a los protones de un núcleo aporta masa y estabilidad al mismo. El número de protones más el número de neutrones de un átomo es su número másico y se representa por la letra A . Para un átomo concreto, que viene determinado por su número atómico, pueden existir variedades en función de su número A . A cada una de esas variedades se les llama isótopo. Por ejemplo, se conocen tres isótopos del hidrógeno: el hidrógeno ($Z = 1, A = 1$), el deuterio ($Z = 1, A = 2$), y el tritio ($Z = 1, A = 3$). Los tres isótopos tienen el mismo comportamiento químico y solo se diferencian en su masa.

En cuanto a la corteza electrónica, para que una especie se considere un átomo, la corteza electrónica debe estar ocupada por un número de electrones igual a Z y la especie tendrá carga global cero. Si el número de electrones fuera distinto al de protones la especie sería un ion. Si hay más electrones que protones la carga global es negativa y la especie se llama un anión. Si, por el contrario, hay menos electrones que protones la carga global es positiva y la especie se llama un catión. La carga global de los iones se

calcula restando a Z el número de electrones de su corteza electrónica.

Finalmente, los electrones ocupan estados energéticos concretos, cada uno el suyo, que se llaman orbitales. Los orbitales se organizan en base a unos parámetros que se llaman números cuánticos, de modo que cada electrón ocupará un orbital, el cual se reconoce mediante un símbolo y lleva asociada, para cada elemento químico, una energía concreta. La descripción del conjunto de los orbitales de los electrones de un átomo se denomina su configuración electrónica y determina su posición en la Tabla Periódica. Describamos a continuación la Tabla Periódica de los Elementos químicos como una consecuencia de la estructura descrita de los átomos.

La Tabla Periódica de los elementos

La representación más extendida actualmente de la Tabla Periódica es la aprobada el 4 de mayo de 2022 por la IUPAC y se encuentra publicada en su página web: <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>

En esta tabla cada elemento químico ocupa una posición específica y en su recuadro aparecen su número atómico Z , su símbolo químico de una o dos letras, aceptado de manera universal, su nombre (dependiendo del país en donde se edite se nombrará en su lengua) y su peso atómico A . Aunque hay numerosas tablas con ligeras variaciones en las que se incluyen más datos en cada casilla, esta representación es la oficialmente aprobada.

La Tabla se dispone en 18 columnas (grupos) y 7 períodos y se disponen de derecha a izquierda y de arriba abajo en orden creciente de su número atómico. El número de columnas en

cada período obedece a las posibles configuraciones electrónicas para cada nivel. Sin exponer una descripción concreta de su motivo, es curioso mostrar que los números para cada nivel obedecen a una progresión muy simple: cada nivel tiene un número de casillas igual al doble de la suma de los primeros números impares. Es decir, para el nivel 1 habrá 2×1 recuadros, para el nivel 2 habrá $2 \times (1+3) = 8$ recuadros, para el nivel 3 habrá $2 \times (1+3+5) = 18$ recuadros y para el nivel 4 habrá $2 \times (1+3+5+7) = 38$ recuadros. Se puede observar como el período 1 está compuesto por 2 recuadros (elementos), los períodos 2 y 3 por 8, los períodos 4 y 5 por 18 y los períodos 6 y 7 por 38 (nótese en este caso que, por motivos pragmáticos, las dos series de 14 elementos se colocan abajo, pero señalándose su ubicación verdadera entre los elementos bario ($Z = 56$) y hafnio ($Z = 72$) y entre los elementos radio ($Z = 88$) y rutherford ($Z = 104$)). Algunas representaciones de la Tabla Periódica los colocan en sus respectivos períodos.

La posición de cada elemento en la Tabla da una extraordinaria información acerca de sus propiedades químicas y la Tabla se divide en cuatro regiones denominadas zona s (grupos 1 y 2), zona p (grupos 13-18), zona d (grupos 3-12) y zona f (formada por las dos series de 14 elementos ya mencionadas). Procedemos, a continuación, a realizar una breve descripción de las propiedades periódicas de los elementos químicos.

