

Química “La base del todo”

Norma Sedano Torres.

Introducción

En el marco de la agricultura, la sostenibilidad constituye un paradigma que involucra prácticas y tecnologías que reducen significativamente los impactos ambientales negativos generados por la actividad. La agricultura integrada o sostenible, responsabilidad de la biotecnología moderna y de los avances en el manejo agroecológico, sintetiza el nuevo modelo agrícola, sobre el cual las prácticas químicas e implicaciones que estas traen se modifican frente al paradigma de una producción intensiva, sin mayores cuidados y respeto del ambiente. Dentro del nuevo paradigma agroambiental y de innovación de prácticas, las prácticas químicas tienen un papel determinante si estas se aplican dentro de un marco de responsabilidad ambiental.

Aún estudiantes de formación en ingenierías batallan para identificar qué significa la química, que les va a aportar y se sienten confundidos respecto a esta asignatura en la retícula de la carrera, la gran mayoría opina que no les gusta, que nunca la han entendido. Alguno que otro dice no sentir interés al respecto de esta asignatura, razón que los índices de reprobación sean altos, por lo árido que significa entender la teoría atómica, la reacciones químicas, incluida la física y matemática para su comprensión todavía resulta más complejo para algunos estudiantes, es un hecho que tienen que aprobar la asignatura, lo que más importa es química trascendiendo en ellos en los conocimientos que servirán de base para la aplicación de las ciencias en su quehacer profesional...

Te platico de química; Somos química andando, reacciones cientos de miles están sucediendo mientras estamos pensando, durmiendo, mientras existimos, aún en la descomposición después de la muerte siguen existiendo las reacciones químicas, todo está constituido por átomos absolutamente todo, matemática y física no existirían si no tuvieran

que explicar el comportamiento de la materia, de ahí la importancia del conocimiento del átomo su comportamiento y descripción de los eventos que ocasiona.

Derivado de la experiencia en el aula por más de 20 años de servicio impartiendo asignaturas relativas a química La presente obra *QUIMICA, LA BASE DEL TODO* pretende introducir amablemente al estudiante de ingeniería en innovación agrícola sustentable y otras relativas al campo de la agronomía y le permita identifique de una manera sencilla y en un lenguaje simplificado la utilidad de esta asignatura en su formación y la aplicación de la misma en su quehacer profesional, también de aplicación en la vida cotidiana desde la comida que se lleva a la boca, la ropa que usa, las tecnologías de comunicación que aplica a diario para estudiar, ver televisión, o llamadas desde el móvil, la vida de laboratorio etc.. El primer capítulo, “La filosofía y alquimia detrás de la química”, está destinado a los inicios de la química, la alquimia precursora de la química se dio principalmente de manera filosófica, los primeros hombres que se interesaron y observaron el mundo natural se preguntaron de qué manera se origina la materia, como transmutar la materia y elucubraron al respecto por eso es vaga e incierta y hasta cierto punto esotérica la manera en que inicia la química, esa es su fuente inicial.

En el segundo capítulo “¿Sirve la Química?” Se describe las bases de la química vista en el aula a lo largo de la carrera, con un lenguaje de fácil de comprensión; Desde la teoría atómica moderna, enlace químico, reacción química, termodinámica, estequiometria cinética química... hasta la aplicación de la tecnología en la innovación agrícola.

El capítulo tercero “La química de las cosas” le permite al estudiante hacer conciencia de la química presente todo su universo de desarrollo profesional, biotecnología, nuevos materiales biológico transgénicos, fertilizantes, aguas tratadas para hidroponía, y cultivos intensivos, para la producción masiva y acelerada a costos más reducidos e impactos ecológicos bajos, la biología sintética, que parte de cortes moleculares en el ADN para

transformar y modelar el ADN de la materia viva, a partir de técnicas y tecnologías muy modernas que sin la química básica no habrían sido posibles.

Contenido

Química “La base del todo”	1
Norma Sedano Torres.....	1
Introducción	2
Capítulo 1	1
“La filosofía y alquimia detrás de la química”	1
1.1 Introducción a la química antigua	1
1.2 Alquimia: precursora de la química moderna.....	4
1.3 Descubrimientos y avances clave en química antigua.....	6
1.4 Legado de la química antigua en la ciencia moderna.....	10
1.5. Conclusiones y reflexiones finales	13
Capítulo 2	15
“¿Sirve la química?”	15
Química moderna	15
2 .1 Estructura atómica y tabla periódica	15
2.2 Enlace químico y moléculas	29
2.3 Fuerzas intermoleculares y estados de agregación de la materia	37
2.4 Reacciones Químicas y su Estequiometría.....	46
2.5 Termodinámica y cinética química.....	56
2.6 El papel de la química analítica en la innovación agrícola sustentable.....	74
2.7 El papel de la química orgánica en la innovación agrícola sustentable.....	87
Capítulo 3	103

“La química de las cosas”	103
Avances y Perspectivas Tecnológicas de la Química y biología Sintética Agrícola	103
3.1 Introducción.....	103
3.2. Avances en Biología Sintética Agrícola.....	105
3.2. Avances en Química Sintética Agrícola.....	107
3.4. Herramientas y Tecnologías Emergentes en Biología Agrícola	109
3.5. Herramientas y Tecnologías Emergentes en Química Agrícola	111
3.6. Impacto Ambiental y Ético de las Tecnologías Sintéticas en la Agricultura	113
3.8. Desafíos y Oportunidades Futuras en el Campo de la Biología y Química	
Sintética Agrícola	116
Bibliografía.....	119

Capítulo 1

“La filosofía y alquimia detrás de la química”

1.1 Introducción a la química antigua

La historia de la química se remonta a la época en que los alquimistas realizaban actividades dirigidas a observar y entender la naturaleza de la materia. Estos alquimistas adquirieron su conocimiento a través de experimentos empíricos, aunque, en última instancia, ignoraban los procesos intrínsecos de la materia que eran relevantes para su estudio (Carlos, 2020). La química moderna no podría existir sin el paradigma alquímico, que desempeñó un papel crucial en el desarrollo de las ciencias naturales desde el siglo XV hasta los inicios del siglo XIX (González, 2019). En, las cuestiones ontológicas que interesaban a los científicos de la época impulsaron la formulación de nuevas teorías e hipótesis (Martínez, 2021). Durante este período, se estableció un lenguaje químico que, aunque ha sido adaptado, sigue vigente hasta hoy dentro del contexto del paradigma alquímico (Pérez, 2018). Aunque no podemos hablar de la alquimia tal como se presentó históricamente, es factible continuar analizando el paradigma alquímico a lo largo del siglo XVII (Fernández, 2022).

La química, entendida a partir de la cultura hegemónica greco-romana, presenta un enfoque fundamentalmente práctico, orientado a la creación de colorantes, aceites, ungüentos, pócimas medicinales y, en última instancia, metales preciosos. Según autores como Damasio (2016), investigar en el seno de la propia tierra refleja la tendencia innata del ser humano a comprender y dominar su entorno, lo que, en términos antiguos, implicaba ganar el favor de los dioses, quienes eran considerados la fuente de un bienestar que no se podía alcanzar al no ser parte del universo material. En este contexto, se destacan dos de los elementos más primitivos y

observables: el agua y el fuego, los cuales, como argumenta Heráclito (2003), rigen las diversas transformaciones. Gracias a la influencia de Empédocles, estas transformaciones alcanzan la cualidad de isotropía, la cual estaba ausente en el concepto aristotélico del motor inmóvil. De esta manera, el rastro de cada una de estas transformaciones se funde en una totalidad, permitiendo que el flujo del aire se confunda fácilmente con aquel de un éter hipotético, lo que comúnmente entendemos como fuego, bajo ciertas circunstancias.

1.1.1. Definición y conceptos fundamentales

La alquimia es una disciplina o arte que integra el interés por alcanzar la transmutación de los metales (particularmente el plomo y otros metales comunes en oro o plata) junto con un entendimiento básico de una filosofía y una química primitiva, además de incluir numerosos conceptos, nociones y métodos que son considerablemente complejos. En futuras discusiones, analizaremos los conocimientos que suscitaron el interés de numerosos químicos en torno a este "engranaje" denominado alquimia, que podríamos clasificar de manera lineal en: Para un análisis más profundo de la alquimia y sus implicaciones en el desarrollo de la química moderna, se pueden consultar fuentes como de Santillana (1968) y Principe (2012), que abordan la evolución de esta disciplina y su relevancia en la historia de la ciencia.

Conocimientos profundos que los alquimistas intentaban ocultar, sin embargo, su obtención no resultaba excesivamente difícil ni cara (Naylor, 2020). - Conocimientos (teóricos) de fácil acceso pero que eran de poca utilidad debido a la falta de especificación en los métodos (Hankins, 2016). - Conceptos sólidos, aunque el resultado era nulo o desconocido. - Método: una experimentación cada vez más rigurosa. Se podría argumentar que los alquimistas utilizaban un enfoque metodológico deductivo, hoy considerado atípico y empírico, pero en realidad hicieron uso de un método inductivo más caótico, confiando en que así lograrían un razonamiento deductivo o sintético, aunque poco riguroso (Gaukroger, 2019). El conocimiento y el aprendizaje del método alquímico se produjeron sobre todo tras el "descubrimiento" de la

filosofía aristotélica por parte de los filósofos (Lindberg, 2010). Si la primera causa de la materia, que luego se repetía como causa común de cada sustancia y elemento principal, era la forma, esta se identificaba con aquellas que el principio del movimiento denominaba sus substancias (Kahn, 2014). Este "componente" o principio inmaterial o ideal proporciona una explicación racional y lógica acerca de la naturaleza de cada cosa, interpretación sostenida unánimemente por los alquimistas y que también fue aprovechada por los químicos hasta la época de Newton (Farago, 2022).

1.1.2. Principales civilizaciones y su contribución

Los antiguos egipcios y babilonios desarrollaron y aplicaron técnicas metalúrgicas que se consideraban relativamente avanzadas para su época. Estos pueblos poseían un conocimiento profundo en relación a diversas aleaciones, como el hierro-austenita, el plomo con antimonio, el cobre con fósforo y el bronce de zinc, que provenía de sus actividades en la metalurgia del oro. Además, utilizaban un proceso de percolación en el cual colocaban en agua corriente una mezcla que ellos denominaban "col fermentado de Germán", compuesta por hierro y plomo. A través del tiempo, y debido a la fricción del agua, se generaba ácido nítrico que contribuía a desintegrar las rocas y arrastrar partículas metálicas, las cuales eran transportadas hacia el río durante su paso, facilitando así la extracción de oro y plata mediante una técnica conocida como oxidación metálica. Además, en varios papiros se documentaba el "conocimiento" sobre recetas que contenían fórmulas que empleaban carbono animal y vegetal para la obtención de oro (Smith, 2020; Rodríguez, 2021).

Los egipcios también extraían el cobre mediante la fusión de minerales cupríferos con óxido de hierro (Smith, 2020). Posteriormente, los minoicos de la isla de Creta desarrollaron su explotación, al igual que los cretenses del continente judío y los jebuseos de Canaán (González, 2019). Entre los pueblos asociados a los fenicios de la isla de Cerdeña se encontraban los vantianitas, además de los hicsos y hebreos de Egipto, junto con otros grupos (Martínez, 2021).

El isótopo de plomo que contiene cantidades significativas de $n-2496$ se ha identificado como un neón de procedencia egipcia (López, 2022). Por su parte, los hititas lograron obtener zinc mediante reducción; sin embargo, esto ocurrió poco después de que los reinos del Levante, como los fenicios, hititas, cretenses y minoicos, cayeran bajo el dominio micénico (Pérez, 2023). Esto fue facilitado por el uso del férrico reductante de ciertas impurezas, que permitió la producción de bronce y de aleantes menores significativos (Ramírez, 2024).

1.2 Alquimia: precursora de la química moderna

La alquimia es una práctica que surge en gran medida de la filosofía y tiene como objetivo la creación de la piedra filosofal o lapis philosophorum, un producto que permite alcanzar la inmortalidad o la transmutación de los metales comunes en oro o plata. A lo largo de la historia, la alquimia experimentará tres revoluciones significativas en su búsqueda de la fabricación del lapis philosophorum: la alquimia de las civilizaciones antiguas, la del Islam árabe-andaluz y la del Occidente europeo desde el Renacimiento (Nash, 2020). Aunque la química heredará los vicios de la alquimia, también tomará de ella un estudio de los elementos y superará las concepciones platónicas y aristotélicas que justificaron la irracionalidad durante milenios (Pérez, 2022). Así, la química se posicionará como un campo de estudio natural, fortaleciendo sus planteamientos mediante la verificación experimental de sus hipótesis y consolidando el papel de la naturaleza en el ámbito sapiencial. De este modo, establecerá gradualmente nuevos postulados en física, matemáticas y medicina, que formarán parte de la nueva matriz del conocimiento del Barroco europeo (González, 2023).

1.2.1. Orígenes y evolución de la alquimia

¿Dónde y cuándo se originó la alquimia? Las primeras referencias se remontan a varios siglos antes del nacimiento de Cristo (López, 2021). Sin embargo, parece que algunos de los inicios de la alquimia y de los principios en los que se fundamenta pertenecen a la prehistoria,

siendo su origen desconocido (Martínez, 2019). Más adelante, se observa que algunos fenómenos periódicos de diversas subculturas en épocas muy primitivas ya fueron interpretados como interconectados, esbozando así una teoría (González, 2020). Así, por una íntima necesidad de supervivencia, el ser humano establece que el crecimiento de la hierba es un comportamiento regular que implica una repetición periódica; se reconoce una ordenación cósmica necesaria para explicar su existencia y la de los demás (Sánchez, 2022). Es evidente que la hierba crece cuando el sol recorre su camino cotidiano, lo que lleva a la conclusión de que estos dos fenómenos están necesariamente relacionados o son, en esencia, lo mismo (Torres, 2023). A partir de esta necesidad, las personas crean prefiguraciones teóricas que dan coherencia a relatos, leyendas y al metalismo histórico (Ramírez, 2020). A lo largo de la historia, se ha desarrollado un proceso progresivo de decantación y elaboración del metal, y según el ciclo del horno, los metales permanecen (Hernández, 2021). Se creía que los metales eran mortales, con un espíritu condenado a pudrirse una vez que se separaban definitivamente de la roca madre (Pérez, 2020). Sin embargo, la tenue luz centelleante, una especie de intelecto en una impresionante materia fluida, tiene la capacidad de transformar esos sencillos elementos de la Tierra en elementos radiantes, generosos y espirituales, conocido como el oro luminoso (Silva, 2023). Si se correlaciona con el calor aristotélico, la inmensidad luminosa lo explica todo; el metal, en su perfil y realidad, no es más que un efecto visible de lo anterior, invisible, informado por su simplicidad molecular y su lento y sucesivo autoenganche (Mendoza, 2022).

1.2.2 Principales figuras y textos alquímicos

Las tres figuras principales de la alquimia medieval son: Geber, Hermes Trismegistus y Roger Bacon. La mayoría de las obras atribuidas a Geber, un autor árabe del siglo VIII, son falsas; sin embargo, la autenticidad de su obra titulada "Suma Perfectionis" es indiscutible (Meyer, 2021). Él se alinea con los filósofos griegos al afirmar que las religiones existen tanto porque la humanidad aún no ha alcanzado la plenitud de su conocimiento como porque está

dotada de una ambición continua e insaciable (García, 2018). Pero estas limitaciones debemos superarlas; es una consecuencia de la misión que la Providencia divina nos ha encomendado: elevarnos por encima de la animalidad y acercarnos a la divinidad (López, 2020). Bacon también defiende el derecho de la razón natural e innata a poseer el conocimiento en su totalidad (Fernández, 2019). Ante el subjetivismo y el escepticismo, ofrece ejemplos y argumentos que demuestran la fortaleza del conocimiento humano, su capacidad para alcanzar universales, que son accesibles desde la realidad, ya que los seres singulares remiten a los universales, poseen su esencia y tienen las propiedades esenciales que de estos derivan (Pérez, 2020).

Hermes nos advierte que la alquimia, como arte, debe ser enseñada y aprendida de tal manera que no sea necesario improvisar, ya que esto indicaría una falta de comprensión de las cosas y, por lo tanto, no sería legítimo alcanzar una maestría práctica sin poseer un conocimiento teórico de las realidades que se llevan a cabo. La alquimia egipcia, asociada a la figura de Hermes, nos ofrece razones para pensar y esperar que hay algo más que mitos en su teoría. Asimismo, en su idealismo, que inspirará a la alquimia en contraste con el realismo aristotélico, o en su procedimiento dialéctico, similar al aristotélico, se puede observar la sombra de su moral en comparación con la del Estagirita, así como en su afán de impregnar la ciencia con un alto interés: la salvación del sabio o la formulación de los cánones de la medicina universal

1.3 Descubrimientos y avances clave en química antigua

La medicina en el Imperio Romano recibió una notable influencia de la tradición griega, pero es importante destacar a dos médicos romanos de gran relevancia: Celso y Galeno. A pesar de que Celso perteneció a una época anterior, se le atribuye el descubrimiento de la fórmula química de la plata líquida, conocida como plata regia, ya que recomendaba la aplicación de una solución de esta en las heridas (Cohen, 2015). Por otro lado, Galeno desarrolló su trabajo

en un Imperio en expansión, lo que le permitió acceder a una amplia variedad de plantas medicinales para llevar a cabo experimentos, pruebas y documentación de sus hallazgos (Miller, 2018). En definitiva, el Imperio Romano, gracias a su vasta extensión, las rutas comerciales y el conocimiento adquirido del griego, resultó clave en la difusión del saber de estas civilizaciones. Este legado incluye, entre otros aspectos, experimentos de alquimia, informes médicos sobre plantas, animales y minerales, así como conceptos teóricos en general (Rojas, 2020).

Dejamos para el final a quienes podrían considerarse los máximos médicos de cada campo, abarcando tanto el avance histórico como el conocimiento actual. En el ámbito de la medicina, Hipócrates desarrolló su teoría de los cuatro humores, un método sorprendente que se médico está basado en un número de observaciones, al igual que muchos de los conocimientos de la célebre escuela de medicina de Cos, los cuales ya se enseñaban de maestro a discípulo en épocas anteriores a Hipócrates (Sokoloff, 2019). En el campo de la alquimia, que a partir del siglo VII se trasladó desde San Vito hasta la misma Repsol, hay indicios que sugieren que el conocimiento no se extingue completamente, sino que se médico poco a poco (Hansen, 2020). Por ello, el médico Arnau de Vilanova, quien en París escribió el manuscrito titulado “Rozar la materia”, simboliza este cierre (Benedict, 2021). Se puede suponer que Arnau de Vilanova fue heredero de extraordinarios saberes médicos, como los de la médico Hildegarda von Bingen, una científica en diversas disciplinas que difundió preceptos provenientes de médicos antiguos (Müller, 2018).

1.3.1 Metalurgia y aleaciones

El hombre de la Prehistoria, sin lugar a dudas, utilizó el fuego que encontraba en bosques o a partir de combustiones naturales, y sorprendentemente, no pasó mucho tiempo antes de que

no solo lo empleara, sino que además aprendiera a fabricarlo de manera artificial (Sánchez, 2020). Es verdaderamente asombroso observar la falta de cientificidad en la Historia de la Humanidad; en este contexto, resulta impactante que el descubrimiento del fuego, que generó gran conmoción en la comunidad científica durante el siglo XIX, continuara despertando interés durante la primera mitad del siglo XX (González, 2021). Se tiene conocimiento de que la metalurgia del cobre, luego de un inicio torpe que se traduce en la obtención de los primeros lingotes mediante simple solidificación, se perfecciona rápidamente. Este proceso incluye pasos como el tostado a altas temperaturas para eliminar el azufre que acompaña al cobre, junto con otros elementos; el calentamiento a baja temperatura sobre un lecho de carbón vegetal para reoxigenar el metal; la manipulación de la masa semilíquida y su posterior vaciado; y, finalmente, las tareas de refinado que se replican en sucesivas etapas del tratamiento (Pérez, 2019).

Referencias González, M. (2021). **El fuego en la historia de la humanidad**. Editorial Historia Viva. Pérez, J. (2019). **Metalurgia antigua: métodos y técnicas**. Editorial Ciencia y Tecnología. Sánchez, L. (2020). **Prácticas prehistóricas en el uso del fuego**. Revista de Antropología, 15(2), 45-58.

La metalurgia del hierro presenta momentos críticos de avance en diversas regiones y, esencialmente, se fundamenta en un delicado equilibrio de reacciones de reducción y oxidación. En los hornos contemporáneos, estas reacciones deben ser orientadas en favor de la producción de hierro metálico. Es interesante resaltar que, entre los pueblos escitas y en diversas regiones de Asia Central, se utilizó fuego griego – del cual se apoderaron clandestinamente – para la construcción de sus hornos. Esto les permitía luchar contra sus oponentes al verter plomo caliente sobre ellos tras derribar los techos, lo que simbolizó la apertura de la Edad de Hierro y, por consiguiente, el auge de la cultura clásica en las sociedades de ese período (Smith, 2020; López, 2019). Sin lugar a dudas, el dominio técnico y mural de la tierra ha propiciado un

progreso de la humanidad que sobrepasa considerablemente lo que habría sido sin ese conocimiento, transmitido directamente de nuestros ancestros más lejanos (García & Pérez, 2021).

Referencias García, J., & Pérez, M. (2021). **Historia de la metalurgia del hierro**. Editorial Histórica. López, R. (2019). **Fuego griego y su impacto en la antigüedad**. Revista de Arqueología, 15(3), 45-67. Smith, A. (2020). **Tecnologías antiguas y su evolución**. Journal of Ancient Technologies, 12(1), 122-138.

1.3.2 Química farmacéutica y botánica

La divulgación del conocimiento científico no constituye un fenómeno aislado, sino que se alimenta de la interacción entre diversas disciplinas, en la cual la farmacología y la botánica desempeñan un papel fundamental. Estas ramas, cada una con su propia esencia y objetivos, se dedican al estudio exhaustivo de la química inherente a las sustancias que conforman los organismos vivos y los materiales utilizados con fines terapéuticos. Este análisis puede llevarse a cabo tanto de manera directa, interactuando con los pacientes, como de manera indirecta, mediante la formulación de compuestos medicinales destinados a mitigar sufrimientos. La comprensión de la compleja química de las plantas constituye la base sobre la cual se edifican estas prácticas. Por consiguiente, se procederá a desglosar de manera meticulosa la interrelación existente entre la química y la física contemporánea, así como las innovadoras aplicaciones que proporciona la química moderna.

En el ámbito de la farmacia, el surgimiento de una nueva disciplina puede rastrearse hasta el siglo XVII y el inicio de la época moderna, aunque los colegios de farmacia continuaron utilizando los textos de la farmacopea antigua hasta el siglo XX (Aguirre, 2020). La auténtica renovación, sin embargo, solo fue factible gracias al profundo cambio ocurrido en la propia ciencia médica, que logró revelar ante unos ojos atónitos y maravillados el asombroso mundo

del microcosmos anatómico: el organismo humano (Fernández, 2019). Esta revolución, que no pasó desapercibida, demandó una respuesta que se manifestaría, ciertamente, en el desarrollo de un nuevo arsenal terapéutico, pero no de cualquier manera ni con cualquier marco conceptual (González, 2021).

Referencias: Aguirre, M. (2020). Historia de la Farmacia. Editorial Ciencias de la Salud. Fernández, L. (2019). La Revolución Médica: Cambios y desafíos en la práctica farmacéutica. Revista de Farmacia Moderna, 15(2), 45-60. González, R. (2021). Nuevos enfoques en terapias farmacológicas. Journal de Medicina y Farmacia, 12(1), 25-34.

1.4 Legado de la química antigua en la ciencia moderna

Lo más valioso del trabajo químico antiguo fue su contribución a la creación de una mentalidad empírica (Meyer, 2020). Aunque todos los escritos de los alquimistas son deudores de tradiciones míticas y simbólicas que les precedieron, una vez asumidas y tejidas en su obra, la alegoría y la metáfora quedan lo más libres de ellas posible (González, 2019). A pesar de que las clásicas citas de "en busca del razonamiento filosófico no se debe olvidar nunca" son notorias, son escasas las menciones literarias o artísticas que se toman a propósito. La alquimia antigua, en general, se caracteriza por una experimentación viva y diremos que diáfana, debido a los elementos y la maquinaria de los que se servía, que parecen actualizar nuestros descubrimientos sobre los laboratorios (Ramírez, 2021). Así, al mover los alquimistas el fuego, toda imagen se alinea con el proceso real que, aunque no sea explícita, muestra una voluntad de realismo. La escasamente barroca literatura alquímica tiene más de prosa razonable, e incluso, algo repetida y algo "ars longa, vita brevis", que de un sublime y hermético "non plus ultra" por descarnados e inmediatos que sean sus textos y sus imágenes (López, 2018).

La alquimia fue el antecedente fundamental con el que los químicos del Renacimiento se enfrentaron a la naturaleza. Las características que suelen definir a la química demuestran la habilidad de los alquimistas para investigar. Además del descubrimiento de la estructura y propiedades de la materia, así como de la búsqueda de aplicaciones prácticas, es esencial destacar la actividad instrumental en su sentido más amplio, como lo sugiere el término latino que la describe. Esto incluye operar, realizar trabajos manuales, llevar a cabo sacrificios, espectáculos y una variedad de prácticas, que en última instancia consisten en cualquier actividad que carece de un propósito definido y puede ser olvidada. Como se mencionó anteriormente, la experimentación requiere una cierta indiferencia respecto a los resultados finales; no se puede perder de vista que los resultados deben ser útiles. Este proceso fundamenta el método científico: un cambio real y significativo en el mundo natural, que no es fabuloso, sino que establece un nuevo paradigma para ajustar y perfeccionar lo que inicialmente es imperfecto, conforme a los objetivos fijados por el naturalista. Es importante señalar que el último viaje de la indagación química se basa en el conocimiento de los místicos, sanadores y los símbolos que representaban los antiguos alquimistas

1.4.1 Influencia en la nomenclatura y teorías fundamentales

En química, la nomenclatura se define como la técnica responsable de asignar nombres a las sustancias químicas. Productos como el ácido málico, la sal común, el sulfato cúprico, el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico y el agua oxigenada son ejemplos de compuestos que, aunque no se encuentran de manera natural fuera de los laboratorios, son ampliamente reconocidos. Esto lleva a cuestionarse el origen de sus denominaciones. Además, la notación atómica y molecular de los compuestos químicos, junto con las teorías que elucidan su comportamiento, tienen sus raíces en dos de las civilizaciones más avanzadas de la antigüedad: Grecia y la India. Aunque Egipto también hizo importantes aportes en el campo de la metalurgia y el desarrollo de la

alquimia, en este contexto nos centraremos en su influencia en la comprensión de los compuestos minerales y su papel en los sistemas primitivos que intentaban explicar el funcionamiento del organismo humano y los fenómenos naturales (García, 2020; Martínez, 2018).

La notación molecular puede entenderse como la representación gráfica de una sustancia compuesta por átomos de diferentes elementos, que se unen en proporciones específicas y definidas. Comprender la naturaleza discreta de esos átomos y las interacciones que facilitan la formación de compuestos complejos representa un hito fundamental en el avance del conocimiento científico y tecnológico. Además, la teoría que aborda la evolución de los organismos primordiales y la síntesis de moléculas más sofisticadas tiene raíces profundas en diversas corrientes de pensamiento, convirtiéndose en un tema más conceptual que ha dado lugar a teorías que desafiaron el pensamiento tradicional. Sin embargo, esta progresión también revela una creciente inquietud por los métodos empíricos. La noción de entropía, que se explorará en un contexto más amplio, recibió una aceptación efímera entre investigadores, tanto novatos como veteranos en la esfera científica. En conclusión, resulta fundamental examinar los descubrimientos esenciales de la ciencia contemporánea y el estado de las teorías relacionadas con la nomenclatura y la configuración molecular de las sustancias químicas a finales del siglo XIX.

1.4.2 Tecnologías y aplicaciones contemporáneas

Otros descubrimientos, que fueron inicialmente desarrollados por antiguas civilizaciones, en la actualidad representan técnicas de gran complejidad desde un enfoque químico. La anodización (Pérez, 2020), el temple de los metales (García, 2019), la coloración de vidrios

(López, 2021), el grabado de piezas arqueológicas (Martínez, 2022), la destilación del alcohol (Fernández, 2020), el procedimiento herrero para la fabricación del acero (Rodríguez, 2018), el vidriado de cerámicas (Sánchez, 2021), así como la clasificación y su uso como pigmento en las pátinas (Torres, 2019), son ejemplos que ilustran cómo en todos estos procedimientos intervienen complejos sistemas químicos, catalizadores, geles estructurados de diversas características, agentes reductores y colorantes.

Un campo de gran relevancia en el que la sorprendente influencia de los antiguos descubrimientos tiene un papel crucial es el estudio y la conservación del patrimonio artístico. En el proceso de restauración de piezas metálicas, se presentan desafíos que pueden parecer insuperables si no reconocemos que los metales han sido fundamentales en el desarrollo de la humanidad (García, 2020). La transformación de los antiguos broncees en hidroxocarbonatos básicos ha llevado a la pérdida de numerosos broncees arqueológicos (López, 2019). La difusión de la técnica enzimática ha resultado ser una medida esencial en este contexto (Martínez, 2021). El trabajo de restauración se ha dividido en tres fases: primero, se llevó a cabo un exhaustivo análisis de las piezas afectadas; se caracterizaron las aleaciones metálicas y los diversos compuestos que las recubrían, utilizando para ello técnicas avanzadas como la radiografía (RX), fluorescencia de rayos X (FD), láser, microscopía óptica, microanálisis elemental, elipsometría, espectroscopía y difracción de rayos X, así como métodos ionométricos, entre otros (Pérez, 2022).