Las propiedades periódicas de los elementos: un protagonismo a la electronegatividad

Existen definidas, de manera generalizada, una serie de propiedades medibles para los elementos químicos, las cuales siguen tendencias a lo largo de la Tabla Periódica, tanto horizontal como verticalmente, que muestran por sí mismas la importancia de la clasificación y respaldan el modelo atómico según el cual los electrones de un átomo ocupan un conjunto concreto de orbitales (estados energéticos) que suministra una configuración electrónica fundamental para cada átomo. El radio atómico, la energía de ionización, la afinidad electrónica, la dureza y la electronegatividad son las propiedades periódicas fundamentales. Para los propósitos de esta lección, la electronegatividad

es la propiedad fundamental y es a la que le dedicaremos nuestra atención.

Para ello, es necesario en este momento presentar la figura irrepetible del químico estadounidense Linus C. Pauling (1901-1994). Pauling es, sin duda, el químico más preclaro de su tiempo y es uno de los químicos más trascendentes de la historia. Su obra *La naturaleza del enlace químico* (1939), *The nature of the chemical bond*, ha de considerarse obra capital de la química y fundamental para la ciencia. Pauling realizó aportaciones trascendentes en campos tan diversos como la química, la metalurgia, la física, la biología, la medicina y la psicología. Ha sido, hasta el momento, la única persona que ha recibido, en solitario, dos Premios Nobel: el Premio Nobel de Química, en 1954, por sus trabajos sobre el enlace químico, y el Premio Nobel de la Paz, en 1962, por su campaña contra las fuerzas nucleares terrestres. En 1946 se unió al Comité de Emergencia de científicos atómicos fundado por Albert Einstein, con el propósito de advertir y concienciar de los peligros asociados al desarrollo de las armas nucleares. *El presidente Trump, si supiera de su existencia, seguro que estaría muy orgulloso de Pauling, Premio Nobel de la Paz.*

Pauling define la electronegatividad como «la fuerza con la que un átomo atrae a los electrones hacia sí». Para construir su escala de electronegatividad empleó los valores de las energías de enlace de moléculas diatómicas homonucleares

(A_2 , B_2) y los valores de las energías de enlace de las correspondientes moléculas diatómicas heteronucleares (AB). Los resultados muestran como la electronegatividad aumenta, con carácter general, de izquierda a derecha y de abajo arriba en la Tabla Periódica.

A partir de esta definición y la visualización gráfica de estos valores podemos entrar en la parte central y objetivo de esta lección: predecir la naturaleza del enlace químico (covalente, iónico o metálico) entre dos elementos cualesquiera de la Tabla Periódica, lo cual lo abordaremos en la siguiente sección.

La naturaleza del enlace químico y el triángulo de van Arkel-Ketelaar

Los químicos inorgánicos hemos clasificado, de manera clásica, el enlace químico en tres categorías principales: covalentes, iónicos y metálicos, basándonos en propiedades tales como la solubilidad, la volatilidad, la conductividad o la ductilidad.

Los enlaces covalentes típicos se forman a partir de la unión de dos átomos de elevada electronegatividad, los cuales se localizan en la parte derecha y alta de la Tabla Periódica. Ejemplos representativos de sólidos covalentes los constituyen el diamante, formado exclusivamente por átomos de carbono unidos entre sí, el cuarzo, formado por átomos de silicio y de oxígeno, o el carborundo, formado por átomos de carbono y de silicio. Todos ellos presentan elevados puntos

de fusión y de ebullición, extremadas durezas, son aislantes eléctricos y térmicos e insolubles en agua.

Los enlaces metálicos típicos se forman a partir de la unión de átomos de baja electronegatividad, los cuales se localizan en la parte baja e izquierda de la Tabla Periódica. En el caso de formarse a partir de un solo tipo de átomo los sólidos son metales puros, como el oro, la plata o el cobre y, en el caso de estar compuesto por diversos tipos de átomos estos sólidos metálicos se llaman aleaciones, tales como el bronce, el latón o el oro blanco. Estos materiales presentan elevadas conductividades térmicas y eléctricas y un característico brillo, *el brillo metálico*, y son dúctiles y maleables.

Finalmente, los enlaces iónicos se forman cuando se combinan elementos de alta electronegatividad, localizados en la parte alta y derecha de la Tabla Periódica, con elementos de baja electronegatividad, localizados en la parte baja e izquierda de la Tabla Periódica. Son ejemplos representativos de estos sólidos la sal gema, formada por átomos de cloro y de sodio, la fluorita, formada por átomos de flúor y de calcio, o el rutilo, formado por átomos de titanio y de oxígeno. Los sólidos iónicos tienen elevados puntos de fusión y de ebullición, no conducen la corriente eléctrica, suelen ser frágiles y quebradizos y la mayoría se disuelven con facilidad en disolventes polares como el agua.

Con el propósito de clasificar el tipo de unión entre dos átomos cualesquiera de la Tabla Periódica de los elementos,

y con claros objetivos pedagógicos, dos químicos holandeses, A.E. van Arkel (1893-1976) en su libro *Molecules and Crystals in Inorganic Chemistry* [Moléculas y Cristales en Química Inorgánica], de 1941, y J.A.A. Ketelaar (1908-2001) en su libro de texto titulado *De chemische binding. Inleiding in de theoretische chemie* [Constitución química: una introducción a la teoría del enlace químico], de 1947, presentaron, de manera independiente, una representación gráfica para los enlaces binarios entre dos átomos cualesquiera de la Tabla Periódica A y B. Para ello, a cada enlace AB, se le asigna unas coordenadas (x,y) , donde el valor x corresponde con el valor medio de las electronegatividades de los elementos A y B; es decir x es igual a la suma de ambas electronegatividades dividida entre 2, y el valor y se obtiene sustrayendo el valor de la electronegatividad del átomo menos electronegativo al valor de la electronegatividad del átomo más electronegativo; dicho de otro modo, y es igual a la resta, en valor absoluto, del valor de la electronegatividad del átomo A menos el valor de la electronegatividad del átomo B.

Todos los puntos asignados a las diferentes combinaciones de elementos de la Tabla Periódica quedan localizados dentro de un triángulo denominado el triángulo de van Arkel-Ketelaar en honor a ambos químicos ilustres, de tal modo que cada uno de los vértices corresponde a cada uno de los tres tipos de enlaces descritos. El vértice inferior izquierdo corresponde con las coordenadas $(0,9, 0,0)$ para

el enlace Fr-Fr, elemento menos electronegativo de la Tabla Periódica y vértice correspondiente al enlace puramente metálico. El vértice inferior derecho corresponde con las coordenadas (4,1 , 0,0) para el enlace F-F, elemento más electronegativo de la Tabla Periódica y vértice correspondiente al enlace puramente covalente. Y finalmente, el vértice superior del triángulo corresponde con las coordenadas (2,5 , 3,2) para el enlace Fr-F formado entre el elemento más electro-negativo, F, y menos electronegativo, Fr, de la Tabla Periódica y vértice correspondiente al enlace puramente iónico. Todas las combinaciones binarias posibles entre dos átomos de la Tabla Periódica tendrán unas coordenadas correspondientes a algún punto del interior del triángulo de van Arkel-Ketelaar y su posición permitirá asignarle un carácter iónico, covalente o metálico a cada enlace. Actualmente, se suele representar el triángulo con una tenue separación por zonas según el carácter principal y predominante del enlace: covalente, iónico o metálico.

La zona metálica corresponde a débiles uniones entre átomos de igual o parecida escasa electronegatividad. Ello justifica las propiedades del enlace metálico: los electrones se mueven con mucha libertad por todo el material, muestran su característico brillo metálico y los átomos pueden deslizarse unos sobre otros con notable facilidad: por eso son dúctiles y maleables.

La zona covalente corresponde a fuertes uniones entre átomos de igual o parecida elevada electronegatividad: sus enlaces son muy fuertes y altamente direccionales. Se sienten fuertemente atraídos unos a otros. Son materiales de elevada dureza y estabilidad, resistentes y extraordinariamente aislantes.