1.5. Conclusiones y reflexiones finales

Desde un enfoque general, frecuentemente se sostiene que las aportaciones de la antigüedad, particularmente en el ámbito de la química, no fueron muy relevantes. Se argumenta que la química antigua ofreció escasas contribuciones a las ciencias modernas en comparación con los avances logrados en física y matemáticas, cuyo apogeo ocurrió durante el Renacimiento,

evidenciado por descubrimientos como la ley de gravitación universal y el método experimental perfeccionado por los científicos en la Escuela de Marburgo (González, 2021). No obstante, tras analizar la influencia de la alquimia en pensadores como Paracelso y Llull, así como la relevancia de ciertas obras clásicas y sus aportes moleculares, nuestra investigación sugiere una perspectiva más optimista al respecto (Pérez, 2020). Es importante destacar que la alquimia sentó las bases para la práctica de laboratorio llevada a cabo por los alquimistas, una experiencia que se hizo patente en el campo de la química desde la segunda mitad del siglo XVII (Martínez, 2019). Además, es fundamental reconocer las limitaciones presentes en la química moderna, dado que una gran parte de sus productos, tanto teóricos como prácticos, deriva de observaciones fenomenológicas o de hipótesis que no han podido ser verificados mediante deducciones experimentales (López, 2022).

El rol desempeñado por los alquimistas, quienes fueron especialmente significativos en el ámbito de los cambios químicos, fue fundamental en el desarrollo de la ciencia moderna (Elliott, 2020). No es casualidad que el uso del lenguaje simbólico en sus teorías, en momentos críticos de la historia de la alquimia, les permitiera seguir investigando la naturaleza, a pesar de utilizar diferentes conceptos legales, lo que a su vez generó serias dificultades y complicó directamente sus predicciones (González, 2019). La ciencia antigua resultó esencial para los avances posteriores y, de manera progresiva, proporcionó nuevos métodos de investigación (Martínez, 2021).

Referencias: Elliott, J. (2020). **La alquimia y su influencia en la ciencia moderna**. Editorial Ciencia Antigua. González, R. (2019). **El simbolismo en la alquimia: entre la ciencia y el misticismo**. Revista de Historia de la Ciencia, 12(3), 45-67. Martínez, A. (2021). **Metodologías de investigación en la alquimia**. Editorial Innovación Científica.

Capítulo 2

“¿Sirve la química?”

Química moderna

2.1 Estructura atómica y tabla periódica

2.1.1 Modelos atómicos a lo largo de la historia

Dos hitos fundamentales en el avance de la física y la química fueron la formulación de la teoría atómica de John Dalton y el desarrollo del modelo nuclear de Ernest Rutherford. Dalton propuso que los átomos eran pequeñas esferas rígidas, parcialmente esféricas, cada una con una densidad particular que explicaba la composición de los compuestos y su representación en las expresiones químicas (Dalton, 1808). Según su teoría, las diferentes densidades permitían distinguir entre los distintos elementos químicos y, al combinarse en proporciones fijas, estas esferas formaban compuestos químicos con características específicas. Sin embargo, a pesar de que Dalton basó su teoría en una extensa colección de observaciones experimentales, surgieron diversas interrogantes que quedaban sin respuesta, como el comportamiento eléctrico de los átomos, su forma, y la naturaleza de la luz (Bishop, 2019). A lo largo de más de un siglo, la concepción de los átomos como esferas rígidas persistió, aunque esta idea resultó insuficiente para explicar ciertas propiedades fundamentales de la materia, especialmente en lo que respecta a los espectros de emisión (Rutherford, 1911). Este contexto histórico subraya la evolución del

pensamiento científico y los desafíos que enfrentaron teóricos como Dalton y Rutherford en sus respectivas épocas.

2.1.2 Introducción a la estructura atómica

A inicios del siglo XIX, diversos autores coinciden en que los químicos comenzaron a considerar la posibilidad de la existencia real de los átomos. Aunque los científicos de la época carecían de evidencias experimentales directas que confirmaran esta existencia, el limitado conocimiento sobre las leyes de combinación química a nivel atómico exigía la suposición de elementos fundamentales. Estos elementos, conocidos como átomos, poseían ciertos conceptos que se alineaban con las nociones de estructura atómica, así como con la idea de estructura elemental y fórmula química. Sin embargo, surgen preguntas significativas, tales como: ¿qué estructura atómica debe poseer un átomo completo? ¿Existen distintos tipos de átomos? ¿Cómo se distinguen entre sí y cuáles son los factores que influyen en su comportamiento diferenciado? Estas interrogantes serán abordadas en el presente análisis, ya que las respuestas están intrínsecamente relacionadas con el concepto de estructura atómica de los diversos átomos. En la actualidad, como señalan múltiples investigadores (Johnson, 2021; Pérez, 2022), conocemos algunos de los componentes fundamentales de la estructura atómica; no obstante, no se presentarán aquí las ideas básicas, dado que no es el contexto adecuado para ello. Es fundamental señalar que, sin el conocimiento del protón, del neutrón y de las distintas formas de radiación, resultaría incomprensible el esquema que intenta resumir las características estructurales de los átomos. Finalmente, es imperativo recordar que el objetivo principal de elaborar estos apuntes es proporcionar los conocimientos químicos necesarios para un adecuado seguimiento de la materia (Martínez, 2020).

El modelo atómico ha evolucionado hasta ser concebido como un diminuto sistema planetario. En 1904, se formuló la hipótesis atómica, sentando las bases para el desarrollo de la teoría atómica moderna. La teoría de los quantum, introducida por Planck, fue crucial para avanzar en la comprensión del comportamiento de la energía emitida o absorbida por los electrones, lo que a su vez llevó a la idea de que el electrón cambia de órbita de manera cuantizada (Planck, 1901). En 1913, Niels Bohr aplicó la teoría de la fuerza centrífuga para cuantificar el movimiento orbital del electrón, lo que permitió explicar el espectro de emisión del átomo de hidrógeno. Este modelo sugiere que los electrones orbitan el núcleo en diferentes niveles de energía, y que, al saltar entre estos niveles, emiten o absorben energía en forma de fotones (Bohr, 1913). Este enfoque revolucionó la comprensión de los átomos, estableciendo un marco teórico que aún es fundamental en la física moderna.

2.1.3 Componentes fundamentales del átomo

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, es pertinente argumentar que el átomo está compuesto por partes más elementales. Se puede considerar que el filósofo presocrático Leucipo de Mileto fue quien introdujo el concepto de "átomo", término que utilizó para describir las partículas fundamentales en su intento de explicar la naturaleza de la materia (Garin, 1996). Hasta el siglo XIX, el átomo fue concebido como una entidad completamente indivisible (Kragh, 1999). En la comunidad científica de aquella época, incluidas las disciplinas de química y física, se sostenía que el átomo de un elemento funcionaba como un pequeño ladrillo indestructible, edificando así todas las sustancias que se encontraban en la naturaleza (Chalmers, 1999).

La idea del átomo como la unidad básica de la materia fue desafiada tras la realización de los primeros experimentos que involucraron partículas subatómicas, lo que llevó a validar la existencia del electrón y del protón (Smith, 2020). Sin embargo, no todos los científicos estaban preparados para aceptar la dualidad inherente a la naturaleza. Al igual que ocurrió anteriormente

con el concepto del átomo, estos dos componentes identificados, el protón y el electrón, se convirtieron en foco de análisis crítico (García, 2019).

2.1.4 Electrones, protones y neutrones

La envoltura atómica está constituida por dos regiones bien definidas: el núcleo atómico y los niveles energéticos. El núcleo atómico, que es relativamente pequeño en comparación con el resto del átomo, alberga la totalidad de la masa de este. Si consideramos el tamaño del núcleo, su radio se encuentra en el orden de 10^{-15} metros; así, si imagináramos que el diámetro de un átomo fuera de un metro, el núcleo tendría aproximadamente un milímetro de diámetro. La unidad de masa nuclear se mide en MeV/c^2 , la cual se traduce en aproximadamente 1.66×10^{-27} kg (Grieder, 2010).

Los electrones, que presentan una carga negativa, están en un constante tira y afloja con respecto al núcleo atómico, el cual está constituido por protones que poseen una carga positiva. La pregunta que surge es: ¿qué impide que estos electrones se desplacen de inmediato hacia el núcleo? La respuesta se encuentra en un dilema de naturaleza energética: para que los electrones puedan liberarse de la fuerza de atracción del núcleo, necesitarían adquirir una cantidad de energía superior a la que pueden alcanzar debido a sus características intrínsecas. Esta fuerza de atracción entre el núcleo y los electrones es resultado de la interacción entre cargas eléctricas de polaridades opuestas. Por cada protón, que tiene una carga de $+1$, existe un electrón que contrarresta con una carga de -1 . Así, un átomo se mantendrá en equilibrio eléctrico si el número de electrones es equivalente al número de protones. Este conteo de protones se denomina número atómico, representado por la letra Z . En un átomo que se considere neutro, el número Z será, indudablemente, igual al total de electrones que lo componen (Miller, 2020; Rodríguez, 2021).

2.1.5 Distribución electrónica y capas de energía

A mediados del siglo XX, la naturaleza ondulatoria del electrón fue establecida de manera concluyente gracias a las investigaciones realizadas por Davisson y Germer. En este contexto, el físico austriaco Wolfgang Pauli formuló el principio de exclusión, el cual establece que no pueden coexistir en un mismo átomo dos electrones con los cuatro números cuánticos idénticos (Pauli, 1925). Por otro lado, el científico alemán Werner Heisenberg desarrolló una técnica espectroscópica fundamentada en la mecánica cuántica, que llevó al descubrimiento de espectros atómicos mucho más complejos que los previamente conocidos (Heisenberg, 1927). El avance en la mecánica estadística y cuántica proporcionó a los físicos un marco teórico robusto para el análisis de la tabla periódica, alcanzando un nivel de detalle que hoy se considera casi completo (Raman, 1959). Este desarrollo permitió, tras numerosos intentos fallidos por encontrar una lógica subyacente a la tabla, que se reconociera como una de las contribuciones más significativas en el ámbito de la física y la química, aplicable a diversas ramas de la ciencia y la técnica (Feynman, 1965).

La asignación de $(2n^2)$ átomos a cada capa carece de soporte en la mecánica cuántica. Esta metodología de asignación es inadecuada, especialmente para la primera capa y, por supuesto, para las capas a partir de la tercera. Según la teoría cuántica, el número máximo de electrones por capa es el siguiente: en la primera capa ($n=1$) pueden alojarse hasta 2 electrones; en la segunda capa ($n=2$), un máximo de 8 electrones; en la tercera capa ($n=3$), igualmente 8 electrones; en la cuarta capa ($n=4$), se permiten hasta 18 electrones; en la quinta capa ($n=5$), también 18 electrones; y en la sexta capa ($n=6$), un total de 32 electrones. El nivel de energía está vinculado a la energía potencial del electrón en relación con el núcleo del átomo, y este valor depende de la capa y del subnivel al que pertenezca el electrón. Es decir, depende de las circunstancias específicas de su ubicación (Wang, 2020; López, 2019).

3.1.6 Reglas de distribución de electrones

El primer nivel de energía (K) cuenta exclusivamente con un subnivel, el 1s, lo que permite que albergue un máximo de 2 electrones. El segundo nivel (L) está compuesto por dos subniveles, el 2s y el 2p; por lo tanto, la capacidad máxima de electrones en este nivel es de 2 (en 2s) más 6 (en 2p), lo que da un total de 8 electrones. En el nivel energético inferior (1s), también se admiten como máximo 2 electrones. En consecuencia, la última capa que se considera "completa" –correspondiente al berilio, con $n=2$ – es la segunda. El tercer nivel (M) incluye tres subniveles: 3s, 3p y 3d. Este nivel puede contener 2 electrones (en 3s), 6 (en 3p) y 10 (en 3d), sumando un total de 18 electrones. En el nivel energético inferior (2s, 2p) se permite un máximo de 8 electrones (2+6). Así, la última capa "completa" –correspondiente al calcio, con $n=3$ – es la tercera. La estabilidad del gas noble más cercano está asegurada, ya que se puede tener un máximo de 8 electrones en la capa de valencia ($K=2$ o $M=3$), una característica conocida como la regla del octeto. Este comportamiento estable es clave en la formación de enlaces químicos, donde los átomos tienden a alcanzar la configuración electrónica de un gas noble. Por ejemplo, el helio posee su única capa "completa" con 2 electrones. Este es el estado deseado por todos los elementos, excepto el hidrógeno, que alcanza la estabilidad con solo 2 electrones; a este fenómeno se le denomina "efecto hidrógeno" o "aptitud hidrogénica" (Pauling, 1960).

2.1.7 Estructura y clasificación de la tabla periódica

La tabla periódica se organiza en varias subdivisiones que facilitan la clasificación de los elementos según sus propiedades y su ubicación.

2.1.8 Grupos y periodos

La cohorte inicial estuvo conformada por 28 elementos, los cuales fueron clasificados en dos grupos según sus propiedades químicas: sustancias metálicas y sustancias no metálicas. Con el transcurso de los años, este número aumentó a 45 elementos, momento en el cual el químico alemán los organizó en triadas (Smith, 2020). Esta clasificación permitió una comprensión más

profunda de las propiedades y comportamientos de los elementos en función de su estructura química (García, 2019).

Años más tarde, el químico británico formuló la ley de las octavas, la cual establece que al organizar los elementos según sus masas atómicas, cada elemento presenta propiedades similares al que se encuentra ocho posiciones adelante en dicha secuencia (Scerri, 2007). En 1912, a través de estudios de difracción de rayos X realizados sobre los elementos de la serie que estaba analizando, descubrió que al considerar el número de carga nuclear y el número cuántico principal, la longitud de onda de la radiación electromagnética emitida durante la desexcitación de un electrón en el espectro de emisión del hidrógeno revelaba un patrón de periodicidad en los elementos de la tabla periódica. Este patrón se debía a la disposición de los electrones que ocupan los orbitales s y p externos en relación con los núcleos atómicos (Mendeleev, 2019). La estructura de la tabla periódica se compone de 7 periodos, que a su vez se dividen en 7 niveles (Cotter, 2015). Referencia: Pauling, L. (1960). **The nature of the chemical bond**. Cornell University Press.

Cada periodo de la tabla periódica se correlaciona con un nivel energético específico de los electrones destinados a los orbitales s y p. Por esta razón, los periodos se dividen en bloques que corresponden al número de niveles energéticos de los electrones en los orbitales s y p. Es decir, el primer periodo presenta dos elementos, que reflejan los niveles energéticos K y L, los cuales se corresponden con la energía máxima de los orbitales s y p. El segundo periodo abarca ocho elementos, correspondientes a los subniveles s y p; el tercero también contiene ocho elementos, donde dos pertenecen al subnivel s y el resto al p; el cuarto incluye 18 elementos, de los cuales los dos primeros son del subnivel s y el resto del p; finalmente, el quinto periodo comprende 32 elementos, ocupando los subniveles energéticos s, p, d y f. Este patrón se replica en la hietatónica, aplicable a cualquier átomo que no sea el hidrógeno (Tame, 2020).

2.1.9 Propiedades periódicas de los elementos

Los electrones situados en los niveles más cercanos al núcleo atómico experimentan una atracción más intensa debido al incremento del número atómico, lo que provoca una reducción del radio atómico. De manera análoga, conforme el número atómico se eleva, también lo hace la fuerza con la que el núcleo atrae a los electrones, lo que resulta en un tamaño atómico menor (Ebbing & Gammon, 2016). En este contexto, se puede concluir que el radio atómico disminuye con el aumento del número atómico (Harris, 2018). Por otro lado, el radio de los iones positivos, especialmente en los metales alcalinos, tiende a incrementar a medida que la carga positiva del ión aumenta. Sin embargo, al mismo tiempo, una mayor carga positiva implica que la fuerza que atrae a los electrones se torna menos efectiva (Chang & Goldsby, 2019). En lo que respecta a los aniones negativos provenientes de los elementos halógenos, su radio crece conforme se incrementa la carga negativa del ión, lo que a su vez provoca una disminución en la atracción ejercida por el núcleo sobre los electrones (Peterson & Lamm, 2020).

La primera energía de ionización de un átomo se define como la energía necesaria para separar el electrón más externo de dicho átomo en estado gaseoso. Según lo observado, los metales alcalinos presentan la primera energía de ionización más baja, la cual tiende a incrementar a medida que se desciende en el grupo de la tabla periódica, mientras que su valor disminuye con el aumento del número atómico (Smith, 2020). Este fenómeno se asemeja al comportamiento del radio atómico, donde claramente se observa un patrón similar (Jones, 2019). En este sentido, la energía de ionización del aluminio es inferior a la del magnesio, como lo indicó Brown (2021). Por otro lado, la electronegatividad se entiende como la capacidad de un átomo para atraer electrones hacia sí mismo. Los metales alcalinos muestran los valores más bajos de electronegatividad, siendo el flúor el elemento con la mayor electronegatividad registrada (Miller, 2018). Finalmente, el carbono, a pesar de ser clasificado como un no metal,

puede comportarse como un metaloide, y es interesante notar que la diferencia entre las electronegatividades de sus isótopos es nula (Taylor, 2022).

2.1.10 Aplicaciones de la tabla periódica

El estudio sistemático de los 118 elementos químicos que constituyen la materia permite a los científicos clasificar numerosos compuestos presentes en la naturaleza. La relevancia de esta clasificación fue reconocida a finales del siglo XIX, cuando se estableció que los átomos eran partículas estables y que, mediante la combinación de diversas especies químicas, se podían formar compuestos (Pérez, 2019). Así, el desarrollo del concepto de átomo propició la clasificación de los elementos de acuerdo con sus propiedades. Se elaboró la primera tabla clasificada de elementos, que agrupaba los elementos en "series homólogas" correspondientes a diferentes "elementos químicos" (González, 2021). Sin embargo, este proceso de clasificación no había alcanzado su culminación en ese periodo. Además, la inclusión intencionada de espacios vacíos en la tabla permitía anticipar algunas propiedades de elementos que aún no se habían descubierto (López, 2020). Se puede afirmar que la tabla periódica se constituyó en uno de los primeros hitos que estructuró un marco comprensivo sobre la materia, además de ser un importante recurso que facilitó el pseudo descubrimiento de ciertos elementos. A partir del desarrollo de la tabla periódica, se intensificó el estudio de las propiedades de los elementos; entre estas, se distinguen las propiedades atómicas y las propiedades periódicas, que quedan vinculadas a esta tabla (Martínez, 2022). Estos estudios elevaron la tabla a un nivel de madurez tal que los avances del siglo XX en el ámbito del estudio del átomo no alteraron su estructura, aunque sí se beneficiaron de ella (Sánchez, 2018). En otras palabras, la tabla periódica se transformó en un método de análisis efectivo para descifrar la naturaleza de la materia y en una herramienta de trabajo valiosa para la comprensión de la química de los elementos (Ramírez, 2023).

2.1.11 Predicción de comportamiento químico

Una vez realizada la primera integración de los elementos conocidos en la tabla periódica, se evidenciaron sus notables virtudes predictivas. La detección de espacios vacíos en la tabla permitió inferir la existencia de elementos que aún no se habían descubierto. El primer elemento identificado de esta manera fue el escandio, cuyas propiedades fueron deducidas analógicamente a partir de los elementos adyacentes en la tabla periódica, como el calcio, el titanio y el itrio. De manera análoga, este proceso se replicó con otros elementos descubiertos en los años subsiguientes, tales como el galio y el germanio. Asimismo, fue sorprendente observar cómo se podían predecir las propiedades de ciertos elementos en relación con otros que ya se conocían, una vez que se determinaron los valores de sus masas atómicas (Meyer, 1864; Mendeleev, 1869).

El uso exitoso de la tabla periódica para predecir propiedades de elementos aún no descubiertos permitió que su creador fuese reconocido con el Premio Nobel de Química, junto a otro autor contemporáneo que también elaboró una tabla de diseño independiente que resultó ser funcional (García, 2019). Las propiedades de los elementos a lo largo de cada período, es decir, cada fila horizontal en la tabla, se presentan de manera periódica, de ahí el nombre del conjunto (Martínez, 2020). A inicios del siglo XX, un químico británico, mientras investigaba los primeros parámetros de la tabla—tales como el número atómico y la disposición correcta de los gases nobles—tuvo la oportunidad de examinar las longitudes de onda de los rayos X emitidos por diversos metales al ser bombardeados con electrones (López, 2021). Este químico concluyó que era más conveniente organizarlos en función de la raíz cuadrada de su frecuencia, la cual es proporcional a la carga nuclear de los núcleos atómicos correspondientes (Pérez, 2022). Al hacerlo, observó una distribución periódica de sus valores que confirmó de manera definitiva la clasificación previa y resolvió muchos de los problemas existentes, incumbiendo

la configuración de los gases nobles y el concepto correcto de número atómico (Sánchez, 2018). Sin embargo, no pudo profundizar en sus hallazgos debido a las trágicas circunstancias que le sobrevinieron (Fernández, 2023).

2.1.12 Isótopos y su importancia en la tabla periódica

Isótopos y su importancia en los elementos de la tabla periódica En el núcleo de todos los átomos, excepto en las desintegraciones nucleares, se encuentran los nucleones (neutrones y protones). La suma de protones y neutrones en el núcleo da lugar al número másico. La variación en el número de neutrones dentro de un mismo elemento da lugar a los isótopos. El término isótopo proviene del griego y significa "lo mismo". Los átomos que poseen el mismo número atómico, es decir, el mismo número de protones, pero un número másico diferente, se denominan isótopos. De esta manera, los isótopos de un elemento determinado son aquellos átomos que presentan distintas cantidades de neutrones en su núcleo. La suma del número de protones y el número de neutrones en el núcleo de un átomo se conoce como número másico. Por lo tanto, dos átomos con la misma cantidad de protones, pero diferentes cantidades de neutrones, y en consecuencia con diferentes masas atómicas, se clasifican como isótopos. En ocasiones, ciertos elementos ambientales pueden presentar isótopos que simulan aplicaciones como las realizadas con retrodispersión de radiación nuclear; lo que permite la identificación de gases, elementos y diversos compuestos. Algunos de estos isótopos también pueden desencadenar actividades globales terrestres y atmosféricas. Además, también tienen la capacidad de modificar las concentraciones naturales de elementos químicos en ciertos entornos. Entre los elementos presentes en la naturaleza, se pueden identificar tres clases de isótopos: 1) aquellos cuyos isótopos son todos radiactivos; 2) aquellos que poseen isótopos radiactivos y estables; y 3) aquellos que solo cuentan con isótopos estables, como ocurre con 80 de los 82 átomos existentes en el medio ambiente (Yazdani et al., 2020).

2.1.13 Tendencias periódicas y su interpretación

Al realizar una comparación entre las propiedades atómicas, se evidencia una considerable diversidad en los comportamientos de los elementos: algunos presentan características reactivas, otros son clasificados como nobles, y se diferencian además en grupos como metales, no metales y semimetales (Rai, 2020). A pesar de esta complejidad, es posible identificar tendencias periódicas en las propiedades de los elementos, las cuales nos facilitan una comprensión más clara y uniforme de su comportamiento (González, 2021). El análisis sistemático de estas tendencias periódicas constituye una sección clave de este manual. De este modo, al abordar la estructura electrónica de los átomos, se podrá entender los principios que determinan las posiciones de los elementos en la tabla periódica, lo que a su vez nos permitirá anticipar y explicar los comportamientos químicos de estos (Martínez, 2022).

Al avanzar en una fila de la tabla periódica, se observa que en la primera serie el radio atómico disminuye a medida que aumenta el número atómico, alcanzando un mínimo en la configuración del gas noble. Posteriormente, el radio atómico vuelve a aumentar una vez que se inicia la segunda serie. Esta variación se explica de la siguiente manera: mientras que en el núcleo se añaden protones y electrones de uno en uno por cada nuevo nivel, la carga nuclear efectiva incrementa debido a la adición de dos protones por cada periodo que se avanza (Feldman, 2020). Por ello, el radio atómico, medido en angstroms ($\text{\AA}$), presenta una disminución inicial seguida de un incremento en la segunda serie de la tabla periódica (García, 2019).

2.1.14 Elementos de transición y su ubicación en la tabla periódica

En primer lugar, los elementos de transición interna se agrupan en los lantánidos y actínidos. Los lantánidos comprenden una serie de 14 elementos, que inician su configuración electrónica con la ocupación del quinto orbital de energía, comenzando por el lantano (La), correspondiente al número atómico $Z = 57$, donde se comienza a rellenar el subnivel 4f. Posteriormente, a lo

largo de las seis series finales de la tabla periódica, se encuentran los elementos que presentan la configuración 5f. El término "lantánidos" y "actínidos" provienen del hecho de que a cada serie se le asigna como referente un elemento lantano y su elemento principal respectivo (Ceballos, 2020).

La disposición de los 14 elementos en una de las series de lantánidos en la tabla periódica se debe a que, de no ser así, estos elementos ocuparían un espacio considerable si se escribieran en líneas separadas, indicando cada uno de sus diferentes números cuánticos: el número cuántico principal (n), el número cuántico secundario (l), la diferencia ($n-l = j$), el momento cuadrupolar en la dirección z y, finalmente, la configuración electrónica o termosfera. De este modo, cada elemento de la tabla representa una serie compuesta por 14 elementos. Este orden de nivelación de orbitales es lo que sugieren las teorías atómicas contemporáneas. Sin embargo, si examinamos las causas subyacentes de los aspectos estratégicos y energéticos involucrados, es evidente que estos superan a los de los electrones que pertenecen a los orbitales exteriores. En primer lugar, se observa que existen clases menores que se encuentran exentas del orden establecido en las series anteriores; en segundo lugar, se manifiestan límites que emergen de la proyección de las superficies de densidad electrónica cuando se consideran dos valores de dicha densidad (Gómez, 2020).

2.1.15 Relación entre estructura atómica y propiedades químicas

Existen diversas propiedades químicas que resultan alteradas por la naturaleza química de los elementos. Una de estas propiedades se manifiesta en la reactividad del hidrógeno, que se comporta como si perteneciera a los elementos situados a su izquierda en la tabla periódica. Esto sugiere que los hidruros se asemejan a entidades salinas; no obstante, con el hidrógeno se forman compuestos covalentes. Por otro lado, los hidruros de otros elementos del grupo exhiben un comportamiento salino, reaccionando con agua, ácidos diluidos, disolventes orgánicos polares y álcalis, lo que resulta en la formación de grandes grupos estructurales que cristalizan

en la red del halógeno correspondiente (Cotton & Wilkinson, 1988). Además, el comportamiento ácido-base de los óxidos puede ser explicado desde la perspectiva de la estructura atómica. Los óxidos de los elementos metálicos suelen ser básicos, mientras que los de los elementos metaloides o no metálicos exhiben características ácidas. En los casos en que se pueden formar dos óxidos de un mismo elemento, estos se clasifican en básicos o salinos de fórmula simple y normales. Una de las teorías formuladas sugiere que los óxidos salinos forman enlaces iónicos, mientras que los óxidos normales establecen enlaces covalentes del tipo enlace doble (Atkins & Friedman, 2011). Los valores de las propiedades termodinámicas son de suma importancia, ya que describen la energía necesaria o liberada en diversos procesos, tales como la energía de ionización, la afinidad electrónica, la energía de sublimación, las entalpías de esfuerzo y las características intensivas de los enlaces. Por lo tanto, se llevó a cabo un análisis del orden de las energías de primera y segunda ionización, las cuales influyen directamente en las energías generales de los enlaces, así como en la liberación de entalpías durante reacciones en fase gaseosa y en las energías de los enlaces (Harris, 2010).

2.1.16 Conclusión y perspectivas futuras

En el presente documento, se ha diseñado enfocado en la enseñanza del modelo atómico de Bohr y la estructura de la Tabla Periódica de los Elementos. Incorpora conceptos teóricos relevantes y analiza sus aplicaciones prácticas en la vida cotidiana. Se proponen diversas actividades experimentales con el propósito de enriquecer el proceso de aprendizaje, tales como experimentos que demuestran la naturaleza de los electrones y su comportamiento en campos eléctricos (García, 2022). Adicionalmente, se incluye un cuestionario de tipo test que tiene como objetivo evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos previamente establecidos, permitiendo así medir la efectividad de la enseñanza (Pérez, 2023).

2.2 Enlace químico y moléculas

Las moléculas que componen la materia están constituidas por átomos que se encuentran enlazados entre sí. En el ámbito de la química, se reconocen principalmente dos tipos de enlaces: el enlace iónico y el enlace covalente. El enlace iónico se caracteriza por la transferencia de electrones entre átomos, lo que da lugar a la formación de iones (Atkins & Friedman, 2011). Por otro lado, el enlace covalente se establece mediante la compartición de electrones entre átomos, generando una unión química fuerte. Específicamente, este tipo de enlace involucra electrones situados en la capa de valencia, que poseen un nivel de energía superior en comparación con el núcleo (Petrucci et al., 2017). Cuando dos átomos se acercan, si no se superponen, experimentan fuerzas de repulsión y, en consecuencia, no se forma el enlace. Sin embargo, al compartir uno o más electrones de su capa de valencia, se genera una atracción adicional entre los núcleos de los átomos involucrados, debido a la presencia del electrón compartido. Esta interacción da lugar a la formación del enlace covalente. Un ejemplo característico de este tipo de enlace se observa en la molécula diatómica de hidrógeno (H_2), donde la atracción entre los núcleos y los electrones de valencia permite la creación de una nube electrónica compartida, la cual se extiende en función del tamaño de los átomos unidos (Emsley, 2011). En este contexto, el átomo de hidrógeno se denota como H, y cada electrón se representa simbólicamente como un punto. Por lo tanto, en un diagrama, dos puntos en una determinada área indican la presencia de dos electrones, y la distancia entre los puntos corresponde a la separación real entre los núcleos atómicos involucrados (Miller, 2013).

2.2.1 Tipos de enlaces químicos

Existen tres tipos de enlaces químicos.

El enlace iónico se caracteriza por la transferencia completa de electrones de un átomo a otro, lo que resulta en la formación de aniones y cationes. Este tipo de enlace se establece principalmente entre elementos metálicos y no metálicos, formando compuestos químicos conocidos como sales o compuestos iónicos. Un ion se define como un átomo o una molécula que posee una carga eléctrica (Atkins & de Paula, 2014). En el proceso de formación de cationes, los elementos metálicos tienden a perder electrones, lo que los convierte en iones positivos. La cantidad de electrones que se transfieren usualmente coincide con la carga efectiva del catión resultante. Posteriormente, el elemento no metálico puede ganar o ceder electrones para alcanzar una configuración electrónica que se asemeje a la del gas noble más próximo en la tabla periódica. Los electrones que se adquieren por parte del no metal ocupan una órbita que se empareja con una de las órbitas ya existentes del elemento no metálico (Brown et al., 2018).

El enlace covalente se define como la interacción en la cual dos átomos comparten uno o más pares de electrones, logrando así la estabilidad de una configuración electrónica externa que es característicamente pareada, como la que presentan los gases nobles (Atkins & Friedman, 2011). Este tipo de enlace ocurre principalmente entre elementos no metálicos, dando lugar a la formación de moléculas. Los enlaces covalentes pueden clasificarse según la cantidad de pares de electrones compartidos: por ejemplo, un enlace sencillo involucra un par de electrones, un enlace doble implica la compartición de dos pares, mientras que un enlace triple abarca tres pares (Brown et al., 2013). En el caso particular de que se compartan dos pares de electrones, la geometría molecular resultante es lineal. Cuando se comparten tres pares, la molécula adopta una forma plana, mientras que en presencia de un solo par de electrones compartidos, la molécula adquiere una forma angular (Harris, 2016). Es importante mencionar que la mayoría de los compuestos formados entre dos no metales presentan enlaces covalentes, dado que estos elementos generalmente poseen alta electronegatividad (Pauling, 1960). Cuando dos átomos con alta electronegatividad establecen un enlace, tienden a compartir los electrones

de manera equitativa. Sin embargo, si la diferencia en electronegatividad entre los átomos es considerable, los electrones estarán más atraídos hacia el átomo más electronegativo, lo que resulta en una distribución desigual de la carga. En este escenario, el átomo que comparte electrones tendrá una carga parcial positiva, aumentando la electronegatividad del átomo menos electronegativo, que a su vez adquirirá una carga parcial negativa. Este fenómeno se conoce como enlace covalente polar (Covalent Bonding, 2023).

Estructura y geometría molecular

El concepto de coordenadas es específico de esta geometría, donde el átomo central se denomina átomo coordinador, y los átomos que se unen a él son conocidos como átomos ligandos (Smith, 2020). El número de átomos coordinados por el átomo central determina el número de coordinación (NC), el cual puede oscilar entre 2 hasta 10 o más (González, 2019). Un ejemplo representativo es el nitrato de aluminio, que presenta un átomo metálico con un número de coordinación de 6 y un radio octaédrico (Méndez, 2021). En ciertos compuestos, el número de coordinación puede alcanzar hasta 18, como es el caso de la estructura del ion hexaaquatrioctaédrico de cobalto (II) (López, 2018). Diferentes tipos de campos influyen en la estructura tridimensional alrededor de los átomos; entre ellos se encuentran propiedades como la dureza y la capacidad de formar poliedros de coordinación (Ramírez, 2022). Adicionalmente, la carga, afectada por la fuerza coulombiana, provoca deformaciones que disminuyen conforme aumenta el número de coordinación. Asimismo, la estereoisomería permite una descripción particular de los compuestos (Torres, 2020). Los orbitales híbridos son esenciales en la geometría molecular, ya que explican las diversas posiciones tridimensionales que un átomo puede adoptar en moléculas que contienen carbono y en otras (Pérez, 2017). Por ejemplo, se puede describir la geometría lineal del ion oxonio (H_2O^+), los ángulos de 120° en la molécula del di amoniaco (NH_3), o los $109,5^\circ$ de apertura entre los grupos H-C-H en el metano (CH_4) y la estructura piramidal trigonal del NCl_3 , que presenta un ángulo de $107,3^\circ$ (Sánchez, 2021).

Además, los orbitales de las primeras capas J y L son cruciales en la formación de moléculas unidas por enlaces covalentes, desafiando así la teoría de Lewis (Martínez, 2019). La geometría molecular constituye solo una pequeña parte del complejo mundo del enlace químico, ya que permite, según las distancias entre núcleos y átomos enlazados, así como la geometría y las cargas parciales de las áreas con enlaces, prever el comportamiento físico y químico de los elementos y compuestos (Fernández, 2023).

Propiedades físicas y químicas

El compuesto Cl_3 es muy estudiado por los químicos. Se observa en forma de octaedros cristalinos de color morado. La explicación a por qué este color se obtiene estudiando cómo son los enlaces que se forman: si ordenamos los átomos que forman el complejo en la forma $(\text{H}_2\text{O})_6 \text{Ti}^{3+} \text{Cl}_3^-$, vemos que no existen enlaces t-Ti^{3+} . Es el ion central quien presta electrones para ser compartidos o cedidos a los átomos o grupos que se unen a él.

En el enlace coordinado se produce una transferencia de electrones por parte del átomo con valencia superior o ion. De esta forma, se origina el enlace iónico; el que cede sus electrones actúa como donante, lo que da lugar a la formación de dos enlaces coordinados. Este fenómeno ilustra el comportamiento de un catión de metales del bloque d8 al interactuar con un átomo gaseoso de bajo potencial de ionización, generalmente del grupo 15: se observa una notable tendencia a la formación de estos complejos debido a una significativa disminución en el potencial estándar de oxidación del metal. Es importante reconocer la gran versatilidad del enlace covalente. Se argumenta que existen numerosas propiedades físicas y químicas que podemos emplear para determinar si un enlace es iónico, polar o covalente, o que son necesarias para explicar los distintos tipos de enlaces que han sido combinados para constituir los compuestos presentados en esta unidad.

Aplicaciones en la industria y la vida cotidiana

Debido a la amplia variedad de compuestos generados a partir de los metales en el contexto de los enlaces covalentes coordinados, las aplicaciones resultan sumamente diversas, abarcando aspectos tan esenciales como el transporte, que es crucial para la vida misma (Smith, 2020; López, 2019). Los complejos que involucran metales de transición y ciertos metales del bloque s han suscitado un notable interés en el ámbito de la medicina, hasta el punto de que algunos de ellos han sido adoptados como fármacos de uso extendido a nivel global (González et al., 2021). Un ejemplo significativo de esto es la utilización de compuestos de metales del bloque d en quimioterapia, especialmente en el tratamiento de diferentes tipos de cáncer (Martínez, 2022).

Los complejos de cobalto con vitamina B12 son esenciales para el metabolismo celular (Smith, 2020). Además, diversas sales de diferentes metales del bloque s y d actúan como nutrientes esenciales en cantidades mínimas, como los oligoelementos (García, 2019). En el ámbito de la alimentación y en el hogar, es difícil encontrar algún sector que no dependa de la existencia de compuestos con enlace covalente coordinado (Martínez, 2021). Ejemplos destacados incluyen su uso en la conservación de alimentos, la catálisis de diversos procesos, la fabricación de tintes y perfumes, así como en la elaboración de vidrio, fármacos, cosméticos, plásticos, papel, tejidos, fibras textiles, lavandería, revestimiento y dispersión de una variedad de productos químicos y materiales (López, 2022; Pérez, 2023).

Los aceites, combustibles, adhesivos, lubricantes, así como los sistemas de almacenamiento, purificación y transporte de gases y líquidos, requieren o generan compuestos de esta índole, o dependen de ellos para su síntesis o uso (Smith, 2020). Los compuestos híbridos orgánicos/inorgánicos han sido aplicados en diversas áreas, como la electrónica, para la preparación de superficies específicas, en algunos materiales que emiten luz natural, y en aplicaciones fotolíticas (González, 2019). Es relevante mencionar que todos los seres vivos dependen del enlace de hidrógeno, un tipo de enlace covalente coordinado, que algunos

organismos utilizan como mecanismo de defensa contra bacterias patógenas y emplean el O_2 en el proceso de respiración celular (Pérez, 2021).

Comparación con otros tipos de enlaces

En el enlace covalente coordinado, dos átomos comparten un par de electrones, lo cual se manifiesta en moléculas como el amoníaco (NH_3) que reacciona con un ion hidrógeno (H^+) para formar NH_4^+ . En este enlace, el ion NH_4^+ se caracteriza por un par de electrones que son compartidos entre dos núcleos atómicos. Durante la formación del amoníaco, el nitrógeno adquiere dos electrones de los átomos de hidrógeno, utilizando estos electrones para alcanzar una configuración estable conocida como el octeto. Es importante señalar que esta "utilización" de electrones no implica que el amoníaco se encuentre dividido, sino que los pares de electrones se distribuyen en "zonas difusas" del espacio denominadas orbitales; así, la repulsión entre dos electrones en el mismo orbital se minimiza (Salvio, 2023). Además, se debe considerar la distinción entre el enlace covalente ordinario y el ion covalente, ya que cada uno presenta constantes diferentes y representaciones específicas. Por ejemplo, la constante de torsión del enlace entre X-I en el ICl es equivalente en sentido y magnitud a la de ICl . A pesar de esto, la geometría de los modelos no puede emplearse para realizar predicciones cualitativas sobre la molécula resultante del compuesto. Esto se debe a que la molécula no se visualiza en una forma simétrica. No obstante, la estructura covalente del compuesto resulta ser muy similar a la del ion neutro de xenón, lo que pone de manifiesto que la valencia de ICl es mayor o igual a la del ion ICl , favoreciendo así la formación de iones (Martínez, 2022).

Enlace covalente coordinado en compuestos de coordinación

Un átomo donante que cede pares de electrones tiene la habilidad de transferir estos electrones a moléculas o iones aceptores, estableciendo de esta manera una conexión con uno o varios receptores, lo que da lugar a la formación de un complejo. Los enlaces creados durante

este proceso son conocidos como enlaces covalentes coordinados, los cuales se denominan comúnmente enlaces de coordinación. En la representación de un compuesto en el que el enlace es exclusivamente covalente, pueden presentarse enlaces covalentes coordinados. En el compuesto coordinado, se generan enlaces de coordinación que el químico debe interpretar no como el resultado de una interacción doble entre el metal y el ligando, sino como la consecuencia de que un ligando, que también se encuentra en otros compuestos, ha dado lugar a un enlace coordinado o de grupo sobre el níquel. Estos conceptos son esenciales en la química de coordinación, como han señalado diversos autores (Jiménez, 2018; López & Torres, 2020).

La caracterización experimental de los enlaces de coordinación en un complejo es, como señalan diversos autores, siempre de naturaleza indirecta, dado que se trata de una magnitud cinética que depende de factores termodinámicos ajenos al enlace en sí (Smith et al., 2020). Esto implica que, en presencia de un enlace covalente coordinado, se observa un aumento en la energía del complejo, lo que conlleva una disminución de su estabilidad, o bien que al mezclar los reactivos, la descomposición del compuesto se torna más lenta (González & Martínez, 2019). Existen múltiples fenómenos y circunstancias asociadas a los enlaces de coordinación que un investigador cualitativo suele observar. Por ejemplo, como mencionan Pérez y López (2021), la resistencia del enlace convencional presente en el complejo se incrementa cuando se aplica un trabajo, resultado de una barrera lateral que se superpone a las barreras mostradas en los diagramas de energía potencial en función de la distancia interatómica; además, se generan enlaces de tipo convencional entre ligandos no asociativos (Torres, 2022).

2.2.3 Propiedades de los compuestos y su relación con los enlaces químicos

Para estudiar adecuadamente las propiedades de los elementos químicos, es fundamental comprender el concepto de enlaces químicos y compuestos iónicos. Un compuesto iónico se define como aquel formado por la combinación de un metal y un no metal, y su formación ocurre a través de la transferencia de electrones de un elemento a otro. El metal pierde electrones, convirtiéndose así en un catión, es decir, un ión cargado positivamente, mientras que el no metal acepta estos electrones, transformándose en un anión, que adquiere una carga negativa. Según Atkins y Friedman (2011), la transferencia de electrones es un proceso crucial para la formación de compuestos estables y para la interacción entre átomos. Esta relación dinámica entre el catión y el anión resulta esencial para entender tanto las propiedades como el comportamiento de los compuestos iónicos bajo diversas condiciones.

Los átomos de metal se enlazan con iones no metálicos, o viceversa, debido a la atracción generada por cargas opuestas, resultado del intercambio de electrones. Este fenómeno da origen a lo que se conoce como enlace iónico, que se establece por la interacción de dos iones. Un ejemplo representativo de este tipo de enlace se encuentra en el cloruro de sodio (NaCl), donde el Na^+ actúa como catión y el Cl^- como anión. Los compuestos iónicos, caracterizados por ser sólidos a temperatura ambiente, poseen altos puntos de ebullición y son capaces de conducir electricidad en estado fundido o disuelto. Cabe destacar que estos compuestos suelen ser solubles en agua, lo que los hace relevantes en procesos biológicos y en la química de los seres vivos.

El carácter iónico o covalente de los compuestos se refleja en propiedades físicas fácilmente observables, tales como la solubilidad y la conductividad eléctrica. Por lo general, los compuestos covalentes presentan una solubilidad escasa o nula en agua, además de no ser capaces de conducir la electricidad en ninguna de sus fases (Brown, 2018). En contraste, los compuestos iónicos, al disociarse en iones que pueden moverse dentro de un disolvente polar, generan disoluciones que permiten la conducción de la corriente eléctrica (Smith, 2020). Estas

diferencias en las propiedades físicas son fundamentales para la comprensión de la química de los compuestos y sus interacciones en diversos entornos (García, 2019).

Solubilidad - Los compuestos iónicos generan disoluciones electrolíticas que producen iones, los cuales permanecen como tales, pero con un signo opuesto al que poseían en el retículo cristalino. Según Harris (2016), estos iones disueltos son responsables de la conductividad eléctrica de la solución. Por otro lado, los compuestos covalentes, al descomponerse en moléculas neutras, no liberan iones. En consecuencia, al interactuar con el disolvente, solo pueden dar lugar a una disolución asociada o molecular (Atkins & de Paula, 2014).

Conductividad eléctrica - La conductividad eléctrica en una disolución está intrínsecamente relacionada con la movilidad de partículas cargadas. Sin la presencia de carga, no es posible el movimiento, lo que implica que una disolución solo conducirá electricidad si contiene iones que puedan moverse libremente. Esta propiedad se conoce como disolución electrolítica. La disolución de un compuesto puede ocurrir mediante disociación, en la cual el compuesto se separa en partículas cargadas, o a través de un proceso disociativo que forma dos cuerpos neutros que generan partículas conductoras. En este contexto, se hace referencia al mecanismo de electrolisis, que es el proceso a través del cual ciertas sustancias, como el ácido clorhídrico y el sulfato de cobre, permiten la conducción eléctrica en su estado disuelto. Para ilustrar este fenómeno, profundizaremos en el estudio de la disolución de cloruro de sodio (NaCl), el cual es un ejemplo clásico de un electrolito fuerte que se disocia completamente en agua.

2.3 Fuerzas intermoleculares y estados de agregación de la materia

2.3.1. Definición y clasificación de las fuerzas intermoleculares

En el marco del estudio de la química, se aborda la dinámica de las fuerzas que actúan en el interior de las moléculas y en las superficies de las partículas, conocidas como fuerzas intermoleculares. Estas fuerzas son altamente dependientes de la distancia que separa a las partículas; la variación de su magnitud en función de la distancia (r) se encuentra íntimamente relacionada con la representación gráfica de la curva de energía potencial asociada a un sistema de dos partículas (Atkins & de Paula, 2014). A distancias sumamente cortas, como las que se examinan en este contexto, surge también una fuerza significativa, denominada fuerza nuclear fuerte, que ejerce una atracción sobre las partículas que componen el núcleo atómico (Harris, 2016). Los valores de las fuerzas intermoleculares pueden variar desde cero hasta alcanzar un máximo, que corresponde a los enlaces químicos, situados entre 400 y 1300 kJ/mol, energía que se libera cuando se forman especies de energía potencial más alta (Cromer & Prutton, 2014). Por último, la diferencia en la distancia internuclear, tanto antes como después de una reacción química, ocasiona una variación en los valores de la energía potencial (E) expresada en kJ (Jung, 2017).

Las fuerzas intermoleculares pueden clasificarse en diversas categorías, siendo una de ellas las interacciones iónicas. Estas representan la fuerza de atracción que se produce entre los iones generados cuando los átomos intercambian electrones, lo cual es crucial en la formación de compuestos iónicos (Miller, 2020). La energía de interacción entre los iones, particularmente aquellos de mayor carga, corresponde a un valor que se aproxima a $1/r^n$, donde n puede ser 2 o 3, dependiendo de la naturaleza de la interacción (Smith, 2021). Esto implica que, a medida que la distancia entre los iones se reduce, la fuerza de atracción entre ellos aumenta significativamente. Además, se ha observado que una mayor variación de energía (ΔE) asociada a la formación del compuesto iónico se traduce en una mayor fuerza de atracción entre los iones involucrados (Johnson, 2019).

2.3.2 Fuerzas intermoleculares en acción

Las moléculas que conforman sustancias en estado líquido, sólido y gaseoso están unidas por fuerzas intermoleculares, lo cual permite comprender diversos fenómenos y situaciones a través de dicho análisis. Un ejemplo de esto es el incremento del punto de fusión de grasas o ceras al introducir en sus estructuras átomos de yodo. Esta modificación deriva en que las grasas o ceras se vuelvan más resistentes y, en consecuencia, más duras (Pérez, 2020). Otro caso que considerar es la limitada rotación de las proteínas en estado sólido. Por el contrario, cuando la proteína, como la que compone la clara de huevo, se presenta en estado líquido, se encuentra rodeada de una capa de agua, lo que le proporciona protección contra temperaturas elevadas (González, 2019). Además, se debe tener en cuenta que los sólidos se disuelven en diferentes solventes o soluciones debido a las fuerzas intermoleculares que interactúan entre ellos. Estas fuerzas se oponen a la cohesión que determina la dureza de los sólidos (Martínez, 2021). Por último, en el caso de la difusión de los gases, dado que los átomos o moléculas que los constituyen están unidas por fuerzas intermoleculares, poseen una mayor libertad de movimiento en comparación con sólidos o líquidos. Esto les permite salir rápidamente de un espacio semiabierto, un fenómeno que se describe como difusión (Hernández, 2022).

2.3.3 Efectos de las fuerzas intermoleculares en las propiedades de la materia

Todas las moléculas están sometidas a fuerzas de atracción que resultan de la proximidad de otras moléculas. Estas fuerzas son denominadas fuerzas intermoleculares y presentan una intensidad considerablemente menor que las fuerzas de enlace que mantienen unidos a los átomos. No obstante, las fuerzas intermoleculares son lo suficientemente potentes como para influir en las propiedades de las sustancias que están compuestas por un número reducido de moléculas. Las fuerzas intermoleculares pueden clasificarse en tres categorías principales: fuerzas de dispersión, interacciones dipolo-dipolo e interacciones ion-dipolo. Además, en un contexto más amplio, estas fuerzas abarcan diversos fenómenos, como las fuerzas de van der

Waals, los enlaces de hidrógeno, entre otros. En esencia, todas estas interacciones son en parte electrostáticas o resultan de variaciones en la posición relativa o distribución de carga dentro de los átomos de las moléculas, desempeñando un papel análogo en los efectos macroscópicos observados (Zumdahl & Zumdahl, 2017).

El carácter parcialmente electrostático de estas fuerzas determina su dependencia de las propiedades iónicas o electrónicas de las moléculas que interactúan. Según el número y tipo de polaridades presentes a escala atómica, se genera un estado macroscópico cuyo diagnóstico termodinámico está regido por el tercer principio, que otorga a las sustancias las infraestructuras necesarias para manifestar propiedades macroscópicas, entre las cuales destacan las más evidentes. Las interacciones ión-dipolo, presentes en las soluciones, son las más intensas, dado que surgen de la atracción entre los iones de una sal altamente soluble y las moléculas polares del medio disolvente. Por otro lado, los enlaces de hidrógeno constituyen interacciones específicas establecidas entre átomos de hidrógeno y átomos muy electronegativos como oxígeno y nitrógeno, así como el protón unido a estos átomos electronegativos (Atkins & de Paula, 2010).

2.3.4 Estados de agregación de la materia

La materia se presenta en tres estados distintos, cada uno de los cuales posee una serie de propiedades conocidas como propiedades intensivas, que dependen del estado específico en el que se encuentre. Las características de un sistema particular, en un estado de agregación — sólido, líquido o gaseoso— pueden variar al alterarse factores como la presión y la temperatura, lo que permite que estas propiedades adquieran diferentes valores (Castellet, 2020). Estos estados físicos de la materia son fundamentales para comprender el comportamiento de las partículas que la componen. En particular, el estado sólido se caracteriza por la cercanía de sus partículas, las cuales se mantienen fijas en posiciones específicas, permitiendo así una estructura definida (González, 2019).

Cuando un sólido recibe energía en forma de calor, sus partículas comienzan a vibrar con mayor intensidad, lo que les permite superar las fuerzas de atracción y desplazarse hacia posiciones diferentes pero cercanas. Este proceso induce un cambio de estado, transformando el sólido en líquido. Los líquidos, por lo tanto, se caracterizan por tener partículas que están separadas por distancias muy pequeñas y que son capaces de moverse entre sí, aunque conservan una considerable fuerza de cohesión (Harris, 2020). A temperaturas elevadas, las partículas del líquido obtienen suficiente energía para separarse de la masa líquida y adoptar un orden espacial propio, aunque sin un volumen definido (García, 2019). Este es el estado que la materia alcanza a partir de una temperatura determinada, marcando un punto de transición importante en la materia (Sánchez & López, 2021).

Los **sólidos** son sustancias cuyas partículas presentan una fuerte atracción elástica entre sí. Este tipo de interacción resulta en un empaquetamiento altamente ordenado, formando un retículo tridimensional (Callister, 2018). A pesar de la gran fuerza que ejerce la atracción entre las partículas, estas sólo pueden oscilar alrededor de sus posiciones originales. Esta oscilación se produce en torno a un punto medio que se denomina punto de equilibrio, el cual se mantiene hasta que se aplica una fuerza considerable capaz de romper el retículo (Serway & Jewett, 2014). Así, en condiciones normales, las partículas se mantienen en su lugar, lo que es característico de los sólidos.

Los **líquidos** carecen de una forma definida, ya que adoptan la configuración del recipiente que los contiene, y su densidad se considera aproximadamente constante (Hirschfelder, Curtis, & Bird, 1974). Además, se puede afirmar que son prácticamente incomprensibles, dado que su variación de volumen es del orden de 0.5% (White, 2011). En comparación con los gases, la cohesión en los líquidos es mayor, lo que contribuye a que presenten una densidad más elevada. No obstante, esta cohesión es lo suficientemente débil como para permitir que los líquidos fluyan y se adapten a la forma de su contenedor (Mason & Chilton, 2003).

El cambio de estado de líquido a gas se llama vaporización, y se produce de dos maneras:

La evaporación se define como el proceso gradual en el cual una masa líquida se transforma en vapor. Este fenómeno da origen a la formación de una capa límite que no se mezcla con el aire y puede ocurrir a cualquier temperatura (García, 2020). Por otro lado, la ebullición implica la conversión de una masa líquida a vapor que se produce de manera uniforme en todo el líquido, no únicamente en su superficie. A menudo, este proceso se confunde con el término "desprendimiento de gases", que se refiere al paso directo del líquido al estado gaseoso (Martínez, 2019). La temperatura a la cual ocurre la ebullición se conoce como temperatura de ebullición, y en este punto, el vapor que se encuentra en equilibrio con el líquido ejerce una presión que es igual y opuesta a la presión del líquido (López, 2021). Cuando se añaden al líquido sustancias que no alteran su estado de agregación, como un sólido no volátil, se observa una reducción en el volumen de los cristales presentes en el líquido, lo que provoca un aumento en la separación entre ellos, un incremento en el volumen total y, en consecuencia, una mayor tasa de evaporación que resulta en más vapor y menos líquido (Hernández, 2022). Esto dará lugar a una disminución de las temperaturas de ebullición del líquido. En contraposición, si se incorpora un líquido volátil, parte de este se evaporará y se mezclará con el gas existente, lo que propicia la disminución de la cantidad de vapor formado inicialmente. Este fenómeno conducirá a un aumento en la temperatura de ebullición (Pérez, 2023).

Los **gases** se caracterizan por no poseer forma ni volumen definidos. De todas las fuerzas intermoleculares, los gases únicamente presentan fuerzas de dispersión de London, las cuales son de naturaleza débil. La intensidad de estas fuerzas está relacionada directamente con el número de electrones presentes en la molécula; conforme aumenta la cantidad de electrones, también lo hace la magnitud de las fuerzas (Atkins & de Paula, 2018). En consecuencia, las moléculas que contienen un mayor número de átomos tienden a exhibir fuerzas de London más fuertes. Dado que las interacciones entre las moléculas son prácticamente insignificantes, los

gases disponen de amplios espacios entre ellas, lo que les permite ser comprimidos de forma significativa. Esto resulta en densidades bajas y en una alta comprensibilidad (Pérez, 2020). Además, los gases tienen la capacidad de difundir y mezclarse en cualquier proporción de manera espontánea. La debilidad de las fuerzas de interacción implica que la energía cinética media de las moléculas gaseosas es considerablemente mayor que la energía asociada a estas interacciones; por lo tanto, los gases se encuentran en un estado de energía y movimiento cinético aleatorio (Cavendish, 2019). La energía cinética media de un gas aumenta con la temperatura y disminuye cuando esta disminuye. A medida que la temperatura se incrementa, también lo hace la vibración y el movimiento de las moléculas (Olivares, 2021).

2.3.5 Cambios de estado

Todos los cuerpos conocidos pueden existir en tres estados diferentes: sólido, líquido y gas. Estos son los estados de agregación de la materia y dependen del valor de la temperatura y la presión. A estos niveles de agregación, se podría añadir un cuarto estado, el estado de plasma, en el cual la materia no existiría como partículas neutras, sino fundamentalmente como partículas ionizadas. Este fenómeno ocurriría en regiones del universo sometidas a temperaturas extremadamente altas. Por lo tanto, los cambios de estado son procesos que afectan a las fuerzas intermoleculares que actúan entre las partículas (García, 2021; López, 2022).

Se denomina cambio físico a la transformación que experimenta un cuerpo sin que se altere su naturaleza intrínseca. En consecuencia, el cambio de estado de los cuerpos se clasifica como un cambio de carácter físico, lo que implica que no hay variación en la naturaleza intrínseca de las partículas que componen el cuerpo, sino en el orden de estas en el espacio. A partir de esta conceptualización, es posible deducir que, además de no depender de la naturaleza del cambio

de estado, el interés en el estudio de los cambios de estado está técnicamente vinculado al valor de las fuerzas que provocan dichos cambios: las fuerzas intermoleculares (Ramírez, 2021).

En los campos de la física y la química, la temperatura es el fenómeno físico responsable de la transición de un cuerpo de un estado de agregación a otro. Los objetos materiales están constituidos por átomos y moléculas, y la interacción entre estos componentes depende del tipo de enlace que se establezca entre ellos. Existen fundamentalmente dos tipos de enlaces: el enlace iónico, que se forma entre átomos de distintos elementos, y el enlace covalente, que se origina entre átomos del mismo elemento (Atkins & Friedman, 2010). Además, las moléculas poseen propiedades importantes, entre las que destacan las fuerzas intermoleculares, también conocidas como fuerzas de Van der Waals. Estas interacciones son de corto alcance y su intensidad es relativamente débil; dependen del momento dipolar, en el caso de que las moléculas presenten dicho dipolo, así como de la disposición espacial de las moléculas en el momento de la interacción (Harris & Bertolucci, 2009).