Y la zona iónica corresponde a fuertes uniones entre átomos de muy distinta electronegatividad. Es tal la diferencia de electronegatividades que el átomo más electronegativo se apropia de una parte de la corteza electrónica del átomo menos electronegativo y ambos se cargan eléctricamente, dando lugar a iones e incrementando su atracción a través de esa interacción electrostática. Son materiales que se suelen disolver en líquidos polares como el agua.

Las similitudes propuestas: los átomos y las personas

Y ahora ya llegamos al final: ¿se parecen algo las uniones de los átomos descritos a las uniones de las personas? Por ejemplo, ¿un amor eterno es igual a un enlace covalente? ¿Un amor fatuo podría recordar a un enlace metálico? Les pido que miren a través de mis torpes ojos estos últimos minutos para que vean lo que yo veo y para que generen, separándose de ellos, su propia opinión.

El triángulo de van Arkel Ketelaar es, ahora, el triángulo de las pasiones amorosas de las personas. De todas, de ustedes, de mí y de cualquier otro ser humano. Miren cómo lo veo:

El enlace covalente es el amor constante, es el amor permanente, el eterno, el de igual a igual. Es el amor para siempre. Es al que todos querríamos alguna vez llegar. El ejemplo más reconocido en la literatura, probablemente,

es el de *Romeo y Julieta* de Shakespeare, que seguro aún siguen juntos hoy en la eternidad. Pero yo prefiero referirme a *Los amantes de Teruel*: a Isabel de Segura y a Diego Martínez de Marcilla. Seguro que conocen la historia: en 1533, en la iglesia de San Pedro de Teruel, se encontraron dos momias bajo el suelo de la capilla de los Santos Cosme y Damián, y se asumió que estas pertenecían a estos legendarios amantes. Estoy seguro de que desde entonces Diego sigue cantándole a Isabel una bella canción que dice «Te amaré hasta el fin de los tiempos, y después te amaré», que seguro inspiró a otros poetas.

El enlace metálico es el amor fatuo, el endeble y el efímero. No tiene conciencia del más allá. No ama con profundidad. Es tan superfluo que puede ser de aquí o puede ser de allá. Es dúctil y cambia como los vientos. El ejemplo más reconocido en la literatura, probablemente, es el de *Orgullo y prejuicio* de Austen, en el que se expresa que «Es una verdad mundialmente reconocida que un hombre soltero, poseedor de una gran fortuna, necesita una esposa». Así, sin más. Pero yo prefiero referirme al *Castigo sin venganza* de Lope: la joven Casandra, la joven esposa del duque de Ferrara, ejemplo representativo del enlace metálico, mantiene relaciones con el hijo de su esposo, el conde Federico. Seguro que Casandra sigue cantando a su esposo, para que lo entienda, «No soy de aquí ni soy de allá», que seguro inspiró a otros poetas.

Y el enlace iónico es el amor posesivo, arrebatador y, finalmente, destructivo. No es un amor elevado ni es un amor liviano. Simplemente no es amor. El ejemplo más reconocido en la literatura es la *Fedra* de Racine. Es una muestra del amor enfermizo que Fedra desarrolla hacia su hijastro Hipólito. La tragedia griega muestra un trágico desenlace que conduce a los personajes a su destrucción total. Pero yo prefiero referirme al «Médico de su honra», a Calderón y a nuestro Siglo de Oro. Lo hago por ser don Gutierre, caballero principal de Sevilla, y protagonista de la obra, el personaje obsesionado con el honor, celoso hasta el extremo y finalmente despiadado. Seguro que Gutierre seguirá tatareando, en tonos bajos, «Ni contigo ni sin mí tienen mis males remedios», que seguro inspiró a otros poetas.

Y con esto acaba mi último triángulo. Piensen y recuerden este soneto que recapitula esta humilde lección. Está estructurado a la manera clásica: catorce versos endecasílabos compuestos de dos cuartetos y dos tercetos. En el primer cuarteto se presenta el objetivo de este ensayo y en el segundo se destacan las características más singulares de cada tipo de enlace químico. En el primer terceto se exhorta a buscar el amor verdadero y en el segundo, epílogo esperanzado, se anima al lector, por si la búsqueda vital no fuere fructífera, a permanecer en esta querida Aula de la Experiencia. Aquí siempre hallará el verdadero amor.