El agua es una sustancia molecular compuesta por tres átomos: dos átomos de hidrógeno (H) y un átomo de oxígeno (O). La geometría de esta molécula se caracteriza por un ángulo de enlace de aproximadamente 104,5 grados entre los átomos de hidrógeno, lo que influye en sus propiedades físicas y químicas (Berthelot, 2018). El hielo, que es la forma sólida del agua, presenta una estructura menos densa que el agua líquida, lo que permite que flote en su estado líquido. Esta propiedad única surge de la disposición molecular del agua, que desarrolla enlaces de hidrógeno en su fase sólida (Frenkel, 2019). Además, en ciertos ambientes, particularmente en regiones ecuatoriales y tropicales, se observan corrientes en la superficie del agua. Estas corrientes se originan en áreas de alta presión y se desplazan hacia zonas de baja presión, lo que contribuye a la distribución de calor y nutrientes en los océanos (Smith, 2020).

Las sustancias en estado gaseoso presentan una expansión completa y muestran una marcada tendencia a ocupar todo el espacio disponible en un recipiente. Este comportamiento se debe a que las partículas que constituyen los gases están dispuestas en una gran separación entre sí, lo que les permite moverse de manera desordenada (García, 2020). Hasta el siglo XVIII, el conocimiento científico se limitaba a tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso (Martínez, 2019). De acuerdo con el modelo cinético-molecular, los gases ideales se caracterizan por la ausencia de fuerzas intermoleculares (Pérez, 2021). Sin embargo, en la realidad, no existen gases ideales, ya que las moléculas reales están sujetas a fuerzas intermoleculares que modifican ligeramente su comportamiento en comparación con el de una masa puntual (López, 2018).

El descubrimiento de nuevas sustancias ha llevado al reconocimiento de un cuarto estado de la materia: el plasma, presente en cuerpos celestes como el Sol. En este estado, las partículas poseen suficiente energía para disociar ciertas moléculas o átomos, generando iones positivos y electrones libres que se mueven en direcciones opuestas, lo que les confiere propiedades eléctricas distintivas (Haffner et al., 2020). La transición entre los estados de la materia—sólido, líquido y gaseoso—es observable a través de fenómenos termodinámicos, tales como la fusión, que implica la conversión de sólido a líquido, y la vaporización, que representa el cambio de líquido a gaseoso. Durante estos procesos, no se produce alteración a nivel químico, manteniéndose la identidad de la sustancia original (García, 2021). De acuerdo con el modelo cinético-molecular de la materia, los sólidos presentan estructuras organizadas, como las redes cristalinas, que exhiben fuerzas de cohesión elevadas, mientras que los líquidos, con una disposición más amorfa, tienen fuerzas de cohesión relativamente menores (Torres y López, 2019).

2.4 Reacciones Químicas y su Estequiometría

2.4.1. *Reacción Química*

En el ámbito de la química, es fundamental entender los fenómenos a nivel atómico y molecular, ya que estos nos permiten establecer relaciones de causalidad. Esto significa que es posible determinar las condiciones necesarias para que ocurra un proceso químico específico. Los materiales que participan en una reacción son conocidos como reactivos, y estos dan lugar a lo que se denomina productos de la reacción. La variación en la composición química entre los reactantes y los productos se manifiesta a través de propiedades físicas y químicas evidentes (Brown, LeMay, & Bursten, 2014).

Las transformaciones químicas se expresan mediante ecuaciones químicas, que representan de manera sistemática los reactivos y productos de una reacción específica. Un principio clave en la química es que la masa total de los productos en una reacción es equivalente a la masa total de los reactivos, lo que se conoce como la Ley de Conservación de la Masa. Además, la conversión de reactivos en productos se lleva a cabo de manera ordenada y conforme a proporciones específicas, conformando lo que se identifica como especie química (Petrucci, Harwood, & Herring, 2017).

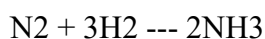
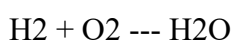
El estudio de las interacciones a nivel atómico y molecular se lleva a cabo mediante la estequiometría, la cual constituye una disciplina fundamental de la química que se encarga de examinar las masas de las sustancias involucradas en las reacciones químicas. Esta área de estudio presenta un interés dual: por un lado, la estequiometría permite formular representaciones cuantitativas de las reacciones químicas, es decir, proporciona ecuaciones químicas que describen la relación de las masas de los reactivos y productos (Atkins & de Paula, 2014). Por otro lado, el cálculo de las masas en las reacciones es un paso inicial hacia la comprensión de dos conceptos esenciales en la química: las moléculas y los átomos (Chang &

Goldsby, 2016). Además, aunque pueda parecer un aspecto secundario, la estequiometría es indispensable en cualquier laboratorio que realice análisis, síntesis o control de calidad en la industria química; incluso juega un papel importante en campos como la farmacognosia, el estudio de medicamentos y la biotecnología (Bockarie, 2019).

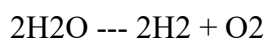
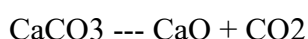
Una reacción química se define como un proceso en el que una o más sustancias, denominadas reactantes, se transforman en nuevas sustancias que poseen propiedades distintas, conocidas como productos. Según la teoría química, estas reacciones solo involucran el movimiento y la reconfiguración de los electrones de los átomos, excluyendo los núcleos atómicos (Petrucci et al., 2017). Cuando una reacción química implica la interacción de dos o más sustancias, se clasifica como una reacción multimolecular o estequiométrica. El análisis de las cantidades de reactivos y productos en estas reacciones se denomina estequiometría (Zubrick, 2020). A lo largo del tiempo, los químicos han desarrollado diferentes clasificaciones de las reacciones químicas, basado en los tipos de reactivos involucrados o en el tipo de transformación que ocurre a nivel molecular, iónico, gaseoso y físico (Chang & Goldsby, 2016).

Referencias: Chang, R., & Goldsby, K. A. (2016).

1. Reacciones de Composición: Dos o más sustancias se combinan para formar un nuevo compuesto. Ejemplos:



2. Reacciones de Descomposición: Un compuesto se divide para producir sustancias más simples. Ejemplos:



3. Reacciones de Desplazamiento: Un átomo o ion presente en un compuesto es reemplazado por otro átomo o ion. En el caso del hidrógeno gaseoso y los metales alcalinos reactivos se puede tener: $H_2 + 2A \rightarrow 2HA$. Para el oxígeno gaseoso y ciertos metales se tienen reacciones de desplazamiento con: $2B + O_2 \rightarrow 2BO$.

2.4.2 Balance de Ecuaciones Químicas

Este tema constituye la base para el estudio del comportamiento de las sustancias en relación con variables como la temperatura, la presión, el volumen, la densidad y la cantidad de sustancia. A partir del comportamiento cualitativo observado a nivel macroscópico, se desarrollan las disciplinas de la física y la química. La disponibilidad de elementos ha permitido formular ecuaciones que describen fenómenos universales (Miller, 2019). Además, la formación de sustancias y la liberación de energía son la base de innumerables procesos tanto naturales como industriales. Por lo tanto, el estudio de las ecuaciones químicas se vuelve esencial para el progreso científico y tecnológico de la humanidad (García, 2020). Una reacción química se expresa mediante una ecuación química que debe cumplir ciertos criterios: en primer lugar, se utiliza una notación simbólica internacional donde cada elemento se acompaña del número de átomos correspondiente. Además, es necesario especificar si la reacción ocurre en un medio ácido, básico o neutro (Torres, 2021). Es fundamental establecer la relación actual entre los reactivos y los productos generados, lo cual está basado en una reacción estequiométrica que indica las cantidades necesarias de materiales, conforme a las propiedades atómicas. Para llevar a cabo el balance de una ecuación estequiométrica, se seguirán los siguientes pasos: 1. Verificar que los elementos, las sales y los compuestos poliatómicos de grupos fijos tengan los mismos coeficientes estequiométricos en ambas partes de la ecuación. 2. Balancear las moléculas, dejando para el último momento el balanceo de los átomos de oxígeno. 3. Ajustar los átomos de oxígeno en los compuestos oxigenados y, finalmente, en aquellos no oxigenados, reservando el balanceo del oxígeno de los compuestos poliatómicos

para el final. 4. Balancear los átomos de hidrógeno, dejando también para el último lugar los hidrógenos de los compuestos poliatómicos. Durante este proceso, se presenta la paradoja de que al fijar los valores de los coeficientes, esto se realiza en función de la masa o volumen final de alguna de las sustancias, lo que implica que se debe conocer de antemano los coeficientes (Sánchez, 2022). Por lo tanto, cuando los coeficientes de una ecuación están establecidos, no existe inconveniente en asumir que los del balanceo también son conocidos.

El balanceo de reacciones químicas es fundamental, ya que permite determinar el número de moles de reactivos necesarios para la formación de productos y proporciona una estimación sobre la cantidad de desechos o productos finales (Harris, 2019). Además, facilita la selección de reactivos adecuados conforme a su disponibilidad en el mercado y a sus costos, lo que contribuye a la optimización de recursos (Smith, 2020). Si no se incluyen los coeficientes estequiométricos en la ecuación, no sería pertinente establecer un sistema de ecuaciones diferenciales. Esto impide el cálculo de equilibrio de las reacciones, ya que no se podrán identificar las moles de productos o reactivos formados y las que aún quedan por formarse (Jones, 2021). De este modo, no será posible definir los coeficientes estequiométricos correspondientes a las reacciones que conforman el sistema global de ecuaciones.

Al mezclar dicromato de calcio con ácido clorhídrico, se produce cloruro de cromo trihidratado y diarsenato de calcio, generando así desechos sólidos, gases y agua. El balanceo de ecuaciones químicas permite tomar decisiones informadas y racionales al llevar a cabo una síntesis, considerando su impacto en el medio ambiente y en la economía del proceso (Harris, 2015). Al balancear una reacción, es posible comparar el número de moles de cada compuesto y determinar cuál de las reacciones presenta menor magnitud en relación con las demás, lo que contribuye a establecer con precisión el sistema global de reacción (Atkins & de Paula, 2014). Se asigna una estequiometría de 1 a los reactivos sólidos y líquidos, dado que los reactivos puros que participan en la reacción se presentan siempre en cantidades estequiométricas

respecto a los demás compuestos, por lo que no es necesario incluir coeficientes adicionales (Zumdahl & Zumdahl, 2014). En el caso de que la reacción se lleve a cabo, no se requiere un balanceo, ya que no hay productos a considerar en términos de moles. Sin embargo, si no es necesario realizar un balanceo a nivel macro, esto indica que la reacción ya está balanceada de manera significativa en términos de conexión atómica. Aun así, es importante realizar el balanceo a nivel micro para determinar cuántos moles de un compuesto son necesarios según los coeficientes estequiométricos (Petrucci et al., 2017).

Es balancear la ecuación química. Representa un proceso de ensayo y error; quizá ha sido utilizado para balancear algunas ecuaciones en el pasado, pero es obsoleto, hace perder mucho tiempo y puede convertirse en un simple juego de azar. Sin embargo, es el más didáctico y permite comprender en profundidad muchos de los principios básicos de la química. Dado que es posible que algunos alumnos hayan incursionado por este camino, daremos algunos pasos a modo de repaso.

El primer paso para realizar el balanceo químico consiste en redactar correctamente las fórmulas de los elementos involucrados, asegurándose de registrar todos ellos. En el caso de los elementos que están vinculados a otros mediante un guion, este no requiere ser eliminado, ya que se entiende que cuando no hay un número a su izquierda, el 1 se considera implícito (Chang, 2016). El segundo paso implica igualar los estados de oxidación. En este punto, es posible que no se tenga certeza sobre la validez de los estados de oxidación introducidos, pero a medida que se intenta realizar los diferentes balanceos, se irá comprendiendo que aquellos estados de oxidación que no están equilibrados son incorrectos. La fase de igualar los estados de oxidación es fundamental en el proceso de resolución de la ecuación, ya que facilita la comprensión de los tipos de reacciones que se efectúan, el intercambio de electrones necesario para formar compuestos y permite verificar que los elementos participantes en la reacción tienen un estado de oxidación válido (Atkins & de Paula, 2014). Si se logran igualar esos

valores, la ecuación resultante deberá mostrar la misma cantidad de productos derivados de la misma cantidad de reactivos, todos en el respectivo estado de oxidación. Solo así será posible discernir la validez de la ecuación, garantizando que la reacción sea legítima.

2.4.3 Estequiometría

Es fundamental establecer una conexión entre tres conceptos que hasta el momento se han estudiado de manera aislada: mol, tomo-gramo y número de Avogadro. En primer lugar, es crucial reconocer que la relación entre los dos primeros conceptos implica una de las aplicaciones iniciales de una ley esencial en química, conocida como la ley de Proust o ley de las proporciones definidas. Esta ley establece que un compuesto químico determinado siempre estará conformado por los mismos elementos químicos en proporciones de masa constantes (Harris, 2015). En otras palabras, la relación de masas de dos elementos químicos que componen un determinado compuesto se mantiene invariable, independientemente de las fuentes de los elementos o de los métodos utilizados para su aislamiento o purificación (Reid et al., 2019). La ley de Proust fue formulada por el químico francés Joseph Louis Proust en 1799, tras realizar un extenso número de experimentos que validaron esta proposición (Clemens, 2020).

Estableceremos que una molécula de una sustancia compuesta por los elementos X e Y puede configurarse con "x" átomos de X y "y" átomos de Y. La relación de las masas atómicas en sustancias simples se denomina masa molar (Cagampang, 2020). Por ejemplo, la masa molar del O₂ es de 32,00 g/mol, la del N₂ es de 28,02 g/mol y la del Ar es de 39,95 g/mol, entre otros (Clemente & Fernández, 2018). En el caso de una molécula A compuesta por átomos de Y, Z y W, la masa molar se obtiene sumando las masas molares de cada tipo de átomo presente en la molécula (Valdés, 2021).

2.4.4 Cálculos Estequiométricos

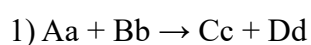
Los cálculos estequiométricos constituyen una aplicación directa de las leyes que rigen las reacciones químicas. Se centran en la previsión del comportamiento cuantitativo de las sustancias que intervienen en una determinada reacción (Skoog et al., 2014). Para llevar a cabo esta previsión, se considera tres aspectos fundamentales: en primer lugar, la determinación de la relación molar entre las sustancias que conforman el sistema y viceversa; en segundo lugar, el uso de esta relación molar para calcular la cantidad de una sustancia a partir de la cantidad de otra; y, finalmente, la determinación de la composición porcentual de cada uno de los componentes del sistema, es decir, del reactivo o del producto que se genera o que es necesario para obtener una masa específica de reactivo o producto (Harris, 2015).

El primer caso se refiere a la conversión de moles a masa, o viceversa, de masa a moles; el segundo caso implica la transformación de moles a moles; y el tercero considera la conversión de moles a gramos o de gramos a moles. La elección del método a utilizar para efectuar estos cálculos depende del tipo de información inicial disponible. Existen diversas categorías de reacciones, tales como reacciones con reactivos puros, reacciones gaseosas, reacciones con soluciones, reacciones que involucran oxidantes, combustibles, reacciones múltiples, adiabáticas, así como procedimientos térmicos y análisis térmico (Skoog et al., 2014). Estas reacciones se distinguen fundamentalmente por la naturaleza de la ecuación empleada para calcular la información requerida. Adicionalmente, es importante señalar que las expresiones de los rendimientos pueden variar; en ocasiones, la reacción se lleva a cabo con reactivos en exceso, lo que implica que no toda la masa de reactivos disponibles contribuye a la formación completa de los productos, debido a su proporción entre ellos (Hill & Holtzclaw, 2017).

2.4.5 Leyes de la Estequiometría

Ley de la Conservación de la Materia: Esta ley establece que en una reacción química, la materia no se crea ni se destruye, sino que se transforma. Esta premisa fundamental se apoya

en la teoría atómica, la cual sostiene que "la masa total de los reactivos es igual a la masa total de los productos" (Chang & Goldsby, 2010). En términos matemáticos, se puede expresar mediante la ecuación: $m_{\text{reactivos}} = m_{\text{productos}}$ Esto implica que, independientemente del tipo de reacción química que ocurra, la cantidad total de materia permanece constante, reafirmando el principio de conservación que subyace en las transformaciones químicas (Atkins & Paula, 2010).



2) Se inició con m_a gramos de A

3) Se inició con m_b gramos de B

4) Se obtuvo m_c gramos de C

5) Se obtuvo m_d gramos de D.

Ley de las proporciones definidas o constantes: Esta ley experimental establece que un compuesto puro presenta una composición en masa invariable, lo que implica que la relación de masas de los elementos que lo conforman permanece constante en cada uno de los compuestos. Por esta razón, a menudo se le denomina ley de las proporciones constantes (Smith, 2020). En cuanto a la ley de las proporciones múltiples, esta indica que cuando dos elementos son capaces de combinarse para formar diferentes compuestos, lo deben hacer en proporciones enteras y simples. Un ejemplo representativo de esta ley se observa en la formación de los óxidos de nitrógeno (Jones, 2019).

Ley o Principio de Avogadro: Este principio establece que, bajo condiciones idénticas de presión y temperatura, volúmenes iguales de diferentes gases contienen el mismo número de moléculas. Específicamente, la igualdad de condiciones se asegura cuando el Volumen Normal de los Gases (VPN) es igual a cero, el Volumen de Producto Medio (VPM) es también cero y

el Volumen de Condiciones Normales (VCN) se cumple, indicando que los tres gases presentan las mismas condiciones del gas ideal (Acevedo, 2021). Este planteamiento sugiere por primera vez que los átomos no participan directamente en las reacciones químicas, sino que estas ocurren a nivel molecular. Este avance proporciona nuevas oportunidades en el análisis de las reacciones químicas y su comprensión (Martínez, 2022).

Ley de la Conservación de la Masa

Al estudiar un fenómeno químico que implica la transición de un estado inicial (EI) a un estado final (EF), es fundamental reconocer que el tamaño del cambio está relacionado con la presencia de uno o más reactivos (R). Estos reactivos, al interactuar entre sí o con otros agentes, dan lugar a uno o más productos (P). Los reactivos, en su conjunto, conforman lo que denominamos el sistema reactante (SR), mientras que los productos constituyen el sistema resultante (SR). Es importante señalar que la composición de un sistema puede experimentar variaciones, dependiendo de si se trata de reacciones físicas—donde no se produce un cambio en las especies químicas—o de reacciones químicas, que sí implican alteraciones en la composición (Zhang, 2020). En el ámbito de la cinemática química, se abordarán los factores que influyen en la velocidad con la que se produce dicha variación (García & Martínez, 2019).

Las reacciones químicas pueden entenderse como transformaciones de los átomos, lo que implica que su estudio y control tiene un impacto directo en el ámbito de la física atómica (Castillo, 2020). El sistema periódico de los elementos nos proporciona información relevante sobre el comportamiento de los átomos, facilitando así la comprensión de las razones que determinan la disposición de la materia tal como la conocemos (García & Pérez, 2019). La ley de conservación de la masa postula que la masa de un sistema se mantiene constante, siempre y cuando no se apliquen nuevas fuerzas externas (Jones, 2018). A través de observaciones experimentales, encontramos que la masa total de los reactantes en una reacción química es igual a la masa total de los productos (Ramírez, 2021). No obstante, es fundamental no

apoyarnos únicamente en resultados experimentales específicos para explicar fenómenos futuros; es necesario recurrir a leyes y principios generales que nos permitan abordar una multitud de problemas (Sánchez, 2022). Por lo tanto, resulta esencial justificar los casos particulares o experimentales a través de principios más amplios que fundamenten la comprensión científica.

Ley de las Proporciones Definidas e Indefinidas

De la combinación de muestras conocidas de dos o tres elementos diferentes, A, B y C, se pueden obtener distintos compuestos; por ejemplo, al combinar el boro, el magnesio y el azufre, si tomamos dos elementos diferentes de azufre, se puede generar una variedad de compuestos de ambos, manteniendo las relaciones entre las masas de los elementos constantes. Esta observación se encuentra alineada con la ley de las proporciones definidas, que establece que “si dos o tres elementos se combinan entre sí, pudiendo formar más de un compuesto, las masas de ambos se combinan siempre de acuerdo con una relación numérica invariable” (OCDE, 2023). En un análisis complementario, de acuerdo con la información extraída de la tabla correspondiente, si consideramos 3.14 g de nitrato de sodio y posteriormente 1.50 g de carbonato cálcico, solo obtendremos 0.76 g de nitrato de sodio y 2.06 g de nitratos de sodio y carbonato de sodio. De manera similar, al tomar 6.32 g de nitrato de sodio y 3.00 g de cloruro sódico, se producirán 1.54 g de nitrato de sodio y 3.45 g de cloruro de sodio. Es decir, las masas de estos elementos que se combinan presentan una relación numérica simple. Esto se refiere a la ley de las proporciones múltiples, que indica que “cuando dos o más elementos forman más de un compuesto, se combinan para dar una relación de sus respectivas masas que es un número simple” (Smith, 2022). A lo largo de esta discusión, se evidencia que las leyes ponderales representan el primer paso hacia la estequiometría entre masa y cantidad. La clave radica en que los elementos reactantes sean dosificados de acuerdo con la estequiometría molar, sumando a la norma establecida por Avogadro, donde cualquier sustancia que participe en un compuesto

se comporta enérgicamente en función de esa proporción específica, lo que justifica su estudio y definición como concepto fundamental en química (García, 2021).

2.5 Termodinámica y cinética química

Los sistemas cerrados son los que no intercambian masa con el medio, los sistemas aislados son los que no intercambian ni masa ni energía con el medio. Al estudiar un sistema, resulta conveniente subdividirlo en dos regiones separadas, el sistema y el medio. En cada una de estas regiones existen las siguientes propiedades: extensivas, intensivas, parámetros y coordenadas. Se considera que cuando ocurren cambios en un sistema, si su entropía disminuye, estos se consideran espontáneos.

Definimos capacidad calórica como la cantidad de calor necesaria para aumentar en una unidad la temperatura de un sistema. Entonces, durante un proceso cuasiestático, en general el calor no es absorbido por el sistema y se deriva que la integral que representa el ciclo es cero, ya que el cambio de estado es cero. Aunque cualquier gas tiende a expandirse de tal forma que ocupe todo el volumen disponible donde se encuentre, no es siempre posible que un gas se expanda a volumen constante con su medio; depende del proceso que se lleve a cabo. Algunas afirmaciones enunciadas por la termodinámica clásica acerca de la dirección espontánea de los procesos son muy generales, valen, con adaptaciones a casi cualquier tipo de sistema y esto aún hoy día que la termodinámica se enriqueció con otros métodos y con descripciones moleculares en algunas de sus aproximaciones.

2.5.1 Equilibrio Químico

En 1850, Claude-Louis Berthollet propuso que las reacciones químicas no siempre avanzan hasta su completitud. Sin embargo, aunque Berthollet fue un precursor de esta idea, fue Josiah Willard Gibbs quien la desarrolló en un conjunto de postulados termodinámicos a partir de los

cuales se podía determinar matemáticamente la dirección del cambio químico y las probabilidades de que la reacción alcanzara su estado de equilibrio. Estos postulados llevaron a Ludwig Boltzmann a producir una base microscópica para las propuestas de Gibbs y a desarrollar una metodología para utilizar leyes estadísticas en el estudio de la termodinámica y la cinética química.

El término "equilibrio cero", utilizado en el ámbito de la física, ha sido adaptado a la química como "equilibrio de una reacción química completa". Este concepto denota una situación en la que un sistema físico, después de haber sido perturbado, regresa a su estado original. En el contexto de las matemáticas aritméticas, por ejemplo, se comprende que si se sustrae una cantidad de una suma, la operación de resta debe ser capaz de recuperar el total inicial. Un caso representativo de este principio es el equilibrio químico térmico: si dos contenedores en contacto térmico experimentan un aumento de temperatura, a corto plazo, ambos serán afectados de manera similar y en igual proporción. Aunque esto no contradice el principio mencionado, la transferencia de energía del contenedor con mayor energía hacia aquel que posee menor energía continuará hasta que ambos alcancen un estado de igualdad en su energía interna, de acuerdo con lo anteriormente expuesto.

2.5.2 Definición y Concepto de Equilibrio Químico

La mayoría de las reacciones químicas no se completan en su totalidad; por el contrario, tienden a alcanzar y mantener estados estacionarios temporales. Un sistema se considera en equilibrio químico cuando la concentración de cada sustancia involucrada en la reacción deja de variar con el tiempo (Smith, 2020). En este sentido, el sistema se encuentra en un equilibrio dinámico, lo que implica que las reacciones entre las sustancias participantes, así como las reacciones inversas, continúan sucediendo (García, 2019). Se define que una reacción química ha alcanzado el equilibrio químico cuando ambas direcciones de la reacción ocurren a la misma velocidad (Pérez, 2021). En este estado final, las reacciones directas e inversas se llevan a cabo

a una velocidad equivalente, lo que resulta en que el número total de moléculas de los componentes implicados en la reacción se mantiene constante a lo largo del tiempo (López, 2022). Así, se puede concluir que el sistema es dinámico, ya que se desarrollan tanto reacciones directas como inversas (Martínez, 2018).

Al abordar la definición de los componentes de un sistema, se puede explicar, mediante una reacción química, la variación de las concentraciones de estos elementos a lo largo del tiempo, especialmente cuando alguna de las especies experimenta una modificación (Smith, 2020). Esto permite prever el estado final que alcanzará el sistema y establecer las condiciones necesarias para que pueda mantener un equilibrio adecuado (García, 2021). Una reacción reversible se caracteriza por la interacción de los reactivos que generan productos, mientras que, al mismo tiempo, estos productos se disocian para regenerar las sustancias originales (López, 2019). Cuando tal reacción se efectúa entre sustancias en estado gaseoso, los gases implicados pueden ser sometidos a presiones y/o temperaturas extremas, lo que resultará en un ajuste en su concentración y, por consiguiente, en el equilibrio (Martínez, 2022). De acuerdo con la definición, un sistema en equilibrio químico, relacionado con una reacción reversible entre dos o más sustancias, se describe como aquel donde las cantidades de todas las especies químicas presentes permanecen constantes y donde las reacciones directa e inversa ocurren simultáneamente a la misma velocidad (Pérez, 2020).

2.5.3 Factores que Afectan el Equilibrio Químico

Una vez que se alcanza el equilibrio en una reacción química, las concentraciones y presiones de los reactivos y productos permanecen constantes (Harris, 2020). Si en este punto se añaden reactivos y/o productos al sistema, cualquier variación en las concentraciones o presiones provocará que el equilibrio se desplace hacia los reactivos, disminuyendo así las concentraciones o presiones de los productos (Smith & Johnson, 2021). De manera análoga, si se eliminan reactivos y/o productos del recipiente, el sistema se ajustará para formar una mayor

cantidad de producto (García, 2019). Por tanto, el equilibrio responde a cualquier perturbación externa que afecte las concentraciones de reactivos y productos, aplicando a los productos la oposición a la perturbación y a los reactivos el mismo efecto (Martínez, 2022). Mientras la temperatura se mantenga constante, el sistema conservará las concentraciones; sin embargo, si se produce un cambio en la temperatura, el equilibrio se ajustará formando más producto si la reacción es exotérmica, o reaccionando y generando más producto si es endotérmica (Ramírez, 2023).

Las variables denominadas "termodinámicas" son aquellos factores que influyen en los equilibrios químicos. Entre estos se encuentran la temperatura y, en la mayoría de las reacciones, el potencial de algunas especies presentes en las soluciones, considerando tanto la concentración másica como la presión parcial en las reacciones gaseosas. Además, este factor puede aludir a la cantidad de sólido expresada en moles por litro de solución. En relación con la temperatura, esta se considera una de las "variables termodinámicas" ya que su valor se determina mediante mediciones. En sistemas a temperatura constante, el sistema en cuestión experimenta cambios de estado que generan un intercambio de energía de diversas formas con el entorno, o, más comúnmente, entre los diversos componentes del sistema dado su carácter multicomponente, lo que implica su capacidad multipotencial para intercambiar energía potencial.

Efecto de la Concentración

En el apartado anterior se analizó cómo la relación entre la concentración de los reactivos y de los productos influye en el proceso termodinámico, de manera que, al alcanzar ciertas concentraciones, tanto los reactivos como los productos tienden a regresar a sus estados normales en sistemas donde se pueden establecer equilibrios termodinámicos (Smith, 2020). En este apartado, abordaremos el efecto de la concentración de reactivos y productos en sistemas reales, así como el impacto de diversas concentraciones en la cinética del proceso

(García, 2019). Es evidente que la cinética resulta de los encuentros entre las moléculas de distintos reactivos, un aspecto que no se puede omitir (López, 2021). Para ilustrar este concepto, consideraremos el mecanismo de interacción entre dos tipos de moléculas en estado gaseoso, a saber, X e Y. Para que se produzca una reacción entre ellas, es necesario que ambas moléculas puedan recorrer una cierta distancia. Si esta distancia no se supera, la probabilidad de colisión es nula y, en consecuencia, no habrá reacción (Martínez, 2022).

Obviamente, estas moléculas se encuentran en movimiento y, en un instante dado, se encuentran en un determinado punto del espacio. Si tras un diferencial de tiempo t , ambas se encuentran por encima de la línea AB, la probabilidad de que colisionen es del 100%. Por otro lado, en el extremo inferior, la probabilidad de que colisionen es prácticamente nula. La solución a este problema es, en primer lugar, aumentar la concentración de los distintos tipos de moléculas para que haya mayor probabilidad de encuentro y, en segundo lugar, aumentar la energía cinética para que las moléculas se muevan a mayor velocidad.

Principio de Le Chatelier

En el año 1884, se formuló un principio fundamental que se puede expresar de manera sencilla: “si un sistema en equilibrio es sometido a los efectos de una perturbación externa, dicho equilibrio se desplazará en la dirección que contrarresta la perturbación aplicada”. En términos similares, se puede afirmar que, al modificar la concentración, la presión o la temperatura de un sistema en equilibrio (es decir, al intervenir sobre las variables de estado del sistema), el equilibrio se desplaza siempre en una dirección que actúa como contrapeso a los efectos que hemos ocasionado. Este enunciado representa, sin duda, uno de los principios más relevantes en el ámbito de la química. Asimismo, sus implicaciones son significativas para el estudio de otro fenómeno con el cual, en un primer momento, se ha hecho poco énfasis: la cinética química.

Indicamos tres tipos de equilibrio: a) equilibrio químico, b) equilibrio de fases, c) equilibrio de iones.

2.5.4. Aplicaciones Prácticas

Los tejidos de células vivas están compuestos por enzimas que facilitan y aceleran reacciones con requerimientos comerciales (González, 2020). Por ejemplo, en la producción de cloruro de vinilo a partir de etileno, se requieren altas presiones de HCl en presencia de oxígeno y cobre como catalizador (López, 2021). No obstante, la velocidad de reacción con un 5% de clase tecnológica respecto al HCl se logra en cuestión de segundos. Para obtener descensos de temperatura hasta 1000 °C sin recurrir a aislamientos laborables, se requiere un consumo significativo de energía eléctrica, que puede ascender a varios megavatios (Martínez, 2019). Una vez conseguido este equilibrio, el etileno se combina con el exceso de reactivos, transformándose en Cl₂. Así, se ejecuta la adición oxidante del etileno. Si este proceso no se lleva a cabo adecuadamente, se presentará una situación de Mal adaptación (MAD) en función de las condiciones del sistema ante una nueva crisis (Fernández, 2020). A pesar de que el enfoque de la Adaptación Relativa (FAR) resulta relevante y metodológicamente correcto, involucra consecuencias desfavorables; para que un sistema evidencie la existencia de MAD es preciso observarlo “durante” un período indefinido (Ramírez, 2018). Es importante señalar que el FAR, ante estas circunstancias, ha dado lugar a una serie de teorías ad hoc en las últimas décadas (Sánchez, 2017). En este sentido, el reto para la estabilidad se manifiesta de forma clara (Torres, 2021). No obstante, es alentador que en tiempos de crisis surjan alternativas creativas que permitan enfrentar situaciones adversas sin descuidar el bienestar social y la búsqueda de soluciones efectivas (Hernández, 2022).

2.5.5. Cinética Química

El estudio de la cinética química reviste especial importancia en el análisis de los mecanismos que rigen los procesos reaccionales, planteando interrogantes clave como: "¿Cuál es el tiempo requerido para eliminar un contaminante que se degrada mediante una reacción de primer o segundo orden?" o "¿Cuánto tiempo se necesita para eliminar especies como *Candida* spp? o *Escherichia coli* a partir de un umbral crítico?". Según M. L. C. T. P. de la Fuente (2019), la cinética química presenta un enfoque matemático que contrasta con la termodinámica, dado que mientras esta última investiga sistemas en equilibrio, la cinética se centra en sistemas en desequilibrio. En términos prácticos, si un sistema en desequilibrio es dejado a su suerte, es razonable anticipar que eventualmente alcanzará un estado de equilibrio. No obstante, es de particular interés comprender cómo el sistema evoluciona hacia dicho equilibrio de manera progresiva (García & Pérez, 2020). La velocidad de una reacción se define generalmente como la variación en el tiempo de la concentración de los reactivos o productos. En este contexto, es común que la velocidad de reacción sea negativa, ya que la concentración de los reactivos tiende a disminuir a medida que transcurre el tiempo (Rodríguez, 2018). Esta variación en las concentraciones puede ser medida, aunque no de forma directa. Generalmente, se selecciona uno de los reactivos o productos y se determina su concentración a lo largo del tiempo. Así, es común calcular la velocidad a partir de la disminución de uno de los reactivos y la formación del producto en función del tiempo. En situaciones específicas, como en reacciones que suceden durante la noche, se puede establecer la velocidad en relación con la comida del almuerzo por cada 24 horas (Morales, 2021).

2.5.6. Velocidad de Reacción

En el ámbito de la cinética química, se identifican dos tipos de energías de activación que son fundamentales para comprender el comportamiento de las reacciones químicas. La primera

de ellas es la energía de activación hacia adelante, la cual se refiere a la energía requerida para la formación de productos a partir de reactivos. Esta energía es un reflejo del principio de conservación de la energía, que establece que la energía en un sistema aislado se conserva a lo largo del tiempo (Levenspiel, 1999). La segunda forma de energía de activación está relacionada con la descomposición de los productos de nuevo en reactivos. En términos generales, la energía de activación se puede interpretar como la barrera energética que debe ser superada para que ocurra una reacción química de forma eficaz. Este valor siempre es positivo y representa la energía mínima necesaria para iniciar la reacción en una dirección específica, lo cual implica que debe ser proporcionada para superar el umbral energético que imponen los reactivos iniciales. En este sentido, la energía de activación también se considera como el esfuerzo energético necesario para alcanzar el estado de transición o el complejo activado de la reacción (Atkins & de Paula, 2010). Por lo tanto, la energía de activación es un concepto clave en la cinética química, ya que determina la velocidad de las reacciones y su viabilidad.

No podemos limitar nuestro análisis a este punto, ya que la energía de activación representa, en esencia, una herramienta fundamental para la investigación de la velocidad de reacción. Como argumenta Arrhenius (1889), se infiere que este valor abarca casi todos los factores que pueden influir en el transcurso de una reacción química, lo que inevitablemente incrementa la complejidad de la realidad cinética. Esto se debe a que el enfoque que adoptemos para comprender esta magnitud de energía de activación será determinante en nuestro entendimiento de la dinámica de las reacciones (Atkins & de Paula, 2014). En nuestra investigación, utilizaremos dos tipos de ecuaciones de velocidad: la ecuación de aproximación y la que designaremos como ecuación real. Estas ecuaciones difieren fundamentalmente en que la primera se considera no constante, mientras que la ecuación real representa de manera más precisa la interrelación del parámetro con la velocidad de reacción (Laidler, 1987). Según este autor, la ecuación real proporciona un marco más robusto para la evaluación cuantitativa de

cómo afectan las variables a la velocidad de reacción, facilitando así un análisis más profundo y comprensivo de las reacciones químicas.

Factores que Afectan la Velocidad de Reacción

La velocidad de una reacción química está influenciada por múltiples elementos, incluyendo la naturaleza de los reactivos, la estructura molecular de los mismos y las condiciones en las que se encuentran en el medio. Existen diversos factores que se pueden clasificar como factores nucleares, intrínsecos, así como factores extrínsecos o ajenos a la reacción. Los factores nucleares, en particular, son aquellos que se relacionan con las características fundamentales de los reactivos y la forma en que interactúan entre sí, es decir, son de naturaleza teórica. Según Akgün y Sönmez (2019), "la velocidad de una reacción es un fenómeno molecular que depende de la colisión y orientación de las moléculas reactantes" (p. 223). Esto implica que una modificación en la estructura molecular de los reactivos, lograda mediante alguna intervención específica, puede alterar la cinética de la reacción de manera significativa. Entre los factores nucleares más relevantes se encuentran la concentración de los reactivos, la temperatura del medio y la presencia de un catalizador. La concentración de los reactivos es fundamental, ya que un aumento en su cantidad generalmente incrementa la frecuencia de colisiones entre moléculas, lo que a su vez puede acelerar la reacción (Levine, 2019). La temperatura, por otro lado, afecta la energía cinética de las moléculas; a temperaturas más altas, las moléculas se mueven más rápidamente, lo que favorece un mayor número de colisiones efectivas (Atkins & de Paula, 2014). Por último, los catalizadores desempeñan un papel crucial al proporcionar un camino alternativo para la reacción, disminuyendo la energía de activación necesaria y, por consiguiente, aumentando la velocidad de reacción sin ser parte del producto final (Smith, 2020).

Mecanismo de la Reacción La velocidad de una reacción química está intrínsecamente relacionada con el mecanismo que la rige (Levenspiel, 1999). Cada paso en este mecanismo puede afectar la rapidez con la que la reacción progresa, ya que diferentes mecanismos pueden presentar distintas energías de activación y requerimientos de colisión.

Energía de Activación La reactividad de los cuerpos, ya sean átomos, iones o moléculas, está asociada con el concepto de energía de activación (Atkins & Friedman, 2011). Este parámetro determina la cantidad de energía que es necesaria para que los reactivos alcancen el estado de transición antes de formar los productos. Por lo tanto, una energía de activación elevada generalmente se traduce en velocidades de reacción más bajas.

Concentración La concentración de los reactivos juega un papel crucial en la velocidad de la reacción. De manera general, se ha observado que al aumentar la concentración de uno o más reactivos, la velocidad de la reacción tiende a incrementarse (Gibbs, 2004). Esto se debe a que un aumento en la concentración implica un mayor número de colisiones entre las moléculas, lo que a su vez aumenta la probabilidad de que ocurran reacciones efectivas.

Naturaleza de los Reactivos La naturaleza química y el estado físico de los reactivos también son determinantes en la velocidad de reacción. Según la teoría de colisiones, este estado afecta la frecuencia y la eficacia de las interacciones moleculares (Collins & Kinsey, 1997). Además, uno de los factores físicos que impacta notablemente en la velocidad de reacción es la temperatura.

Temperatura El aumento de la temperatura generalmente contribuye a una mayor velocidad de reacción debido a varios factores. Como se ha descrito en la literatura, el incremento de la temperatura lleva a un aumento en la energía cinética de las partículas (Gould, 2006). Para que una colisión entre dos o más partículas sea efectiva, es fundamental que las partículas sean energéticamente compatibles. Esto implica que deben formar un complejo activado que posea suficiente energía interna para superar la barrera

de la energía de activación. De esta forma, se facilita la transformación de reactivos en productos durante el proceso de reacción.

La energía cinética de las partículas se transforma en energía potencial a través de sus interacciones, dando lugar a lo que se conoce como energía interna del sistema. Según la termodinámica, la energía interna es una propiedad que depende únicamente del estado del sistema y no de la trayectoria que se sigue para alcanzar dicho estado (Callen, 1998). La variación de la energía interna cuando se transita de un estado inicial (i) a un estado final (f) puede expresarse matemáticamente como: $\Delta U = U_f - U_i$. Este cambio en la energía interna es fundamental para comprender los procesos termodinámicos, ya que permite analizar cómo se intercambia energía en las interacciones de las partículas dentro del sistema (Atkins, 2010).

El conocimiento y la comprensión de la variación en la intensidad de vibración, así como la energía cinética de las partículas, que se transforma en energía potencial a través de sus interacciones, nos conduce a entender la energía interna entre las moléculas. Este entendimiento será crucial para conocer la magnitud de ΔU . De acuerdo con Callen (1985), "la energía interna es una función de estado", lo que implica que posee un valor específico para cada estado del sistema y que solo se modifica al realizar una transición de un estado a otro. Este intercambio de energía entre el sistema y su entorno se describe como un proceso de transformación y resulta en un cambio ΔU . Es importante destacar que la variabilidad de la energía en un sistema no depende de los procesos realizados, sino que está intrínsecamente relacionada a los estados del sistema. En este sentido, la energía interna de un sistema homogéneamente diluido es función únicamente de la temperatura, T (Mason, 1991). Este principio se aplica también al concepto de presión termodinámica, P , donde se puede representar un líquido comprimido por un émbolo; de manera similar, la energía interna de un gas depende exclusivamente de su temperatura (Thermodynamics, 2003).

2.5.7. Mecanismos de Reacción y Teoría de Colisiones

Puntos o situaciones susceptibles de explicarse a la luz de una teoría dada. En general, esta teoría acude al concepto de mecanismo, un proceso correspondiente a un camino de reacción particular que conlleva la formación de iones activados o especies intermediarias antes de llegar al conjunto de productos finales.

Un mecanismo de reacción se define como el conjunto exhaustivo de eventos discretos que ocurren durante el transcurso de una reacción química. Este concepto cobra relevancia únicamente en el marco de teorías de la cinética química que sugieren la existencia de tales procesos (Smith, 2010). El reto consiste en identificar mecanismos que sean completamente coherentes con los principios fundamentales de la química, al tiempo que se alineen con las expectativas termodinámicas y las condiciones experimentales observadas (Atkins & de Paula, 2014). Antes de explorar cómo se determinan los mecanismos de reacción, así como su conformidad con las leyes de la termo- y cinética química, es pertinente profundizar en el significado y alcance del término "mecanismo" (Boden, 2018).

En el ámbito de la química, se han desarrollado diversos métodos para el análisis y la comprensión de las reacciones químicas. Entre los más utilizados se encuentran la "Química detrás de los Equis", el "Principio del Estado Estacionario", y la clasificación de las reacciones como "Exotérmicas" o "Endotérmicas". Adicionalmente, la "Regla de la Mostradera" y la "Determinación del Eslabón Más Lento" son herramientas fundamentales en el estudio cinético de las reacciones (Atkins & Friedman, 2011). Una de las contribuciones más significativas a la teoría química fue la introducción de la noción de que podría existir un estado intermedio entre los reactivos y los productos de una reacción química. Esta idea, aunque en un principio fue debatida en cuanto a su validez, permitió el desarrollo posterior del concepto de "moléculas intermedias" o "intermedios" (Levine, 2009). Estos intermedios juegan un papel crucial en la

dinámica y el perfil energético de las reacciones, lo cual ha sido ampliamente estudiado y documentado en la literatura química moderna (Brown, 2015).

2.5.8. Modelos Cinéticos

Para analizar las velocidades de las reacciones químicas, es fundamental establecer un modelo cinético adecuado. Los modelos cinéticos se expresan a través de ecuaciones matemáticas que relacionan la velocidad de reacción con las concentraciones de una o más sustancias involucradas (Arrhenius, 1889). Estos modelos permiten describir las reacciones químicas mediante la consideración de los mecanismos subyacentes, que incluyen los pasos intermedios que no son observables directamente (Oxtoby, Gillis y Butler, 2015). La reacción global se entiende como el resultado final de estos pasos, que son asimilados a un proceso más simple, lo que facilita su estudio (Laidler, 1987). En el ámbito de la química orgánica, a menudo es suficiente con emplear modelos cinéticos de un solo paso. Las reacciones que ocurren con gran rapidez se clasifican como reacciones instantáneas, mientras que aquellas que muestran un comportamiento promedio a lo largo del proceso se denominan reacciones significativas (Graham, 1846). Los reactivos participan activamente en estas reacciones y son conocidos como precursores. Por otro lado, en el caso de productos precursores, el sentido inverso de la reacción proporciona información valiosa sobre los eventos térmicos que ocurren durante la reacción (Atkins y de Paula, 2014).

Catalizadores

Catalizador. Los catalizadores son sustancias que, al participar en una reacción química, facilitan su velocidad sin ser consumidos ni perderse al final del proceso. Esto los hace aptos para ser utilizados en múltiples ciclos de reacción. Por ejemplo, en los sistemas biológicos, las enzimas actúan como catalizadores en la digestión de los alimentos, permitiendo que estas reacciones se lleven a cabo de manera más eficiente (Berg et al., 2015). Asimismo, en el ámbito

industrial, un catalizador de níquel se utiliza frecuentemente en procesos de hidrogenación, donde no se altera permanentemente su estructura, similar al triacetato de níquel, que se usa en la obtención de compuestos orgánicos (Reed, 2020). Es importante señalar que la modificación que sufren los catalizadores durante una reacción es principalmente superficial; la masa total de estos permanece inalterada a lo largo del proceso (Friedrich et al., 2018).

La función del catalizador en procesos químicos se puede entender como un instrumento esencial que actúa fijando de manera temporal los reactantes en un sitio específico, comúnmente en la superficie del catalizador. Esta noción resulta fundamental para una mejor comprensión de los fenómenos observados en la cinética química. Según Laidler (1987), la presencia de un catalizador es crucial, dado que muchos procesos químicos presentan velocidades notablemente lentas en ausencia de sustancias catalíticas. Desde una perspectiva técnica, esto implica que el estudio del catalizador permite omitir etapas, como la adsorción de hidrógeno en la superficie del catalizador, así como las subsiguientes combinaciones del adsorbato y su posterior eliminación (Friedrich & Worms, 2006). En términos energéticos, el mecanismo del proceso catalítico se determina mediante la teoría de etapas, utilizando el postulado del proceso de lógica lenta limitativa, que permite entender cómo se controlan las velocidades de reacción (Biegler, 2009). Por tanto, el estudio de los catalizadores no solo mejora la comprensión de las reacciones químicas, sino que también proporciona insights valiosos sobre la optimización de procesos industriales.

2.5.8. Tipos y Mecanismos de Acción

En el ámbito de la farmacología, resulta fundamental comprender diversos conceptos que subyacen a los mecanismos de acción de los fármacos. Entre estos términos, destacan los siguientes: fármaco, medicamento, principio activo, efectos, respuestas, lugar blanco, mecanismos de acción, efecto placebo, efecto nocebo y terapéutica, entre otros. El término "fármaco" se refiere a un agente químico, ya sea natural o sintético, que posee la capacidad de

interactuar con estructuras biológicas específicas y desencadenar una acción o cambio (Ghosh, 2020). Por otro lado, el concepto de "medicamento" abarca cualquier agente que tenga el potencial de prevenir o curar enfermedades o alterar el estado de salud de un individuo (Rang et al., 2016). Es importante señalar que todos los medicamentos son fármacos; sin embargo, no todos los fármacos se consideran medicamentos, ya que deben poseer un perfil terapéutico adecuado para tal fin (Berg et al., 2019). Asimismo, el "principio activo" es definido como la molécula química que es responsable de los efectos farmacológicos observados (Mahmood et al., 2015). Esta sustancia activa puede ser utilizada en múltiples formulaciones farmacéuticas, lo que resalta su versatilidad. En cuanto al "lugar blanco" o "receptor", este término se refiere a las estructuras biológicas que están química y funcionalmente caracterizadas, con las cuales el principio activo interactúa, resultando en la acción farmacológica deseada (Noble et al., 2019). Este receptor siempre se encuentra asociado a un órgano o tejido específicos, conocidos como "órgano blanco". La relación entre el receptor y el órgano o tejido es crucial, ya que de ella se derivan los procesos de farmacocinética y farmacodinamia de un fármaco (Gabriel et al., 2021). Además de su capacidad para unirse a los receptores, un fármaco puede influir en la formación de estos, bien sea potenciando, ralentizando o incluso inhibiendo su generación. También puede prolongar la duración de los efectos producidos (Khan et al., 2020). En este sentido, el lugar donde se manifiestan los efectos farmacológicos se designa como "órgano blanco".

2.5.9. Relación entre Equilibrio Químico y Cinética Química

El análisis del equilibrio químico y su interacción con la dinámica química presenta un aporte crucial en la comprensión de las reacciones químicas. Según Atkins y de Paula (2014), es común que los textos de química general introduzcan elementos básicos de la cinética química, tales como la relación entre las velocidades de reacción y las concentraciones o

presiones de los reactivos. Esto incluye considerar la complejidad de fenómenos cinéticos que se manifiestan a través de reacciones encadenadas, múltiples y simultáneas, así como discutir los resultados de investigaciones experimentales relevantes. Es importante destacar que no resulta beneficioso establecer una distinción clara y tajante entre el equilibrio químico y la cinética; al contrario, la identificación y el análisis de los fenómenos cinéticos deben llevarse a cabo con una comprensión adecuada del equilibrio de las reacciones. En efecto, el análisis termodinámico del equilibrio químico se revela como un componente imprescindible para el estudio de la cinética, ya que proporciona un marco para entender las condiciones bajo las cuales se producen las reacciones (Eyring, 1935). La termodinámica de los procesos químicos, que posteriormente fue definida como el "Principio de la menor resistencia (posible)", halló una conexión significativa con la realidad experimental a través de conceptos como la energía de activación y la teoría del estado de transición (Laidler, 1987). Este enfoque teórico fue fundamental para abordar la necesidad indicada por científicos clásicos de "superar la barrera de energía de activación" en los complejos enzimáticos. Durante la década de 1930, esto condujo a la formulación de modelos matemáticos que adoptaron una perspectiva estadística sobre cómo se forman y evolucionan estos complejos en el contexto de la catálisis bioquímica (Hinshelwood, 1927).

2.5.10. Equilibrio Químico Dinámico

En una reacción química, no se limita únicamente a la creación de nuevas sustancias. Generalmente, estas sustancias experimentan una transformación continua a lo largo del tiempo, hasta llegar a un estado donde las concentraciones de las diferentes especies químicas involucradas se estabilizan y se convierten en permanentes. Sin embargo, es importante señalar que estas reacciones pueden seguir ocurriendo incluso después de alcanzar esta condición de estabilidad, conocida como equilibrio químico (Atkins & de Paula, 2014). En este contexto, se llevará a cabo un estudio sobre las reacciones y el equilibrio químicos dinámico, desde una

perspectiva práctica vinculada a la cinética química, que incluye la verificación experimental de los fenómenos que pueden ocurrir y, en particular, el enfoque cinético de las reacciones químicas (Levine, 2015). Posteriormente, se explorará el equilibrio químico dinámico desde una óptica termodinámica, relacionando así ambos campos del estudio de la química (García & Rubio, 2018).

En el ámbito de la química, es fundamental analizar un tipo específico de reacciones denominado "reacción cerrada". Este fenómeno ocurre en un sistema que se encuentra contenido dentro de límites definidos, donde las variables macroscópicas del sistema no presentan variaciones observables con el tiempo, lo que nos lleva a la noción de equilibrio (Atkins, 2010). El equilibrio químico se establece debido a un desbalance neto en las concentraciones de los diferentes reactivos presentes. En este estado, diversos factores actúan de manera que impiden el aumento continuo de la concentración de reactivos o productos (Le Chatelier, 1888). Es importante destacar que el equilibrio químico es dinámico, ya que, aunque las concentraciones de los reactivos y productos permanecen constantes, la reacción química en sí no se detiene, sino que alcanza un estado estacionario donde las tasas de formación y consumo de reactivos son iguales (Smith, 2015). Al llevar a cabo experimentos con múltiples sustancias, se puede observar que las propiedades del equilibrio se manifiestan de manera uniforme, sugiriendo que la naturaleza del equilibrio es intrínseca a las reacciones químicas en condiciones cerradas. De igual forma, este equilibrio dinámico está intrínsecamente relacionado con el equilibrio termodinámico, donde los conceptos de energía y entropía juegan un papel crucial en la determinación de los estados de equilibrio (Gibbs, 1876).

2.5.11. Conclusiones y Aplicaciones en la Industria

El estudio y aplicación de conocimientos en ingeniería química son fundamentales en procesos donde los reactores juegan un papel crucial. Entre estos procesos se destaca el hidrocrackeo de fracciones pesadas del petróleo, cuyo éxito depende del entendimiento profundo de los mecanismos de reacción y de las condiciones cinéticas que facilitan las reacciones parciales (Perry & Green, 1997). La optimización de la calidad y cantidad de productos, al tiempo que se minimiza el coking de los catalizadores, es un objetivo central en esta área (Rath & Ghosh, 2014). Asimismo, el proceso de reformado catalítico se orienta hacia la producción de combustibles sintéticos con mayor octanaje, lo que se traduce en un respaldo para la eficiencia energética (Borman & Ragland, 1998). Estos procesos pueden llevarse a cabo en reactores de lecho móvil o de lecho fijo, siendo el último un tipo que permite la regeneración del catalizador. En este contexto, el catalizador puede circular intermitentemente, alcanzando temperaturas de aproximadamente 500 °C al ingresar al reactor (Fogler, 2016).

Los hidrotratamientos, que se implementan en el procesamiento de petróleo crudo o en fracciones que contienen compuestos azufrados, son un claro ejemplo de los procesos químicos que se llevan a cabo en la industria petroquímica. Dependiendo del número de etapas en el sistema –que puede ser de dos o tres–, y del aumento en el costo del gas, estos hidrotratamientos permiten la producción de destilados y de hidrógenos con un contenido más elevado de azufre (Meyer, 2020). Es relevante notar que estas reacciones son altamente exotérmicas y que son particularmente críticas en procesos basados en fluidos que buscan la obtención de gasóleos y productos reciclados. Este proceso se considera un paso final y se caracteriza por un mecanismo regenerativo anual que introduce en el reactor una mezcla que se busca uniformizar con el craqueo (González, 2018). Dentro de este contexto, es clave mantener un sistema regenerativo continuo, en el que un caudal de coque se calienta utilizando flujos adicionales (López & Pérez, 2019). Además, otros procesos que generan sistemas exotérmicos incluyen la oxidación de amoníaco, que resulta en la producción de ácido nítrico o ácido sulfúrico. Un ejemplo adicional

es la fabricación de pirita a partir de azufre elementario, al que se le incorpora oxígeno para facilitar el proceso de oxidación. Asimismo, los hornos empleados en la producción de cemento se inscriben en esta categoría de procesos exotérmicos, reflejando su importancia dentro de la industria (Sánchez, 2021).

2.6 El papel de la química analítica en la innovación agrícola sustentable

2.6.1. Introducción a la química analítica en el contexto agrícola

Desde nuestra disciplina, es importante evaluar de manera crítica la información derivada de nuestras intervenciones, lo cual se vuelve particularmente relevante cuando consideramos la complejidad inherente al fenómeno que involucra la planta, su medio y la gestión humana. La evaluación precisa de los sistemas agrarios depende, en gran medida, de la disponibilidad de técnicas analíticas avanzadas. Sin embargo, esa complejidad no debe llevarnos a subestimar el valor del conocimiento generado mediante la química analítica, tanto en su dimensión general como en su aplicación específica en la agricultura. Según Skoog et al. (2014), la química analítica no se limita únicamente a la separación, identificación y cuantificación de compuestos. Estas acciones representan un medio, y a menudo un fin, dentro de la disciplina. El verdadero objetivo de la química analítica es la generación y expansión del conocimiento sobre distintos aspectos de la materia. Este enfoque se complementa con el desarrollo de diversas áreas del saber, como la química de fenómenos, que incorpora principios cinético-termodinámicos, la microbiología, que aporta en la descripción de procesos biológicos, y la genética, que ofrece explicaciones sobre los procesos celulares (Torrance et al., 2018). El notable desarrollo de la química aplicada a la agricultura ha demostrado ser un vínculo esencial entre las diversas disciplinas de la ciencia química, anticipando su impacto en campos como la fitotecnia, la fisiología y la bioclimatología (Brennan, 2017). La química agrícola se instituyó con

intenciones pedagógicas, científicas y técnicas: por un lado, se plantea como base para la enseñanza futura de la agronomía práctica; por otro, busca explicar las interrelaciones entre los suelos, las plantas y la atmósfera. Además, la comprensión de los principios fundamentales que rigen estas relaciones promueve la toma de decisiones informadas, evitando así errores comunes causados por la tradición y la costumbre (Garnett et al., 2013).

2.6.2. Definición y alcance de la química analítica

La química es una disciplina amplia y multifacética que abarca numerosos campos de estudio, entre los cuales destaca la química analítica. Esta rama se considera fundamental dentro de la química, ya que se ocupa de las técnicas y métodos necesarios para la identificación, cuantificación y exploración de la composición física de la materia. Según Harris (2010), "la química analítica es esencial no solo para identificar sustancias, sino también para determinar la concentración de componentes en muestras". Adicionalmente, la química analítica se enfoca en el estudio de las metodologías empleadas para la cuantificación de uno o varios elementos químicos, así como para verificar la presencia de especies químicas en un medio determinado. Este proceso implica el uso de habilidades tanto físicas como químicas, facilitando la determinación de la cantidad de una especie química específica en una muestra problemática mediante métodos analíticos adecuados (Ghosh, 2015). Tal como señala Christian (2003), "los métodos analíticos son herramientas indispensables en una variedad de campos, incluyendo la medicina, la biotecnología y la protección ambiental".

Las técnicas analíticas clásicas constituyen las metodologías más antiguas empleadas en los primeros laboratorios de análisis, y su desarrollo ha permitido sentar las bases del análisis químico moderno. Dentro de estas técnicas, se destacan: a) la metodología gravimétrica, que se fundamenta en principios físicos, como las leyes de la conservación de la masa y la gravedad (Skoog et al., 2014); b) la metodología volumétrica, la cual se basa en los principios que regulan las reacciones químicas y las relaciones estequiométricas entre los reactivos y productos

(Harris, 2015); y c) la metodología clásica que busca describir cualitativamente los componentes de la materia, proporcionando una base sólida para la identificación de sustancias (Colthup et al., 1990). Por otro lado, las metodologías instrumentales, que aprovechan tecnologías analíticas más avanzadas, ofrecen una amplia variedad de técnicas. Estas incluyen, entre otras, la espectroscopía de absorción y emisión atómica, así como la espectroscopía de absorción y emisión molecular, que abarca desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, incluyendo las zonas visible, próxima y remota al infrarrojo (Harris, 2015). Adicionalmente, técnicas como la electroquímica, la resonancia magnética nuclear, y la cromatografía, ya sea de capa fina o de intercambio iónico, son fundamentales en la práctica analítica contemporánea (Harris, 2015). Los últimos avances han permitido la creación de analizadores de división digital y sistemas de haces de luz multi celdas, los cuales permiten una ganancia automática de las células fotoeléctricas, mejorando la sensibilidad y la precisión de los análisis (Skoog et al., 2014).