Comparar los amores personales
al de los átomos que nos componen
es reto que estas páginas proponen
con criterios y tesis especiales.

Enlaces covalentes son cabales,
los iónicos surgen si descomponen,
y los metálicos sólo proponen
uniones débiles y desleales.

Huid del amor iónico posesivo,
y del metálico brillante y frío;
¡Buscad el covalente bello y vivo!

Mas si no encontraran y ya sin brío
sintieran un triste sentido esquivo
el Aula será siempre vuestro río.

Referencias

- Aldersey-Williams, H.: *La Tabla Periódica. La curiosa historia de los elementos*. Editorial Ariel, Barcelona, 2015.
- Allen, L.C., Capitani, J.F., Kolks, G.A., Sproul, G.D.: «van Arkel-Ketelaar triangles». *Journal of Molecular Structure*, Vol. 300. Elsevier Publishing Company. Amsterdam, 1993.
- Arenas Rosado, J.F.: *Mendeleev, su Tiempo y su Tabla*. UMA Editorial. Málaga, 2019.
- Bravo, L.A.: *Tabla periódica en espiral y propiedades zonales*. Editorial Reverté. Barcelona, 2024.
- Boyle, R.: *El Químico Escéptico*. Editorial Crítica. Barcelona, 1661 [2012].
- Dalton, J.: *A new system of chemical philosophy*. S. Russell ed. Manchester, 1808.

- Elguero Bertolini, J., Goya Laza, P., y Román Polo, P.: *La tabla periódica de los elementos químicos*. Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 2019.
- Esteban Santos, S.: *La Historia del Sistema Periódico*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, 2009.
- Fernández Garbayo, E.J., Fernández Cestau, J.: *El alfabeto del universo: la tabla periódica de los elementos*. Editorial Tébar Flores, Madrid, 2019.
- Hager, T.: *Linus Pauling and the chemistry of life*. Oxford University Press. Oxford, 1998.
- Izquierdo Sañudo, M.C.; Peral Fernández, F.; Plaza Pérez, M.Á. de la; y Troitiño Núñez, M.D.: *Evolución histórica de los principios de la química*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, 2003.
- Linares López-Lage, R.M.: *Las maravillas ocultas en la Tabla Periódica. Un universo de sabiduría en una sola inscripción*. Programa Editorial Universidad del Valle. Santiago de Cali, 2013.
- Maksić, Z.B., Orville-Thomas, W.J. (eds.): «Pauling's Legacy: Modern modelling of the chemical bond». *Theoretical and Computational Chemistry*, Vol. 6. Elsevier Publishing Company. Amsterdam, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja9957579>
- Marchal Ingrain, A.: *Estáis hechos unos elementos: una historia de la tabla periódica*. Editorial Universidad de Jaén. Jaén, 2016.

- Pauling, L.: «Modern Structural Chemistry». *Science*, Vol. 123, 255-258, 1956. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.123.3190.255>
- Ruiz Suárez, J.C. (coord.): *Un encuentro con la tabla periódica. Ensayos, cuentos y anécdotas*. Editorial Fondo de Cultura Económica. Ciudad de México, 2024.
- Rutherford, E.: «The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom». *Philosophical Magazine*. Vol. 21. Taylor & Francis Publishers. Abingdon, 1911.
- Sproul, G.: «Electronegativity and Bond Type: Predicting Bond Type». *Journal of Chemical Education*. Vol. 78. The American Chemical Society. Washington, 2001.

Índice

Introito	11
Los primeros tiempos.....	15
La llegada de la era científica	17
La estructura del átomo.....	25
La Tabla Periódica de los elementos	29
Las propiedades periódicas de los elementos: un protagonismo a la electronegatividad	31
La naturaleza del enlace químico y el triángulo de van Arkel-Ketelaar	35
Las similitudes propuestas: los átomos y las personas	41
Referencias	45