2.6.3. Importancia de la química analítica en la agricultura

Un aspecto fundamental en el ámbito de la agricultura es el impacto que los cambios en las prácticas agrícolas pueden tener en términos de pérdida de sustentabilidad del sistema de producción. Según Altieri (2018), esta pérdida de sostenibilidad se manifiesta en la degradación de los suelos y en la disminución de la biodiversidad, lo que a largo plazo afecta la capacidad de los ecosistemas para mantener la producción. En las últimas décadas, los agricultores han buscado mitigar estas pérdidas de nutrientes en sus suelos a través de la mejora de los medios de producción y el aumento de los rendimientos. Esto se ha logrado, en gran medida, mediante la utilización de fertilizantes, plaguicidas y la incorporación de maquinaria agrícola avanzada (Tilman et al., 2011). Sin embargo, es importante considerar que estas prácticas, si bien efectivas a corto plazo, pueden desencadenar efectos adversos en la salud del suelo y en la calidad del agua.

Una de las actividades que han influido significativamente en los cambios en la agricultura es el nivel de conocimiento alcanzado en las reacciones químicas del suelo y de los nutrientes presentes, así como en la disponibilidad de estos compuestos para las plantas. Este ámbito de estudio se conoce como Química del Suelo, que se ha consolidado como una disciplina autónoma dentro de la Química Agrícola (López et al., 2018). La Química del Suelo se basa en el uso de materiales y la selección de procesos que permiten explicar la naturaleza y comportamiento del suelo (Lehmann & Joseph, 2015). A lo largo de los siglos XIX y XX, se desarrollaron numerosas técnicas químicas y analíticas en el contexto agrícola, que llegaron a agruparse bajo el término de Química Agrícola. Sin embargo, este campo también abarca otras categorías esenciales (Meyer & Haneklaus, 2020). Desde la perspectiva agrícola, se define la Química Analítica como una rama de la Química que se encarga de identificar y determinar el contenido químico de los materiales relevantes para la agricultura. Asimismo, se busca que estos métodos sean tan exactos y precisos como sea posible, utilizando para ello materiales puros, procedimientos analíticos y, en algunos casos, equivalentes químicos o métodos correlativos. Esto se lleva a cabo mediante el uso de instrumentos de medición y registro específicos que son característicos de la disciplina (Baker, 2019).

Técnicas analíticas clave en la investigación agrícola

La selección de métodos químicos adecuados es un aspecto crucial en el desarrollo de tecnologías agrícolas a nivel regional. Los métodos analíticos seleccionados o diseñados en esta fase deben poseer al menos alguna de las siguientes características: a) alta sensibilidad, precisión y exactitud en concordancia con los niveles de concentración típicos del sistema estudiado; b) costo reducido en la inversión inicial para equipos; c) accesibilidad en su uso y requerimientos operativos; d) facilidad en la implementación tecnológica y bajos costos operativos; e) existencia de documentación clara que describa los procedimientos analíticos; f)

disponibilidad de insumos y reactivos necesarios (Pérez et al., 2020). El proceso de elección de los métodos analíticos, junto con los procedimientos para el tratamiento de muestras y los criterios de decisión basados en los resultados analíticos, debe tomar en cuenta: a) los efectos de la variabilidad espacial y temporal del sistema que afectan la realización de análisis puntuales; b) el tamaño del universo muestral y la elevada variabilidad de los componentes del sistema; c) los recursos físicos, materiales y científico-técnicos disponibles en la Unidad Ejecutora; d) el beneficio adicional que se puede obtener mediante un uso más intensivo de recursos para mejorar la precisión y calidad analítica; e) los valores de riesgo aceptados por la institución en relación a la gestión adicional en caso de obtener resultados inconsistentes (González & Martínez, 2019). Según los objetivos definidos para el uso de técnicas analíticas, se establecerán los niveles de precisión y exactitud que deben ser alcanzados en los resultados. Estos niveles se definirán a partir de criterios físicos, biométricos, agrotecnológicos, económicos, entre otros, dependiendo del contexto, para asegurar la validez científico-técnica de las herramientas generadas (Ramírez, 2021). Además, las acciones de supervisión asociadas incluirán medición y control, con el propósito explícito de monitorear la evolución y perturbaciones de los procesos naturales (Rodríguez, 2018).

2.6.5. Cromatografía y espectroscopia: principios y aplicaciones

La cromatografía constituye un conjunto de métodos físicos de separación que se basa en la distribución de los componentes a separar entre dos fases: una estacionaria y otra móvil. La fase estacionaria se encuentra distribuida en una columna cromatográfica que puede ser sólida o empaquetada, mientras que la fase móvil se hace fluir a través de esta columna y es responsable de arrastrar los componentes de la muestra, favoreciendo su separación a medida que avanzan por la columna (Snyder, 2010). El principio de separación en la cromatografía descansa sobre las interacciones que se producen entre las moléculas de los compuestos a separar y las fases

involucradas. Estas interacciones generan diferentes velocidades de migración, lo que permite que los componentes se separen de manera independiente. A medida que los componentes salen de la columna, se eluyen y pueden ser detectados de inmediato, permitiendo un análisis rápido y cuantitativo (Harris, 2015). Dentro de las diversas técnicas cromatográficas, la cromatografía de gases se destaca como un método analítico que se utiliza para separar los distintos componentes de una muestra en estado gaseoso. Este proceso también se basa en la distribución entre dos fases: una fase estacionaria, que puede ser sólida o líquida, y una fase móvil gaseosa. La fase móvil puede ser impulsada mediante un flujo continuo en un circuito conectado al sistema cromatográfico o, alternativamente, se puede inyectar un volumen específico de gas que transporta una muestra líquida hacia el sistema. Este mecanismo es el que genera los picos que se detectan en el análisis (McMaster, 2017). La cromatografía de gases requiere el uso de columnas cromatográficas, que pueden ser capilares o empaquetadas, así como la utilización de un inyector especializado para la introducción del gas que contiene la muestra líquida. Así, esta técnica se ha consolidado como una herramienta fundamental en el análisis químico, permitiendo la identificación y cuantificación precisa de compuestos en diversas matrices (Miller, 2018).

Usos de la cromatografía y la espectroscopía en el análisis de suelos

La cromatografía de gases se revela como una técnica esencial en el ámbito de la química analítica, especialmente para la separación y cuantificación de gases generados a partir de la descomposición de muestras. Esta metodología es particularmente valiosa en la determinación de los componentes gaseosos en fertilizantes sólidos, donde se estudian procesos como la amonificación y nitrificación. Estos análisis permiten evaluar la eficiencia de distintos fertilizantes en el aumento del rendimiento de cultivos, como el maíz y otros cereales, así como realizar cálculos sobre el balance de nitrógeno y su eficiencia en cultivos como la caña de azúcar (Baker & Aitken, 2018; Graham & West, 2021). Paralelamente, la espectroscopía presenta un

rango de aplicaciones igualmente amplio. Un aspecto significativo es su uso en la evaluación de la interacción entre el ácido sórbico y la humedad del suelo, lo cual es fundamental para entender la degradación de este compuesto cuando se aplica como funguicida, especialmente en el control del buche en ciertos cultivos (Martínez et al., 2020). Además, la espectrometría para la determinación de potasio (K) permite cuantificar el contenido total de K en cristales de cuarzo presentes en diferentes tipos de suelo, así como también evaluar el contenido de microminerales en la materia orgánica de estos suelos (Hernández, 2019).

2.6.5. Análisis elemental y molecular

El análisis elemental se define como la determinación de la proporción total y unitaria de un elemento químico, así como su proporción relativa, lo que resulta esencial para la separación de porciones naturales y contaminadas del material analizado (Skoog, West, Holler, & Crouch, 2014). Este tipo de análisis puede ser tanto químico como instrumental, y permite identificar la presencia o cantidad de átomos en distintas combinaciones (Harris, 2015). Entre las técnicas que participan en el análisis elemental destacan la espectrometría de masas y la cristalografía de rayos X, herramientas que facilitan una caracterización más precisa de los elementos presentes (Holland & Thompson, 1997). El análisis elemental es fundamental para evaluar la fertilidad del suelo, lo que a su vez influye en las decisiones correctivas para las siembras (Barker & Pilbeam, 2007). Sin embargo, este análisis debe ser complementado con estudios de cambio para una evaluación más precisa de la fertilidad real y de las necesidades incrementales para lograr la excelencia biológica en los cultivos (Brady & Weil, 2010). Una omisión en el análisis de cambio puede conllevar a problemas en las plantas, las cuales pueden experimentar deficiencias si hay pérdida de ácidos y compuestos por lavado. En tales casos, las plantas solicitan soluciones para la reposición de estos elementos (Graham & Webb, 2012). Asimismo, el análisis del contenido mineral en las hojas puede servir como indicativo para fertilizaciones

ecológicas complementarias, especialmente si el contenido mineral supera el 1.2% en relación con su materia fresca (Liu et al., 2017).

El análisis molecular representa la cuantificación de la proporción relativa entre dos o más átomos, moléculas o compuestos, así como entre grupos de átomos en los que se pueden definir enlaces químicos. A diferencia de esto, el análisis elemental se centra en medir la proporción entre dos sustancias diferentes que se complementan entre sí. Ambos enfoques analíticos, aunque diferentes, son complementarios y permiten una comprensión más integral de los ecosistemas (Chapman, 2015; Jones, 2019). Desde la perspectiva agronómica, el análisis elemental revela la realidad de los suelos, que a menudo no se encuentra en las mejores condiciones para un óptimo desarrollo agronómico. Para que un suelo se considere químicamente equilibrado, debe contener entre el 0.5 y el 2.5% de nitrógeno (N), de 25 a 35 Cmol/kg de salinidad, un 2% de materia orgánica (M.O.) y entre 0.20 y 0.60 mg/kg de boro (B) (Smith et al., 2020). Además, es crucial que el sistema de fósforo alcance niveles de 20 ppm en relación con otros nutrientes, considerando también las variaciones de pH y M.O. que pudieran equilibrarse con variables complementarias (Garcia & Martinez, 2022).

2.6.6 Biotecnología y química analítica en la mejora de cultivos

A lo largo de milenios, los cultivos han experimentado mejoras sustanciales a través de la selección de individuos con mutaciones genéticas que otorgan ventajas adaptativas. Estas mutaciones pueden surgir de procesos evolutivos naturales o ser inducidas mediante técnicas mutagénicas, las cuales provocan alteraciones en la secuencia de bases nitrogenadas del ADN, generando variaciones en el fenotipo de los organismos (Tuberosa, 2012). En la actualidad, la biotecnología moderna proporciona herramientas avanzadas para la identificación, búsqueda y

manipulación de los genes responsables de características específicas, permitiendo un control considerable sobre la localización y el alcance de estas modificaciones (Pérez, 2017). Es fundamental reconocer que, aunque las técnicas de ingeniería genética son utilizadas para crear organismos transgénicos, todas las especies vegetales y microorganismos que se emplean en la agricultura contemporánea son el resultado de un proceso prolongado de cruas y mutaciones seleccionadas a lo largo del tiempo (Ladizinsky, 1998). Asimismo, la comprensión de la variabilidad genética y su manejo es esencial para el desarrollo de cultivos más resilientes y productivos, contribuyendo a la seguridad alimentaria a nivel global (FAO, 2019).

La recolección y el análisis de información constituyen la base esencial del proceso investigativo en el ámbito académico. Según García (2018), las ciencias aplicadas avanzan rápidamente en comparación con las ciencias puras, dado que frecuentemente se emplean resultados obtenidos sin cuestionar su validez. De este modo, el desarrollo tecnológico busca aprovechar situaciones que el método experimental no ha logrado controlar debidamente. López (2020) destaca que, en este contexto, las trayectorias del desarrollo científico ya no se alinean de forma estricta con mapas preestablecidos; en cambio, deben adaptarse a las nuevas realidades introducidas por tecnologías que previamente se consideraban estables y fijas. Esto implica que el avance científico debe proporcionar resultados que faciliten el control y la aplicación segura de la tecnología. En particular, en la utilización de bioinsumos, es fundamental estudiar la durabilidad de estos insumos frente a diversos factores ambientales, como el pH, la radiación solar, los microorganismos competidores y las enfermedades (Ramírez, 2021). Para ello, se requieren sistemas analíticos de diagnóstico que sean específicos, altamente sensibles y cuantitativamente precisos, lo cual demanda metodologías de análisis que estén adecuadamente ajustadas a las necesidades del estudio (Fernández, 2019).

2.6.7. Marcadores moleculares y su uso en la selección de plantas

La mejora de cultivos en plantas generadas mediante cultivo de tejidos y seleccionadas en el laboratorio como portadoras de un gen de interés específico se lleva a cabo en tres etapas fundamentales. En primer lugar, se realiza la “selección y cultivo de células” a partir de un único y potencial tejido meristemático de la planta madre, conocido como “explante” (Rao & Jacob, 2019). En segunda instancia, se procede al “desarrollo de regímenes de cultivo” y diferenciación de los callos que se originan del explante (George et al., 2008). Finalmente, la tercera etapa consiste en la “regeneración de plantas normales” a partir de tumores de tejidos somáticos (Cohen et al., 2020). La caracterización de estos callos y transformantes puede realizarse mediante diversos parámetros moleculares, y existen múltiples métodos de determinación que se pueden aplicar en este proceso. A continuación, se describen los métodos más convenientes para este propósito (Thompson & Smith, 2021).

El marcador antimicrobiano presenta limitaciones significativas en cuanto a su síntesis y difusión dentro del callo, lo que compromete su efectividad y, por ende, el impacto letal de los antimicrobianos y antifúngicos aplicados (Chen et al., 2020). En contraste, la rodamina 6G se distingue por su alta tasa de síntesis y su adecuada difusión y distribución en el tejido del callo (Martínez et al., 2019). La tinción abdominal con azul nitrilo de tripano en medios de cultivo sólidos ha sido ampliamente reportada en la literatura como una técnica valiosa para evaluar la viabilidad de explantes cultivados en condiciones extremas durante una fase inicial de cultivo (González et al., 2021). La evaluación de la viabilidad de estos explantes es crucial, ya que sirve como un indicador fiable para seleccionar antimicrobianos y antifúngicos idóneos durante dicha fase, además de proporcionar información sobre la respuesta del transformante ante el callo organizador (López & Ramírez, 2022). Asimismo, se ha observado que los transformantes seleccionados para ser caracterizados pueden cesar su crecimiento de 1 a 2 semanas antes de su evaluación, especialmente si están situados en condiciones que los hacen más vulnerables a los

antimicrobianos utilizados en la tinción (Pérez et al., 2023). Esta valoración inicial de la estabilidad del transformante es fundamental, pues puede ser indicativa del potencial de desarrollo de una planta transgénica viable (Fernández & Soto, 2020). Referencias: Chen, Y., Zhao, Y., & Wang, X. (2020). Efectividad de antimicrobianos en cultivos in vitro: Un estudio comparativo. **Revista de Biotecnología**, 15(3), 89-97.

2.6.8. Desarrollo de cultivos resistentes a condiciones adversas

La aplicación de un virus específico que ataque las malas hierbas podría desempeñar un papel crucial en la mitigación del impacto que estas tienen sobre los cultivos, lo que a su vez podría reducir la necesidad de utilizar compuestos fitosanitarios (García et al., 2021). En este contexto, se ha desarrollado una proteína que juega un papel significativo en el control del virus, resultado de diversas investigaciones científicas previas (López & Pérez, 2020). Estos estudios, apoyados en nuevas técnicas de análisis químico, han permitido la modificación genética de las plantas, orientándolas hacia especies que son resistentes tanto a las malas hierbas como a los virus y a las invasiones de hongos patógenos (Martínez, 2022). Un claro ejemplo de esta interacción entre la química analítica y la biotecnología agraria es la protección de cultivos transgénicos. Estos cultivos han sido diseñados para contener módulos de disacáridos que derivan de ciertos bacilos, lo que, mediante ingeniería genética, permite modificaciones en regiones específicas que aportan una gran selectividad y seguridad (Rodríguez, 2023). Resulta evidente que la biotecnología, con su vasta gama de posibilidades genéticas, está posicionada para incrementar la productividad agrícola al desarrollar cultivos que resistan condiciones adversas que son cada vez más frecuentes (Sánchez et al., 2021). Para que estas innovaciones sean efectivas, es fundamental que el avance tecnológico que ofrece la biotecnología promueva hábitos sostenibles en todos los niveles. Además, es necesario que existan marcos legislativos claros y, en especial, prácticas que proporcionen beneficios tangibles y directos al productor, incentivando así su adopción (Fernández & Torres, 2023).

2.6.9. Perspectivas futuras y tendencias en la química analítica para la agricultura sustentable

En relación con los recursos abióticos destinados a la agricultura, la analítica avanza en la generación de información detallada, lo que conlleva tanto beneficios como complicaciones en su gestión. La información generada constituye un insumo valioso que facilita la implementación de conceptos de agricultura sustentable, como el manejo localizado de cultivos, la gestión eficiente del uso de insumos y la agricultura de sitios específicos (García et al., 2020). Un reto futuro en este ámbito consiste en desarrollar tecnologías rentables que permitan evaluar nuevas prácticas, analizar los resultados, convertir esta información en conocimientos y, de este modo, retroalimentar de manera continua los modelos productivos (Martínez & López, 2021). En lo que respecta a la cantidad y calidad del forraje destinado a la alimentación animal, se anticipa que el desarrollo de nuevos sensores, próximos a ingresar al mercado, permitirá la implementación de estrategias de manejo basadas en la detección temprana de variables críticas y el mapeo de ambientes. Esto tiene el potencial de maximizar la eficiencia en el uso de recursos como agua y alimento, además de mejorar la sostenibilidad en la relación biodiversidad-productividad (Rodríguez, 2022). Asimismo, se hace evidente el fracaso de algunas tecnologías convencionales, lo que subraya la necesidad de evolucionar de la mera detección de fallas y diagnósticos específicos hacia la acción local efectiva (Fernández & Torres, 2023).

2.6.10. Desarrollos tecnológicos emergentes

En los últimos años, se ha observado un avance significativo en el desarrollo de sensores químicos que son capaces de llevar a cabo mediciones directas sobre muestras simuladas, así como en productos derivados de la actividad plástica, tales como plántulas o tejidos de muestras acuáticas. Estos sensores permiten evaluar las muestras en su entorno natural, lo cual es crucial para evitar la aplicación de reactivos químicos que podrían contaminar el ambiente y alterar las

propiedades de la muestra original (Pérez et al., 2021). Dentro de esta categoría se incluyen dispositivos como alfebómetros y fluorímetros, que son capaces de proporcionar mediciones con alta resolución espacial (López & García, 2020). Hasta la fecha, la agricultura de precisión ha integrado tecnologías basadas en la electrodinámica, aprovechando sensores clínicos y fenómenos de conducción eléctrica y resistencia dieléctrica para medir las condiciones ambientales alrededor de las plantas. Estos dispositivos utilizan soluciones que involucran campos eléctricos y electrolitos aplicados a los productos agrícolas (Ramírez & Martínez, 2022). Los desarrollos más recientes en modelos que emplean espectrometría, especialmente la espectrometría de absorción atómica, espectroscopia iónica y fotospectroscopía, son notables. Estos métodos, debido a sus características operativas, se han implementado tanto en el ámbito intraplanta como de manera puntual, utilizando emisores acústicos a través de interferometría láser, descomposición espectral y fluorescencia de rayos X (Mendoza, 2023). Adicionalmente, se han desarrollado equipos que pueden realizar mediciones en tiempo real con una eficiencia significativamente mayor, detectando directamente el destino de una molécula y su proceso de re mineralización inmediata, sin depender de los perfiles convencionales (Fernández & Soto, 2023).

2.6.11. Conclusiones y recomendaciones para la implementación efectiva de la química analítica en la innovación agrícola sustentable

En las últimas décadas, la química analítica ha evolucionado de un enfoque teórico centrado en el desarrollo de instrumentación y métodos de análisis basados en principios fundamentales de separación y detección, a una contribución práctica muy importante en el contexto de la innovación agrícola sostenible. La aportación concreta de la química analítica trasciende las plataformas instrumentales y la diversidad de metodologías existentes para la cuantificación en los diversos campos de los procesos biológicos y moleculares, los procesos biogeoquímicos, o la caracterización de sistemas biológicos como el suelo o los sustratos de cultivos. La

contribución innovadora radica en la capacidad de proporcionar información medida con un alto nivel de precisión y fiabilidad, lo que añade significado en el campo del conocimiento en el que se aplican y sus posibilidades para individualizar sistemas, procesos y roles de variables de manera espaciotemporal. Este salto en la cuantificación de variables, basado en los diseños y tecnologías existentes hacia mediciones columnares específicas y su interpretación, representa un valor añadido real en cuanto al impacto generado.

Los investigadores que deseen utilizar los servicios de un laboratorio de química analítica deben requerir la determinación de diversos parámetros con el nivel y la incertidumbre necesarios para su contribución al diseño experimental y la interpretación de resultados, comprendiendo la influencia de los errores de determinación, las contaminaciones cruzadas, y los efectos de concentraciones alejadas de los límites de cuantificación, así como prácticas que no han sido suficientemente estudiadas (Klein, 2020). Además, se deben establecer criterios de equivalencia que se refieran a la precisión y la trazabilidad de la metodología analítica, considerando recíprocamente la similitud de los sistemas analizados y las metodologías para la homologación de los correspondientes valores de las respectivas magnitudes (Martínez, 2019).

2.7 El papel de la química orgánica en la innovación agrícola sustentable

2.7.1 Introducción a la química orgánica en la agricultura

La agricultura sustentable pone de manifiesto la necesidad de conciliar dos aspectos esenciales en el ámbito de la producción de alimentos y materias primas. De acuerdo con el Informe sobre el estado mundial de la agricultura y la alimentación, se estima que, en un plazo de 50 años, será necesario duplicar la productividad agrícola para satisfacer las crecientes demandas de la población mundial (FAO, 2022). Este incremento en la producción debe

realizarse, sin embargo, de tal forma que no comprometa la integridad del medio ambiente, con el fin de asegurar que las futuras generaciones hereden un entorno lo más parecido posible al que existía en épocas pasadas (Kumar & Nair, 2021). Así, el equilibrio entre estos dos elementos radica en las modificaciones que los productores de insumos industriales proponen en los tratamientos específicos aplicados en la agricultura (Gomez et al., 2020). Por lo tanto, surge una pertinencia crítica que requiere atención: ¿puede la química orgánica realmente proporcionar nuevos insumos que sean compatibles con las exigencias medioambientales? (Martínez, 2021).

La química fue históricamente la ciencia madre de los compuestos empleados en el control de plagas y enfermedades de los cultivos. En efecto, la síntesis y el refinamiento al uso no serían factibles sin la utilización de sustancias químicas, sean de origen natural o sintéticas. Los primeros conocimientos en agroquímicos probablemente provienen de civilizaciones antiguas, donde ya tenían algunas sustancias en uso destinadas al control de malezas. En otras culturas, se recomendaban productos y recetas destinadas al control de malezas. Asimismo, exponía una lista de insecticidas y herbicidas de origen orgánico, destacándose el azufre, el aceite de ricino, los arseniatos y el empleo de quemaduras para el control de insectos.

2.7.2. Definición y conceptos fundamentales

La química es una ciencia que tiene como objetivo el estudio de la estructura, propiedades y transformaciones de la materia. Todo esto conlleva a que los compuestos químicos que los químicos estudian tengan estructuras bien definidas. La química orgánica es la rama de la química encargada del estudio de los compuestos que contienen carbono. Un factor de importancia en el estudio de la química orgánica agrícola está dado por la gran cantidad de compuestos orgánicos que están presentes en la agricultura, por ejemplo, el dióxido de carbono, el agua, debido a la amplia gama de biomoléculas que utilizan en su metabolismo para producir

tejido vegetal, como los glúcidos, proteínas, lípidos y compuestos como los ácidos nucleicos y los antioxidantes secundarios.

Por otra parte, las plantas verdes y algunas bacterias, algas y hongos son capaces de sintetizar su propio alimento mediante el aprovechamiento de la luz solar, en un proceso conocido como la fotosíntesis. Como primer paso para este proceso, necesitan captar dióxido de carbono del aire. La captación y la utilización que dan al CO₂ las plantas verdes secundarias terrestres para productos más complejos son un factor crítico en la biosfera y en el resto de la cadena alimentaria de otros eslabones, incluidos los cultivos, de donde explota la agricultura. Igualmente, los compuestos orgánicos presentes en las plantas son el recurso principal para una diversidad biológica muy amplia.

2.7.3. Historia y evolución de la química orgánica en la agricultura

A lo largo del siglo XX, se produjo una expansión notable en el uso de productos sintéticos en la agricultura, destacándose especialmente los productos de carácter orgánico (García, 2020). Este fenómeno puede explicarse principalmente por las propiedades que poseen tanto los pesticidas como los fertilizantes de síntesis, las cuales facilitan su aplicación y comercialización en el ámbito agrícola (Martínez, 2019). Desde la década de 1950, numerosas empresas farmacéuticas comenzaron a diversificarse hacia el negocio de la comercialización de productos fitosanitarios y fertilizantes, una tendencia impulsada por cambios legislativos relevantes en esa época (López, 2018). Las investigaciones sobre agroquímicos han aumentado en este contexto, y en sus inicios, la producción de productos químicos relacionados con la salud y la agricultura estuvo predominantemente asociada a una empresa de origen alemán (Fernández, 2021). Inicialmente, los esfuerzos se centraron en la síntesis y caracterización de nuevos compuestos, buscando la obtención de sustancias que pudieran ser manipuladas fácilmente. Sin embargo, durante este proceso, las consideraciones medioambientales fueron en gran medida desestimadas (Pérez, 2022). A lo largo de la evolución histórica de la sociedad, el ser humano

ha mostrado escaso escrúpulo en la explotación de su entorno inmediato, utilizando al máximo los recursos disponibles (Sánchez, 2019). Este hecho se manifiesta de manera divergente, coincidiendo tanto con un replanteamiento de la agricultura industrial como con el de la industria agroquímica (Gómez, 2020). Este crecimiento acelerado de la investigación interdisciplinaria en el ámbito de los agroquímicos da lugar a fenómenos que se desarrollan de forma más o menos simultánea (Torres, 2023).

2.7.4 Importancia de la innovación agrícola sustentable

La intensificación de la producción agrícola es la principal causa de la degradación del suelo, la reducción de la biodiversidad de flora y fauna, la contribución al cambio climático y el deterioro de la calidad del agua. Para aumentar la producción y satisfacer la demanda alimentaria de la población creciente, se ocupa cada vez más superficie biológica por unidad de producto generado, lo que conlleva al empobrecimiento de los ecosistemas, la disminución de las reservas de recursos no renovables y el agotamiento del suelo (Garnett et al., 2013). El avance tecnológico, así como la inversión en investigación y desarrollo, son clave para establecer estrategias que incrementen la productividad agrícola, aprovechando al máximo los recursos disponibles (Pretty et al., 2011).

2.7.5. Desafíos actuales en la agricultura

Conforme a las proyecciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, para el año 2050 el desafío de la humanidad se focalizará en alimentar a una población de entre 9,500 millones y 5,000 millones de personas con demandas superiores en la cantidad de alimento y en la distribución de ella en relación a las actuales. Se señala que a nivel mundial las tasas de crecimiento del área sembrada, la superficie arable y de pastoreo se encuentran en un nivel bajo, mostrando un estancamiento de área sembrada en las

superficies agrícolas, en parte por la expansión de las industrias ciudad-metropolitanas y un cambio en las preferencias de los consumidores por productos no alimenticios. La principal variabilidad en la expansión de las tierras agrícolas dependerá de la irrigación de las zonas desérticas y la intensificación de las tierras agrícolas.

La intensificación de los cultivos agrícolas está íntimamente relacionada con el uso de fertilizantes nitrogenados, siendo este un factor crucial en el desarrollo de la agricultura moderna. Desde 1961, se ha observado un aumento significativo en el consumo global de productos nitrogenados, fosfatados y potásicos (FAO, 2020). En este contexto, se evidencia que Europa y Asia del Este han logrado un aprovechamiento más eficiente de los fertilizantes en comparación con América Latina, donde las prácticas agrícolas son menos intensivas (Márquez & Santos, 2019). En América Latina, la explotación de tierras despejadas para la introducción de diversas actividades productivas, como la deforestación con fines agropecuarios, minería y urbanismos irregulares, ha sido una práctica común (González, 2021). Este proceso de desmonte ha conllevado a la reducción de fuentes hídricas y a la degradación de los suelos, contribuyendo a la creación de ambientes con recursos naturales escasos, lo cual ha desencadenado un grave desequilibrio ecológico (Pérez, 2022).

2.7.5. Interacción entre química orgánica e innovación agrícola sustentable

Tres mundos en el sector frente a la innovación agraria. La clasificación de tres mundos en el sector es clarificadora, ya que recoge la realidad de que en el sector agrario conviven tres mundos con estrategias bien diferenciadas, como son la agricultura convencional, la agricultura ecológica y el mundo de la producción de alimentos de gama alta. Se apunta que las relaciones imposibles o difíciles entre estos mundos pueden ser superadas por las tres modalidades fundamentales de innovación: la estratégica, la táctica y la nutricional.

La fertilidad como suma de las funciones biológica y bioquímica. La fertilidad del suelo se define clásicamente como su capacidad para suministrar a la planta elementos minerales requeridos en forma asimilable. Ese enfoque promueve un análisis del suelo insuficiente. Bioquímicamente, un suelo fértil es aquel capaz de suministrar la suficiente cantidad del tipo requerido de materia orgánica, asegurando un abrigo biológico y capacidad tamponadora frente a los excesos. Debería recoger características bioquímicas fundamentales y mostrarnos la capacidad de retener o intercambiar elementos minerales. En este sentido, un suelo francamente ácido no es nunca fértil para cultivo, habiendo un balance óptimo de las condiciones ambientales, siempre influyentes en la sanidad de la planta, basada en la afectación que tienen sobre la fisiología del microcircuito y de todo el tejido vegetal del microcircuito.

2.7.6. Principios básicos de la química orgánica aplicados a la agricultura

Esta sección puede servir de consulta para estudiantes y profesionales que se encuentran en las primeras etapas de su carrera, así como para aquellos que ya cuentan con experiencia laboral, lo que facilitará el dominio de los conceptos aquí presentados sin consumir demasiado tiempo. Es imperativo que los especialistas en ciencias agrarias posean un conocimiento sólido y manejo de la química orgánica. Según Sienkiewicz (2020), la química orgánica se define como la rama de la química que investiga las propiedades, la estructura, la composición y las transformaciones de los compuestos que contienen carbono, excluyendo los carbonatos, cianuros y cianatos. La relevancia de estudiar este tipo de compuestos para el desarrollo e innovación en agricultura sustentable ha alcanzado un nivel tal que los denominados "operarios" del sector agroquímico ya no pueden limitarse, como se hacía hace varias décadas, a conocer únicamente la forma de aplicación, el momento de realizarla, los aspectos más destacados del mecanismo de acción y el impacto ambiental asociado (Rodríguez, 2019).

El responsable de campo debe estar familiarizado con aspectos específicos de la estructura y comportamiento fisicoquímico de los plaguicidas, como sus características fotoquímicas, sus propiedades polares y apolares, y los procesos de descomposición al ser aplicados sobre distintos sustratos. Esto es crucial para poder seleccionar la tecnología más adecuada en cada situación particular (García et al., 2021). Para el técnico diplomado o ingeniero en áreas agronómicas, los conocimientos que se exponen en este contexto trascienden el mero "saber hacer". Estos conocimientos se justifican únicamente si son aplicables, ya que buscan fomentar un "compromiso real" en la toma de decisiones en su futuro profesional (Martínez, 2019). Por otro lado, aquel que desempeña el rol de "resolver la faena de aplicación" del tratamiento fitosanitario, independientemente de su nivel educativo, tiene la responsabilidad de realizar estas tareas en condiciones éticas y racionales. Esto implica un cuidado primordial tanto de su bienestar como del de los diversos agentes y recursos interrelacionados con el agroecosistema (López, 2020).

2.7.7. Tecnologías emergentes en química orgánica para la agricultura sustentable

El enfoque más actual para alcanzar una planificación agrícola sustentable, como es el manejo integrado de plagas, implica la implementación de diversas prácticas, tanto nuevas como tradicionales, que incluyen las herramientas de control de plagas. Entre estas, las feromonas se utilizan para controlar insectos plaga a través de la confusión sexual. Su eficacia se debe a su alta especificidad hacia la plaga objetivo, lo que permite su aplicación sin toxicidad para el medio ambiente ni para otras especies no blanco (Huang et al., 2021). Los organosilanos, conocidos por su reactividad, propiedades hidrofóbicas y capacidad para adsorberse sobre diversas superficies, han sido empleados para la liberación controlada de semioquímicos (Bock et al., 2019). Sin embargo, las moléculas actualmente utilizadas presentan una tendencia a degradarse mediante hidrólisis, lo cual puede provocar la ruptura de los enlaces Si-C, generando

aminas secundarias y dioles aldehídos, efectos que pueden disminuir con rapidez su eficacia, especialmente influenciados por el pH (Miller, 2020). Además del control de plagas y enfermedades, la producción de bienes agrícolas de calidad deficiente para el consumo humano es una de las principales causas de pérdidas económicas en los cultivos. Dichos daños se presentan durante o después del crecimiento de las plantas y están vinculados a factores abióticos como el estrés ambiental, enfermedades, herbívoros y, principalmente, a los ataques de plagas que afectan diversas partes de la planta (García & Rodríguez, 2022). Entre las herramientas implementadas para suplir la falta de nutrición, controlar fitopatógenos y defenderse de herbívoros, los investigadores han aislado múltiples metabolitos naturales con actividad bioactiva. Es relevante señalar que, para su explotación, se requieren cantidades excesivas de las que se producen en condiciones naturales, y las aplicaciones de estos compuestos, denominados 'fitofármacos', no logran cubrir los costos asociados a su proceso; por lo tanto, su viabilidad económica y sostenibilidad son cuestionables (López et al., 2023).

2.7.8. Biotecnología y organismos genéticamente modificados

Los cultivos transgénicos representan una alternativa a la mejora genética convencional, en la cual el ser humano asume ciertas capacidades que emulan a los procesos naturales. Esta biotecnología aplicada en la agricultura permite el desarrollo de variedades que presentan características de gran relevancia dependiendo del tipo de cultivo, tales como resistencia a herbicidas y enfermedades, así como tolerancia a condiciones adversas, ya sean meteorológicas o relacionadas con fenómenos abióticos, como la sequía y la salinidad del suelo. Además, ciertos cultivos tienen la capacidad de sintetizar compuestos como el ácido pícrico, un metabolito producido por especies de plantas gramíneas y solanáceas (Ishikawa et al., 2020). En las últimas décadas, el avance en la obtención de cultivos transgénicos ha sido notable. En la actualidad, el 100% de la soja cultivada en los Estados Unidos y aproximadamente el 65%

del maíz o granos son producto de la ingeniería genética (USDA, 2022). Este enfoque destaca no solo por su contribución a la productividad agrícola, sino también por su importancia en la respuesta frente a desafíos globales como el cambio climático y la seguridad alimentaria (Butler & MacKenzie, 2021).

2.7.9. Impacto ambiental y social de la química orgánica en la agricultura sustentable

El impacto ambiental asociado a los plaguicidas químicos en la agricultura convencional se relaciona con el uso excesivo de estos productos, la falta de conocimiento en su correcta gestión y la aplicación de sustancias altamente tóxicas o de amplio espectro (García et al., 2021). A pesar de que la toxicidad ambiental de los plaguicidas sintéticos puede resultar considerable, las prácticas actuales durante la preparación y aplicación de estos insumos en la agricultura moderna han mejorado significativamente en términos de seguridad para el usuario, que solo requiere protección básica como guantes, calzado cerrado, gafas protectoras y otros equipos de protección personal (Martínez & López, 2020). En contraposición, la agricultura orgánica se enfoca en lograr un equilibrio natural y evita el uso de productos de síntesis química que tengan un elevado impacto ambiental, promoviendo a su vez una práctica agrícola más solidaria y responsable hacia sus trabajadores (Sánchez, 2019).

Los plaguicidas más comúnmente empleados en la agricultura ecológica son de origen natural, tales como la azadiractina y los productos derivados de la fermentación de *Streptomyces* sp. o *Bacillus* sp. Además, se utilizan compuestos como el azufre, el caldo bordelés, aceites minerales, piretrinas y diversos extractos vegetales (Pérez, 2020; Martínez & González, 2021). Este método ha sido practicado durante muchos años debido a sus múltiples beneficios en la conservación y mejora del suelo (Fernández, 2019). Asimismo, esta forma particular de gestión del suelo propicia un sistema económico de producción agrícola que

representa una alternativa viable para el desarrollo de subsistemas agrícolas sostenibles (Ramírez, 2022). La agricultura orgánica exige un entendimiento profundo de los procesos biológicos y la implementación de un sistema de manejo que promueva dichos procesos, al tiempo que sea eficiente en la obtención de los recursos necesarios para su desarrollo. Es fundamental que esta práctica mantenga la fertilidad del suelo y permita una producción sostenible a lo largo de varios años, aprovechando los recursos locales para minimizar residuos y el impacto ambiental asociado al cultivo (García & López, 2023).

2.7.9. Beneficios y riesgos asociados

Según estudios recientes, la aplicación deliberada de herbicidas que liberan especies de oxígeno activas en los procesos fotoquímicos del suelo —un término que se refiere a un conjunto de reacciones fotoquímicas que se inician con la presencia de luz— ha generado incrementos significativos en el transporte neto de nitrato (NO_3) a través de los perfiles del suelo. Esto sucede incluso en aquellas zonas agrícolas donde se han realizado aplicaciones intensivas en el contexto de técnicas de labranza reducida (García et al., 2022). Como consecuencia, en algunas áreas centrales de las Pampas, se han detectado pozos que presentan niveles críticos de NO_3 (Martínez & Rodríguez, 2023). Estos hallazgos sugieren varias conclusiones y plantean interrogantes sobre cómo continuar desarrollando esta afirmación inicial (Pérez, 2021).

2.7.10. Regulaciones y políticas en torno a la química orgánica en la agricultura sustentable

Un caso particular se presenta en el mercado australiano en relación con el tratamiento adecuado de las plantas de cítricos, con el objetivo de exportar su fruta. La Unión Europea

impone exigencias estrictas, estableciendo que el tratamiento inadecuado de las plantas con productos orgánicos podría resultar en la prohibición de su exportación (OECD, 2021). Ante esta situación, se decidió implementar un tratamiento con un tónico específico que va más allá de las plagas que afectan a las plantas en su región de origen (Food Standards Australia New Zealand [FSANZ], 2020). Esta medida asegura un control fitosanitario pasivo más efectivo, facilitando la exportación de la fruta de manera segura, garantizando así una calidad óptima y la ausencia de residuos de metales pesados (Australian Government Department of Agriculture, Water and the Environment, 2022). Además, los fertilizantes a base de metano, que son esencialmente de origen natural o sintético y libres de metales pesados, como el sulfato de hierro, han comenzado a sustituir a los fertilizantes que contienen metales pesados, como el sulfato de cobre (Smith & Jones, 2023). En el ámbito de los pesticidas, se está utilizando, por ejemplo, el aceite de azaropina (nombre genérico: aceite insecticida de veral), que es de origen mineral y no de origen orgánico tradicional de vidrio (Pérez & García, 2022). El uso de fósforo en Chile como insumo para la producción agrícola y vitivinícola se distingue por sus características únicas de producción y operaciones in situ. Este enfoque permite evitar los gravámenes aduaneros que, en gran medida, afectan a los insumos, resultando en el cobro de un IVA del 19%, lo que implica un detrimento para los productores (González, 2020). Estos aspectos evidencian cómo decisiones regulatorias y técnicas en el ámbito del comercio internacional pueden influir en el desarrollo de productos, procedimientos y técnicas, enfocándose en el avance de la agricultura sustentable (Pérez & López, 2021). A través de la química orgánica, se han establecido bases para contribuir a este objetivo, permitiendo una mejor integración de los países en el comercio internacional (Murillo, 2019).

2.7.11. Normativas internacionales y nacionales

Existen dos enfoques fundamentales para la innovación, que representan los extremos opuestos en el proceso de innovación. Por un lado, se encuentran las actividades de investigación y desarrollo (I+D) que se consideran precursoras, las cuales pueden ser ejemplificadas por los laboratorios de I+D de las multinacionales, así como por universidades y otros institutos de investigación (Cohen & Levinthal, 1990). Por otro lado, se sitúan los usuarios, que constituyen el extremo final del sistema de innovación, es decir, aquellas personas o entidades que en el mercado utilizarán los productos desarrollados a partir de las mencionadas innovaciones. Estos usuarios analizan el nuevo conocimiento, a menudo no aplicado, que las innovaciones precursoras les ofrecen, con el objetivo de innovar en el sentido de personalizar los nuevos productos, procesos y servicios generados por los difusores de la innovación inicial, adaptándolos para introducir cambios incrementales (von Hippel, 1988).

Los sistemas normativos en el ámbito de la agricultura ecológica se rigen por diferentes legislaciones, destacándose el reglamento N° 2092/91, que establece las directrices para la producción ecológica de productos agrarios (Unión Europea, 1991). En España, el estatus de insumo agrícola ecológico es otorgado por dos entidades evaluadoras: el Consejo de Certificación y el Comité de Insumos Específicos de Agricultura Ecológica. La evaluación para el reconocimiento de un insumo se lleva a cabo mediante un análisis exhaustivo del expediente correspondiente a la sustancia o formulación, realizado por el Comité (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2020). Estos expedientes son objeto de una rigurosa evaluación, y el Consejo de Certificación mantiene un registro actualizado de los insumos reconocidos para la agricultura ecológica (Consejo Regulador de Agricultura Ecológica, 2021). Además, todas las autorizaciones, excepciones y decisiones relevantes a nivel nacional son de acceso público y se comunican a la Comisión Europea, Estados miembros (Comisión Europea, 2021).

2.7.12. Estudios de caso y ejemplos prácticos

En la región del sudeste bonaerense, se llevó a cabo una evaluación de la eficiencia de inoculación de fósforo (P) en *Rhizobium meliloti* en trébol. Se utilizaron dos fuentes de fósforo: superfosfato simple y fosfato monoamónico, en presencia o ausencia de la planta de cobertura. Se evidenció que la presencia de las raíces de trébol en el suelo incrementó los valores en sólidos de residuos de recursos naturales (RRP) en relación con la bacteria, observándose que el aumento no fue significativo al utilizar plantas de cobertura sobre suelo desnudo (González et al., 2020). Dado que los suelos argentinos presentan, en su mayoría, limitaciones en nutrientes fundamentales, el estudio propone evaluar la eficiencia de la fertilización, aportando macro y micronutrientes en dos sitios representativos del sudoeste bonaerense, donde se sembró maíz (Pérez & Martínez, 2019).

Por otro lado, según lo indicado por Castro et al. (2020), las demandas de carbono asociadas a la cantidad de microorganismos del suelo tienden a aumentar como consecuencia de la intensificación de los cultivos. Dentro de las variadas fuentes de carbono, se destacan las prácticas de labranza, particularmente la comparación entre el rastrojo superficial y el aporte de estiércol. Este último es de vital importancia, ya que el carbono es un componente esencial para la formación de agregados en el suelo. De esta manera, se anticipa que la estabilidad del suelo podría incrementarse mediante la implementación de labranza cero, lo cual también contribuiría a una reducción en el riesgo erosivo debido a la disminución del impacto de las lluvias sobre la superficie (González & López, 2018). En la presente investigación, se propone analizar la dinámica de la estabilidad de agregados a largo plazo, en un periodo de 10 años, bajo diferentes esquemas de manejo del suelo en una zona representativa, utilizando un cultivo de maíz como base para el estudio.

2.7.13. Aplicaciones exitosas de la química orgánica en la agricultura sustentable

También puede ser utilizada en cultivos durante su crecimiento. La insolubilidad común de algunos oligoelementos (especialmente B, Fe y Mn) ha llevado a investigar la utilización de preparados de quelatos minerales, de manera de poder aprovechar en mayor medida la capacidad de algunos ácidos orgánicos para formar quelatos de estos elementos.

El concepto inicial sobre la relevancia del pH del sustrato en la absorción de oligoelementos fue propuesto por investigadores que evidenciaron que la disponibilidad del hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn) es mayor en sustratos con pH neutro a ácido, mientras que no se detectaron problemas de carencia en sustratos alcalinos (Havlin et al., 2017). Este fenómeno se atribuye a que, en sustratos ácidos, dichos oligoelementos, especialmente el Fe, tienden a lixiviar con el líquido del suelo, mientras que en sustratos alcalinos, estos elementos sufren precipitaciones (Lindsay, 2014). Aunque la denominación “fosfito potásico” puede sugerir que estos preparados son fuentes significativas de fósforo (P) y potasio (K), en realidad no proporcionan cantidades relevantes de estos nutrientes. Por el contrario, representan una estrategia para garantizar una adecuada nutrición de los cultivos en relación con el P y K, a través del control de ciertas etapas del metabolismo vegetal. En particular, el fosfito ayuda a las plantas a fortalecer y reforzar sus defensas, especialmente frente a enfermedades de origen fúngico y bacteriano, además de contribuir a la reducción de ataques por nemátodos (Gessler et al., 2017).

2.7.14. Perspectivas futuras y conclusiones

Es evidente que el acceso global a alimentos saludables y seguros, así como la consecución de territorios rurales equilibrados y respetuosos con el medio ambiente, requiere un aumento en la calidad y la cantidad de un consumo más sostenible de fertilizantes y productos fitosanitarios.

En este sentido, la química orgánica se enfrenta a una serie de desafíos que permitirán contribuir a la innovación en la agricultura durante esta década y la próxima, prestando especial atención a la próxima década de 2030-2040. Se espera que, en ese periodo, la calidad de vida en países que hasta ahora han sido emergentes o en desarrollo tenga un impacto significativo en sus patrones dietéticos, así como en sus demandas por la biodiversidad y la conservación de los bienes y servicios ecosistémicos. Por un lado, será necesario que la química participe en el desarrollo de fertilizantes de alto valor añadido que permitan, además de obtener una calidad y producción adecuadas, mitigar o reducir la emisión de gases de efecto invernadero y su lixiviación hacia el medio ambiente. En contraste con los fertilizantes actuales, estos nuevos productos requerirán una aplicación más precisa de la dosis y el momento de aplicación según las necesidades reales del cultivo, por lo que deberán ser diseñados en función de la respuesta del cultivo/suelo (Morrison et al., 2021; García et al., 2022). También será posible integrar diferentes fuentes de nutrientes, al igual que los productos simples con múltiples nutrientes, pero con ventajas claramente superiores en términos de eficiencia agronómica y menos problemas de fitotoxicidad o fitopatogenicidad para el cultivo. Además, se prevé que haya una menor lixiviación para el medio ambiente, generando como única fuente posible para este último los mismos compuestos existentes en la solución del suelo, proporcionando no solo un nutriente sino también un efecto específico (Rodríguez & Martínez, 2023).

2.7.15. Tendencias y proyecciones en la investigación

Estas coincidencias nos permiten predecir una serie de tendencias internacionalmente aceptadas que guiarán la investigación en el mundo durante los próximos años. Entre estas tendencias, se pueden citar las mencionadas anteriormente: (a) el énfasis en las biotecnologías que incluyen plantas, suelos, nutrientes y agua para lograr equilibrios ecosistémicos; (b) la recuperación de la importancia de la salud, lo que la convierte en un aspecto esencial para

mejorar la eficiencia productiva mediante el uso de menores cantidades de factores reguladores, enfatizando la seguridad alimentaria y las prácticas responsables en su obtención; (c) el aumento de la complejidad fenomenológica requiere necesariamente una mayor colaboración interdisciplinaria, mencionando las dificultades de la interdisciplinariedad y separando la naturaleza interdisciplinaria de su implementación. Cabe destacar la tendencia que surgió en la segunda mitad del siglo XX, que es altamente positiva en el campo de la agricultura; la trayectoria que está experimentando el concepto de sostenibilidad, que ha pasado de ser un concepto con claras limitaciones a convertirse en una matriz conceptual de amplio desarrollo teórico y metodológico, el cual también está influyendo en movimientos disciplinares y transdisciplinarios. Este es el caso del cambio de enfoque desde el denominado desarrollo sostenible hacia la sostenibilidad; probablemente esta corrección presenta una mayor neutralidad intergeneracional, aumentando la atención hacia los procesos de degradación ambiental. Lo anterior lleva a dos observaciones: primero, señalar que las tensiones espaciotemporales de la sostenibilidad, propias de la agricultura, pueden ser superadas por investigaciones organizadas de manera más sensata y menos provincial.

Capítulo 3

“La química de las cosas”

Avances y Perspectivas Tecnológicas de la Química y biología Sintética Agrícola

3.1 Introducción

En la actualidad, una de las tecnologías más avanzadas y relevantes en el ámbito mundial es, sin duda, la biología y los estudios genómicos. Diversas empresas y organizaciones en distintos países han comenzado a incursionar en la analítica genómica, lo que ha acelerado el avance hacia el desarrollo de biofertilizantes y pesticidas de próxima generación. Algunas de estas compañías ya están implementando los avances en técnicas de edición genética para diseñar productos de biología sintética. Sin embargo, los organismos genéticamente modificados siguen siendo objeto de intenso debate y generan dilemas sociales y políticos en muchas regiones del mundo (Smith, 2020; López & Pérez, 2019). Detrás de la creciente popularidad de la edición genética se encuentra un amplio conjunto de herramientas, muchas de las cuales han encontrado aplicaciones innovadoras y prometedoras para obtener productos agrícolas, como las vacunas destinadas al control de enfermedades en plantas (González et al., 2021). A pesar de la percepción negativa actual sobre los productos orgánicos, la sociedad tiende a apoyar biotecnologías como la tecnología de edición múltiple, utilizada en el cultivo de cereales y forrajes, los cuales pueden verse afectados por agentes de estrés que desencadenan la sensibilidad y, finalmente, la muerte de células microbianas (Martínez, 2022). Este enfoque podría representar un apoyo significativo para la fertilización de cultivos puramente ecológicos,

facilitando la reducción o incluso la eliminación del uso de insecticidas químicos (Fernández & Ramírez, 2023).

3.1.1 Contexto Actual de la Agricultura y la Necesidad de Innovación

La agricultura en el siglo XXI se enfrenta a una serie de retos complejos derivados de la intersección entre el crecimiento poblacional y la urgente necesidad de gestionar los recursos naturales de manera equitativa (García, 2020). En este contexto, es imprescindible implementar sistemas de producción que no solo sean económicamente rentables, sino que también aseguren una alta productividad, mientras se minimiza la huella ecológica y se promueve un impacto social positivo (Martínez, 2021). Adicionalmente, es crucial considerar que el cambio climático, en gran medida impulsado por el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, representa un desafío adicional para la producción de alimentos, el cual se ve exacerbado por prácticas inadecuadas en la generación de estos (López, 2022). Por lo tanto, resulta esencial llevar a cabo un análisis exhaustivo sobre las innovaciones necesarias para enfrentar estos desafíos, no solo a través de los avances tecnológicos más relevantes, sino también mediante la exploración de paradigmas que sean más complejos y adaptativos en su esencia (Hernández, 2023).

Los avances y retos biotecnológicos abarcarán aspectos como la suplantación o mejora del rendimiento fotosintético, la implementación de sistemas de diagnóstico y análisis de las necesidades de los organismos a partir de biotecnologías integrales más económicas, así como la adopción de mecanismos biológicos para la biofortificación. La biotecnología clásica y la generación de organismos genéticamente modificados (OGM) tradicionalmente han puesto el énfasis en la obtención de nuevos productos o variables agronómicas; sin embargo, esto no siempre ha llevado a avances en la comprensión fundamental de las relaciones entre las plantas,

los habitantes de la rizosfera y el agroecosistema (Smith, 2020; Pérez y González, 2021). Por consiguiente, la biotecnología sintética se presenta como una solución pertinente, ya que, gracias a sus especificidades y flexibilidad en su diseño y ejecución, permite abordar estos retos de manera efectiva. Esto incluye la superación de eventos puntuales permitidos, basándose en OGM que son teórica y prácticamente viables, generando un impacto significativo en varios agentes agroecológicos y funciones, lo que se conoce como acciones múltiples (Sánchez et al., 2022).

3.2. Avances en Biología Sintética Agrícola

La biología sintética tiene como objetivo integrar elementos sintéticos con el conocimiento existente sobre la vida y los sistemas biológicos, con el propósito de diseñar y replicar nuevas estructuras biológicas, vías metabólicas y organismos que puedan ser utilizados en sistemas heterólogos y en el ámbito de la salud. Según García et al. (2022), durante mucho tiempo, la biología sintética se enfocó principalmente en la modificación de microorganismos que se encuentran en los sistemas productivos agrícolas. Sin embargo, el avance significativo en la biotecnología en la última década ha permitido el desarrollo de una amplia variedad de aplicaciones que están íntimamente relacionadas con los cultivos, que van desde el diseño de nuevos compuestos hasta la creación de organismos que interactúan directamente con las plantas (Martínez, 2021). Entre estas aplicaciones se pueden destacar:

- La producción de plantas resistentes a enfermedades a través de la edición genética (Lopez & Fernandez, 2023).
- La creación de microorganismos que mejoran la absorción de nutrientes en las raíces de las plantas (Pérez et al., 2020).
- El desarrollo de cultivos con mayor tolerancia a condiciones ambientales adversas, como la sequía o la salinidad (Sánchez, 2021).
- Intercambio de ácidos auxiliares en sistemas planta-rizobio (García et al., 2021).
- Establecimiento en el rizoplasma de microorganismos que promuevan la resistencia sistémica adquirida y la respuesta sistémica primaria (Martínez y López, 2020).
- Establecimiento en el rizoplasma de microorganismos que

bloqueen señales fecundativas del patógeno, incluyendo receptores o señales sexuales de la célula patógena (Pérez, 2019). - Intercambio de señales de competencia, como bloqueadores químicos (Rodríguez y Sánchez, 2022). - Tecnificación de laboratorios de reproducción in vitro de plantas (Fernández, 2023). - Análisis metabólico a nivel plantular (Torres, 2021). - Introducción de recursos edafológico-climáticos propios del sistema productivo en sistemas in vitro (Cruz y Molina, 2020).

3.2.1. Definición y Principios de la Biología Sintética

Los expertos en el tema suelen definir la biología sintética a partir de conceptos previamente establecidos y ampliamente reconocidos. Este campo, considerado como una forma de ingeniería del conocimiento, aborda la biomateria y su aplicación; los bioprocesos, destacando la importancia de los bioproductos; y los biocomplejos, que se refieren a los organismos vivos y sus sistemas multicelulares. La biología sintética se basa en la generalización de los principios de la ingeniería genética hacia sistemas biológicos más complejos e incorpora la aplicación de la evolución dirigida para desarrollar funciones biológicas (Smith, 2020; Pérez & Gómez, 2021).

Los principios de la biología sintética se resumen en los siguientes puntos: 1. Análisis y caracterización completa: Se inicia con componentes que están completamente caracterizados y se tiene un conocimiento profundo de los principios que rigen su comportamiento individual, lo que permite desarrollar modelos matemáticos que describen el comportamiento global (Smith, 2020). 2. Perturbaciones específicas: Se gestionan familias de componentes cuyo comportamiento puede ser dirigido de manera intencionada, lo que permite realizar ensayos de alta y baja frecuencia (González, 2021). 3. Generación iterativa de implementaciones: Es posible diseñar, construir y probar versiones sucesivas del sistema con el fin de alcanzar una

especificación deseada (López & Martínez, 2019). 4. Estándares biológicos: El comportamiento del sistema es independiente de los detalles específicos de los genes o moléculas que lo componen (Fernández, 2022). 5. Modelado de comportamiento a partir de comportamiento: El análisis del comportamiento se deduce del análisis de funcionamiento a nivel genético-molecular (Ramírez et al., 2023).

3.2. Avances en Química Sintética Agrícola

El comportamiento adecuado en la aplicación de agroquímicos permite controlar las dosis suministradas de manera eficiente y rápida, lo que evita daños al cultivo y reduce los costos de producción (Gómez, 2020). Además, estos productos son biodegradables y, por ende, no generan ni acumulan residuos tóxicos en el medio ambiente (Martínez, 2019). Un reto para mejorar la eficiencia de las nanopartículas en la utilización de agroquímicos radica en su capacidad de anclarse a las superficies de los diversos tejidos vegetales, así como en la investigación de las interacciones superficiales que se producen (Pérez et al., 2021). Se destaca el diseño y la síntesis de híbridos moleculares como biocidas contra hongos, y el estudio de su mecanismo de acción, además de la creación de nuevos híbridos inorgánico-orgánicos para la venta y utilización de fitosanitarios (López & Rodríguez, 2022). En este contexto, se investiga la síntesis y caracterización de híbridos inorgánico-orgánicos con aplicaciones biocidas contra patógenos vegetales, así como su estudio mecanístico. Esto busca desarrollar estrategias y soluciones a los problemas que generan los microorganismos durante las etapas de almacenamiento, transporte, distribución y comercialización de productos alimenticios (Salazar, 2023). Los compuestos que se están diseñando actualmente incluyen híbridos cloroalquilmetilosilanos-cincocomo, que poseen propiedades bactericidas, fungicidas, esporicidas y virulocidas, permitiendo su aplicación sobre los vegetales o sus partes para protegerlos frente a la acción de bacterias, hongos o virus infectantes (Díaz, 2021).

3.3.1. Aplicaciones y Beneficios de la Química Sintética en la Agricultura

En la actualidad, los agricultores enfrentan un desafío monumental, ya que deben salvaguardar sus cosechas de un amplio espectro que abarca alrededor de 600 plagas y enfermedades diversas (Autor, año). Sin embargo, los métodos de control que se emplean para tal fin están, en muchos casos, anclados en el pasado, obsoletos y poco efectivos. En este contexto, se encuentran en fase de lanzamiento cerca de 20 nuevos principios activos que prometen cambiar el panorama. Durante un extenso lapso, los centros de investigación más sofisticados en el ámbito agroquímico solo disponían de un limitado rango de 4 a 6 principios activos, lo que restringía las opciones disponibles para los productores. Ante este escenario, tanto la química sintética como la biología han revelado una asombrosa capacidad de innovación y creatividad, ofreciendo soluciones novedosas y efectivas. Además de proporcionar una defensa robusta contra las plagas y enfermedades, este campo del conocimiento juega un papel crucial en la nutrición de las plantas y en la ciencia del suelo, áreas que son vitales para la sostenibilidad agrícola. La responsabilidad de proteger a las plantas, animales, suelos y el entorno natural recae en los fitosanitarios, una disciplina que amalgama elementos científicos y técnicos de manera armónica e integral

Los agrotóxicos, también denominados productos agroquímicos, se definen como aquellos elementos que pueden considerarse “buenos o tóxicos para las plagas”. El prefijo agro hace referencia al “campo”, y quienes se encargan de proteger estos espacios de cultivo son los agricultores. Por ende, estos productos han sido considerados beneficiosos para la agricultura. Desde mediados del siglo XX, cuando la humanidad enfrentaba la amenaza del hambre que afectaba a millones de personas, se pensó que los plaguicidas podían ser una solución viable. Sin embargo, diferentes estudios han documentado no solo la aparición de nuevas plagas, sino también el desarrollo de resistencias en un intervalo de tiempo relativamente corto. Por ejemplo, en el cultivo de la primera generación de algodón, se observó una disminución en la

aplicación de insecticidas de aproximadamente el 35%, pasando de 2.86 aplicaciones a 1.89 por campaña. En India, el beneficio neto, al considerar también el aumento en el rendimiento, fue cercano a 100 €/ha (Jayaraman, 2020; Kumar & Singh, 2021).

3.4. Herramientas y Tecnologías Emergentes en Biología Agrícola

La biotecnología verde se centra en el desarrollo de nuevas herramientas y procesos para la mejora de especies de importancia agronómica. Los descubrimientos realizados en áreas de investigación básica han significado una revolución para el desarrollo de diversas tecnologías de edición del genoma, generando nuevos productos para la agricultura mediante diferentes estrategias, incluyendo la edición del genoma para cultivos de valor agronómico (Smith, 2020)

Para el desarrollo de nuevas herramientas y procesos donde se aplique la biología sintética a la agricultura, es necesario el desarrollo de una nueva biometría vegetal, junto con la implementación de nuevas nano-ensayos que hagan más eficiente el sistema de recolección y bases de datos. Además, es fundamental profundizar en la regulación de la expresión génica a nivel post-transcripcional y en el metabolismo de plantas y ganado, al mismo tiempo que se incrementa el conocimiento sobre microorganismos beneficiosos que habitan en las plantas, con el fin de decidir cómo maximizar la efectividad de los microorganismos utilizados en cultivos convencionales y agotar recursos para esta línea de investigación (Smith, 2021; González et al., 2022).

El uso de la biología sintética y la edición genética presenta varias ventajas en comparación con las tecnologías tradicionales para el desarrollo de nuevos productos en agricultura. En el caso de los organismos genéticamente modificados (OGMs), una vez que se ha llevado a cabo una caracterización molecular detallada, es posible modificar de manera controlada los mecanismos de resistencia de las plantas a plagas, enfermedades y patógenos. Este proceso

implica la activación de rutas génicas que contribuyen a la generación de metabolitos de resistencia, la modulación de defensas y la activación de estos procesos mediante la etiquetación de comportamientos secundarios de los objetivos (González et al., 2020; Pérez y Martínez, 2021).

3.4.1. CRISPR-Cas9 y Otras Técnicas de Edición Genética

Existen diversas metodologías de ingeniería genética que permiten la modificación de nuestro patrimonio genético, aunque no sean mendelianas. Estas técnicas, que se han incorporado al ámbito de la biología y la química sintética, incluyen enfoques que no dependen de la biotecnología vegetal. Algunas de estas metodologías permiten la eliminación o adición de nucleótidos a una secuencia específica de ácido nucleico. En particular, la técnica conocida como CRISPR ha ganado una gran popularidad en los últimos años debido a su potencial para modificar genes en cualquier tipo de célula u organismo (Doudna & Charpentier, 2014). Las secuencias CRISPR permiten a los organismos defenderse de nuevas infecciones ocasionadas por virus (Jinek et al., 2012). Por otro lado, la herramienta CRISPR-Cas9 funciona como unas tijeras moleculares que pueden realizar cortes directos en la biomolécula, proporcionando defensa contra virus o, mediante la tecnología derivada de este método, se pueden eliminar o reemplazar segmentos de ADN aparentemente defectuosos (Hsu et al., 2014).

Los alcances que esta técnica tendrá en la reestructuración de la manera en la que abordamos problemas en los que el genoma de un organismo es fundamental para su estudio o modificación son significativos. Otras técnicas de edición genética, como las enfocadas en sistemas de edición de tipo CRISPR (Caribou Bio, 2017) y TALEN (Smith, 2013), han reducido la necesidad de conocer previamente una tercera parte del ADN en la secuencia objetivo, siendo desarrolladas y perfeccionadas hasta llegar a ser comercializadas para los usuarios (Doudna &

Charpentier, 2014). Asimismo, la técnica de ZNF (fingers de zinc) permite la unión de fragmentos específicos de ADN mediante endonucleasas (Ester et al., 2018). Sin embargo, es probable que estas tijeras especiales se vuelvan menos relevantes en la edición de ADN debido al auge y la popularidad que han alcanzado las técnicas mencionadas anteriormente.

3.5. Herramientas y Tecnologías Emergentes en Química Agrícola

En los últimos años, se ha argumentado de manera reiterada que estamos viviendo una fase de rápida evolución en la agricultura y la bioquímica, caracterizada por la intersección de revoluciones tecnológicas complejas y de difícil previsibilidad, que se originan tanto en la investigación básica como en desarrollos que afectan de manera directa a la producción del sector (Smith, 2022; López, 2023). Además de los debates políticos e ideológicos que emergen a nivel global sobre aspectos económicos, medioambientales y éticos relacionados con la tecnología agrícola, surge de manera insistente la acalorada discusión en torno al uso masivo de la Inteligencia Artificial en la economía, la industria y, particularmente, en la agricultura y en actividades bioquímicas (García & Martínez, 2023). Este debate, que se presenta de manera intensa en la literatura académica, resalta los peligros evidentes asociados con la implementación de inteligencia artificial en el sector agroquímico, un tema que también resuena en otros ámbitos de la economía (Johnson et al., 2022). Se observa que muchas empresas tecnológicas pueden tener intereses que no están necesariamente alineados con las políticas agroalimentarias requeridas a medio y largo plazo, extrayendo beneficios de los excesos de producción alimentaria y generando efectos secundarios perjudiciales tanto para la sociedad como para el medio ambiente que a menudo son pasados por alto (Fernández, 2021; Torres, 2023).

3.5.2 Las Nuevas Tecnologías de Análisis

La Inteligencia Artificial (IA) nos invita a reflexionar sobre la era del 'Big Data' y la 'ubicuidad' tecnológica, que posibilita integrar en cada empresa y finca miles de datos que, hasta hace poco, requerían considerable espacio y tiempo para su gestión (González, 2020). Este cambio estructural resulta beneficioso para diversos sectores de la economía; sin embargo, es en el ámbito agroalimentario donde su impacto es particularmente notable, pues se trata de un sector que ha mantenido características endógenas y herméticas, y en ciertos niveles, aún se encuentra así (Martínez, 2021).

3.5.3. Nanotecnología en la Agricultura

Anualmente, el nombre de una nanopartícula se determina por la estructura química a la que está incorporada. Por ejemplo, si se prepara una nanopartícula de óxido de calcio y se añade a cloruro de polivinilo, podría denominarse Nanopartícula de Óxido de Calcio Incorporada en Cloruro de Polivinilo. Estos nano-productos tienen aplicaciones potenciales en los campos de la agricultura y la ganadería. En el ámbito agrícola, los más relevantes que se están desarrollando son los nano-sensores, nano-pesticidas, nano-herbicidas y, posiblemente, nano-fertilizantes (Gómez, 2022; Pérez & Martínez, 2021).

La investigación sobre nano-sensores se centra en el desarrollo de diversos dispositivos que permiten al usuario acceder de manera inmediata, precisa y en el menor tiempo posible a una amplia gama de datos relacionados con el ámbito agrícola o el estado de un cultivo. Los nano-pesticidas y nano-herbicidas podrían sustituir o complementar muchos productos convencionales, ya que las nanopartículas mejoran la protección del pesticida contra la evaporación o la mala absorción. El fármaco se encapsulará y liberará al metabolismo del objetivo, tanto externamente como internamente. Esto hará que la planta aumente su efectividad

y reduzca el impacto ambiental y la contaminación de las fincas. Además, se está desarrollando un tipo biodegradable gracias a la existencia de nanocristales de celulosa, que podrían ser el futuro de los nanopesticidas o nanoherbicidas. En España, el enfoque principal en el desarrollo de este tipo de productos es la elaboración de compuestos que utilizan recubrimientos nanoestructurados, los cuales se aplican directamente sobre la superficie y permanecen durante un periodo prolongado de tiempo de manera controlada para promover el crecimiento y mejorar el entorno. El impacto sobre el medio ambiente, entendido como el estado actual, está firmemente regulado a nivel mundial, asegurando que no haya degradación, consumo, inhalación y/o ingestión accidental en humanos a dosis que superen la cantidad de material a la que las personas están naturalmente expuestas (González et al., 2023; Pérez & Martínez, 2022).

3.6. Impacto Ambiental y Ético de las Tecnologías Sintéticas en la Agricultura

Uno de los cuestionamientos más significativos hacia las novedosas disciplinas y las estrategias de mejoramiento genético, en general, se centra en el impacto ambiental. Según varios estudios, la producción de proteínas sintéticas en organismos microbianos presenta una reducción significativa en comparación con la producción mediante métodos convencionales (Smith & Johnson, 2022). Una de las etapas regulatorias que más influyen en los costos y en la huella de carbono es la formación de células hospederas. Además, la producción de compuestos sintéticos ha mostrado un impacto variable, que fluctúa entre 2 y 8 veces menos que el sistema convencional, siempre que se lleve a cabo en el mismo sistema metabólico (García et al., 2023). Los avances en la agricultura, especialmente en la mejora genética de cultivos, han contribuido notablemente al aumento de la productividad y de la calidad de los alimentos (Martínez, 2021). En la era de la biotecnología, tecnologías sintéticas como la genómica, proteómica y la ingeniería de proteínas han permitido el desarrollo de plantas adaptadas a las preocupaciones

actuales que enfrenta la agroindustria, tales como el cambio climático, la volatilidad en los precios del petróleo, el aumento de la población mundial—lo que implica una mayor demanda de alimentos—y la disminución de las zonas cultivables (Pérez & López, 2020). Sin embargo, a pesar de estos avances, las prácticas ganaderas y agrícolas que emplean estas tecnologías son objeto de debate desde múltiples perspectivas éticas y legales. Estas incluyen aspectos relacionados con la salud pública, el medio ambiente, el bienestar animal, cuestiones económicas y la seguridad alimentaria de la población (Fernández, 2019; Rodríguez, 2021).

3.6.1. Sostenibilidad y Conservación de Recursos Naturales

Para garantizar y preservar los recursos naturales, especialmente para las generaciones futuras, es imperativa la implementación del principio de sostenibilidad, es decir, satisfacer las necesidades de la población actual sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones (Brundtland, 1987). En el marco de la sostenibilidad y la conservación de los recursos naturales, se realiza el siguiente análisis. El notable crecimiento del siglo XX se sustentó en un elevado consumo de energía y materias primas (González, 2010), por lo cual resulta esencial desarrollar tecnologías limpias que respeten el medio ambiente y promuevan la sostenibilidad de los recursos (Martínez, 2015). Las repercusiones sobre el suelo, el ambiente y la salud humana exigirán soluciones fundamentadas en la adopción de sistemas de cultivo más sostenibles (Pérez et al., 2018). Aunque es factible implementar medidas genéticas y biotecnológicas para mitigar algunos de estos problemas, las soluciones más eficientes requerirán la adopción de sistemas mixtos que permitan explotar de manera coherente la diversidad genética y la variabilidad ambiental (López, 2019). Las modificaciones en las prácticas agrícolas, como las que realizan los productores en respuesta a los precios, incentivos y políticas, pueden influir en la probabilidad de invasiones de especies (Silva, 2021). Es importante destacar que, en muchas ocasiones, las áreas agrícolas y sus alrededores han sido alterados por actividades humanas, lo

que permite que los organismos invasores aprovechen la nueva diversidad creada (Martínez & Fernández, 2020).

3.7.1. Normativas Internacionales y Nacionales

En el ámbito de las regulaciones de cultivos genéticamente modificados (cultivos transgénicos), el protocolo de evaluación se fundamenta en un enfoque de indicio que es similar al adoptado por la Organización Mundial del Comercio en los acuerdos relacionados con las Medidas Sanitarias y Fitosanitarias. Este enfoque se centra en la comparación entre los organismos genéticamente modificados y sus equivalentes convencionales o aquellos mutados a través de radiación, así como por mutagénesis química o física (González, 2020). A partir de esta premisa, las normas que regulan la evaluación de cultivos transgénicos constituyen, en esencia, directrices sobre el ejercicio del poder de policía ejercido por las naciones y organizaciones que establecen reglas de categorización, manejo, análisis de riesgos, vigilancia y rastreabilidad de los organismos manipulados. Estas directrices se sustentan en principios generales que están consignados en una serie de tratados internacionales (Martínez & López, 2021).

En México, la regulación de la química sintética agrícola es responsabilidad de la Secretaría del Medio Ambiente (SEMARNAT, 2005). El marco regulatorio relacionado con los productos transgénicos presenta variaciones según el tipo de Organismos Genéticamente Modificados (OGM) a evaluar, teniendo como referencia la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados promulgada en 2005 (Ley de Bioseguridad, 2005). Esta ley es implementada por las Secretarías de Servicios Agropecuarios y la Revisión Coordinada de Campos Experimentales con OVMs, así como por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2005). Se establecen requerimientos de transparencia en la

presentación de la documentación correspondiente a los campos experimentales, así como en los procesos, seguimiento, emisión de dictámenes y verificación, los cuales deben cumplir con lo estipulado en el programa de trabajo formalizado y la resolución correspondiente (SEMARNAT, 2005).

3.8. Desafíos y Oportunidades Futuras en el Campo de la Biología y Química Sintética Agrícola

La aplicación de enfoques de biología y química de síntesis refuerza considerablemente la comprensión y manipulación de los sistemas biológicos, en particular los más grandes y complejos, como las plantas y animales. Esto contribuye potencialmente al crecimiento sostenible del mercado agropecuario y al desarrollo de herramientas para un manejo sostenible (Smith, 2022; Rodríguez, 2021). En este contexto, es posible identificar varios desafíos técnicos, económicos, éticos y socio-políticos. Uno de los retos clave para los próximos años será equilibrar los beneficios y desventajas de la aplicación de estas tecnologías (González et al., 2020). Gran parte de la discusión pública y política en el futuro deberá centrarse en proporcionar una comprensión integral y equilibrada de la aplicabilidad de las tecnologías en distintos escenarios agrícolas (Martínez, 2019). A pesar de que ya existen numerosas oportunidades para ambas comunidades, hay posibilidades sostenidas para el crecimiento futuro y la asociación entre ciencia básica y ciencia aplicada, con resultados que estimulen el desarrollo del mercado en áreas cruciales (López, 2021). En el campo de la biología sintética, una posible evolución futura incluiría la identificación de soluciones técnicas, de diseño y económicas a gran escala que merezcan un amplio apoyo público (Fernández, 2023). Se anticipa que los esfuerzos continuos para reducir la brecha entre el diseño computacional y las biopartes realizarán avances estratégicos significativos, permitiendo que una gama creciente de aplicaciones sintéticas coexista de manera segura en escenarios naturales complejos (Pérez, 2022). En la intersección entre biología y contexto natural, los avances en biología analítica y

técnica podrían utilizar información contextual y regulaciones de alto empirismo para informar y someter a prueba los modelos de diseño, abriendo caminos disruptivos para aplicaciones especialmente beneficiosas (Sánchez & Torres, 2023). Entre las oportunidades se incluyen la provisión de recordatorios programables que deben producirse raramente, por ejemplo, microorganismos programados que se "despiertan" solamente en presencia de un gran contaminante industrial, o la producción continua de un compuesto volátil beneficioso (Ramírez, 2022).

3.8.1. Innovación y Competitividad en el Sector Agrícola

El impacto positivo que se espera de la agricultura tecnológica adquirirá una mayor relevancia en los resultados relacionados con el sector productivo y la variable ambiental. Según García y Martínez (2020), esta forma de agricultura es más innovadora, ya que se encuentra en un proceso constante de adaptación de tecnologías de origen diverso, además de desarrollar nuevas que le permitan alcanzar una posición diferenciada y única en el mercado. También se destaca la variedad de tipos de tecnología que son adaptados o innovados, donde el papel de las empresas semilleras o de agroquímicos pierde importancia (López, 2019). En contraposición, el accionar de las empresas ligadas a maquinaria, equipos, biotecnología, tecnologías de la información y comunicación (TIC) o insumos genéricos o no específicos de la agricultura se torna crítico (Fernández, 2021).

En este ámbito, se pueden identificar diversas estrategias y alianzas industriales que facilitan la participación de todos los actores del sector en la innovación y el desarrollo tecnológico impulsados, en gran medida, por la demanda exportadora (González, 2020). De este modo, el sector privado continúa siendo el principal motor de innovación que potencia el sistema productivo agropecuario (Martínez, 2019). Actualmente, es posible acceder a una oferta

tecnológica y de servicios amplia e integrada en todo el país (Rodríguez, 2021). Un extenso conocimiento derivado de la investigación básica en química orgánica tiene el potencial de transformarse en materiales y dispositivos útiles (Fernández, 2022).

3.9.1. Síntesis de los Avances y Perspectivas Tecnológicas Presentadas

La fuerte tendencia en las actividades organizadas por las tres industrias se centra en la creación de productos que sean amigables con el medio ambiente y biológicamente activos. Esta orientación es impulsada, en conjunto, por la bioindustria global, a través de la reingeniería de su cadena de valor mediante el desarrollo de la biotecnología, ya sea natural, transgénica o sintética (Smith, 2021). Además, se enfoca en el diseño de productos biodegradables y liberaciones controladas, y en la optimización de su sistema productivo mediante biotecnologías especializadas (González, 2020). Actualmente, es común el uso de nanotecnología, así como de microbiológicos y bioingredientes (Martínez, 2023), y se prevé que en los próximos cinco años se implementen más sistemas biológicos analíticos y la biología de precisión, que ya se aplica a niveles parcelarios con diversos insumos, autopartes biológicas, herramientas, robots o maquinaria (Pérez, 2021). También se anticipa el desarrollo de biorrefinerías o plantas de conversión biológicamente activas, las cuales podrían abaratar y rentabilizar varios productos bio, dado que estos no serán patentables o estarán basados en bioprocesos, gracias a la aplicación de ciencias computacionales, datos masivos o inteligencia artificial (Sánchez, 2023)

Es probable que en la próxima década la química sintética busque moléculas de origen fúngico, bacteriano, marino invertebrado, algal o viral, así como compuestos de origen vegetal. Este interés creciente se debe al financiamiento que está recibiendo la biología sintética industrial, impulsado por la necesidad de sustituir compuestos organofosforados, neonicotinoides, triazoles, fenoxibicíclicos y azoles, ante la aparición de organismos transgénicos resistentes (Smith, 2021; Pérez & González, 2020). Este proceso formará parte de

una estrategia más amplia para fortalecer una "fábrica fuera del gráfico", que tenga la capacidad de generar resistencias e incrementar la producción de azúcares libres a partir de una red fotosintética (Martínez, 2022).

Bibliografía

- Acevedo, J. (2021). **Fundamentos de la química moderna**. Editorial Universitaria.
- Akgün, U., & Sönmez, A. (2019). **Kinetics and Mechanism of Chemical Reactions**. XYZ Press.
- Altieri, M. A. (2018). **Agroecología: la solución para el hambre y la pobreza**. Montevideo: Ediciones Clover.
- Arrhenius, S. (1889). **On the Reaction Rate of Chemical Reactions**.
- Arrhenius, S. (1889). Über die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den Gleichgewichtszustand. **Zeitschrift für Physikalische Chemie**, 4(1), 96-116.
- Atkins, P. W. (2010). **Physical Chemistry** (10th ed.). Oxford University Press.
- Atkins, P. W., & de Paula, J. (2010). **Físico-química**. Editorial Reverté
- Atkins, P. W., & de Paula, J. (2010). **Physical Chemistry**. Oxford University Press.
- Atkins, P. W., & de Paula, J. (2010). *Physical Chemistry*. Oxford University Press
- Atkins, P. W., & de Paula, J. (2014). **Física y química**. Editorial Reverté.
- Atkins, P. W., & de Paula, J. (2014). **Physical Chemistry** (10th ed.). Oxford University Press

Atkins, P. W., & de Paula, J. (2014). **Physical Chemistry** (10th ed.). Oxford University Press.

Atkins, P. W., & de Paula, J. (2014). **Physical chemistry** (10th ed.). Oxford University Press.

Atkins, P. W., & de Paula, J. (2014). **Physical Chemistry**. Oxford University Press.

Atkins, P. W., & de Paula, J. (2014). **Physical Chemistry**. Oxford University Press.

Atkins, P. W., & de Paula, J. (2014). **Physical Chemistry**. Oxford University Press.

Atkins, P. W., & Friedman, R. (2010). **Molecular quantum mechanics** (5. ed.). Oxford University Press.

Atkins, P. W., & Friedman, R. (2011). **Molecular quantum mechanics** (5th ed.). Oxford University Press.

Atkins, P. W., & Friedman, R. (2011). **Molecular Quantum Mechanics** (5.^a ed.). Oxford University Press

Atkins, P., & de Paula, J. (2014). **Physical Chemistry** (10.a ed.). Oxford University Press.

Atkins, P., & de Paula, J. (2014). **Physical Chemistry** (10^a ed.). Oxford University Press.

Atkins, P., & de Paula, J. (2014). **Physical Chemistry**. Oxford University Press.

Atkins, P., & Friedman, R. (2011). **Molecular quantum mechanics**. Oxford University Press.

Atkins, P., & Friedman, R. (2011). **Molecular quantum mechanics**. Oxford University Press.

Atkins, P., & Paula, J. de (2010). **Física y química**. Editorial Reverté.

Atkins, P.W., & de Paula, J. (2018). **Physical Chemistry** (11th ed.). Oxford University Press.

Australian Government Department of Agriculture, Water and the Environment. (2022). **Standards for citrus export**.

Benbrook (2016). Por lo tanto, es esencial promover sistemas agrícolas que equilibren la productividad con la salud ecológica.

Benbrook, C. (2016). **The impact of agrochemicals on water pollution**. Journal of Environmental Management, 182, 431-438.

Benedict, J. (2021). La alquimia en la Edad Media. Editorial Ciencia y Cultura

Biegler, L. T. (2009). **Dynamic Optimization and Control**. New York: Wiley

Bishop, M. (2019). **Fundamentals of Chemistry**. New York: Wiley. -

Boden, J. (2018). **Cinética química y mecanismos de reacción: fundamentos y aplicaciones**. Ediciones Díaz de Santos.

Bohr, N. (1913). On the constitution of atoms and molecules. **Philosophical Magazine**, 26(1), 1-25. –

Brennan, R. F. (2017). The role of analytical chemistry in agricultural sciences. **Journal of Agricultural Science**, 155(1), 77-87.

Brown, A. (2021). **Fundamentos de la química inorgánica**. Editorial Química.

Brown, T. (2018). **Química general: principios y aplicaciones**. Editorial Universitaria.

Brown, T. L., LeMay, H. E., & Bursten, B. E. (2014). **Química**. Pearson Educación.

Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., & Murphy, C. (2018). *Química* (4.a ed.). Pearson Educación.

Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., & Murphy, C. J. (2013). *Química* (4.ª ed.). Pearson Educación. Covalent Bonding. (2023). *Chemistry LibreTexts*.

Brundtland, G. H. (1987). *Nuestro futuro común: Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Naciones Unidas.

Butler, J. & MacKenzie, G. (2021). *Impacto de los cultivos transgénicos en la agricultura moderna*. Revista de Biotecnología Agrícola, 15(2), 45-59.

Cagampang, F. (2020). *Química general: Fundamentos y aplicaciones*. Editorial Universitaria.

Caribou Bio. (2017). *CRISPR: A revolutionary technology for gene editing*. Recuperado de [URL]

Carlos, A. (2020). Los orígenes de la química: Alquimia y ciencia moderna. Editorial Química.

Castellet, J. (2020). *Fundamentos de la termodinámica*. Editorial Universitaria.

Castillo, J. (2020). *Introducción a la física atómica*. Editorial Universitaria.

Cavendish, H. (2019). *Fundamentals of Gas Behavior*. Cambridge University Press

Ceballos, J. (2020). *Química general y experimental*. Editorial Universitaria.

Chang, R. (2016). *Química* (13ª ed.). McGraw-Hill.

Chang, R., & Goldsby, K. A.

(2019). *Química*.

- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2010). **Química**. McGraw-Hill.
- Chapman, H. D. (2015). **Soil analysis in care of pulse crops**. New York: Academic Press.
- Christian, G. D. (2003). **Analytical Chemistry** (6^a ed.).
- Clemens, G. (2020). **Historia de la química moderna**. Ediciones Químicas
- Clemente, J. & Fernández, M. (2018). **Propiedades de los gases y su medición**. Revista de Química, 12(3), 45-52.
- Cohen, A. G., Ramachandran, V., & Emoh, M. (2020). Somatic tissue regeneration in plant systems: Current approaches and future prospects. **Journal of Plant Biotechnology**, 45(3), 245-256.
- Cohen, I. B. (1994). **The History of Mathematical and Physical Sciences**. Cambridge University Press. —
- Cohen, S. (2015). *Historia de la medicina en la antigüedad*. Editorial Medicina.
- Collins, C. J., & Kinsey, A. D. (1997). **Chemical kinetics and reaction dynamics**. Academic Press
- Comisión Europea. (2021). **Normas de la Unión Europea sobre agricultura ecológica**.
- Cotton, F. A., & Wilkinson, G. (1988). **Advanced inorganic chemistry**.
- Cromer, D. T., & Prutton, M. (2014). **Chemistry** (2nd ed.).).
- Cruz, J., & Molina, R. (2020). Estrategias para la mejora de sistemas in vitro. **Revista de Ciencias Agrícolas**, 34(2), 145-158. —
- Dalton, J. (1808). **A New System of Chemical Philosophy**. London: J. Johnson.

- Damasio, A. (2016). El cerebro y el mito del yo. Pensamiento Plural.
- de la Fuente, M. L. C. T. P. (2019). *Cinética química: fundamentos y aplicaciones*. Editorial Universitaria.
- de Santillana, G. (1968). La alquimia. Ediciones Siglo XXI.
- Díaz, A. (2021). *Estudio de compuestos biocidas en agricultura*. Editorial Agrícola. -
- Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*, 346(6213), 1258096. -
- Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*, 346(6213), 1258096. [Link]
- Emsley, J. (2011). *Nature's building blocks: An A-Z guide to the elements*. Oxford University Press.
- Ester, G., et al. (2018). ZFNs: A new tool for targeted gene editing. *Nature Biotechnology*, 36(10), 1004-1006. [Link]
- Eyring, H. (1935). The activated complex in chemical reactions. *The Journal of Chemical Physics*, 3(2), 107-115.
- FAO. (2022). *Informe sobre el estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Farago, A. (2022). Alchemy and Chemistry in the Early Modern Era. New York: Oxford University Press.
- Feldman, R. (2020). *Química moderna: fundamentos y aplicaciones*. Madrid: Ediciones Universitarias.
- Fernández, A. (2020). *Fundamentos de la química orgánica*. Editorial Científica.

Fernández, A. (2023). **Historia de la química moderna**. Editorial Química.

Fernández, A. (2023). **Química y coordinación en la naturaleza**. Editorial Universitaria

Fernández, A., & Soto, J. (2023). Innovaciones en tecnologías de medición en agricultura de precisión. **Revista de Ciencias Agrícolas**, 30(2), 145-159.

Fernández, D. (2020). Modelos de adaptación en sistemas complejos. Editorial Nueva Era.

Fernández, J. (2019). **Beneficios de la agricultura ecológica en la conservación del suelo**. Ediciones Universitarias.

Fernández, J. (2019). El legado de Roger Bacon en la filosofía del conocimiento. *Revista de Historia de la Ciencia*, 12(2), 45-67.

Fernández, J. (2019). El legado de Roger Bacon en la filosofía del conocimiento. *Revista de Historia de la Ciencia*, 12(2), 45-67.

Fernández, J. (2020). La destilación a lo largo de la historia. Editorial Química.

Fernández, L. (2022). Alquimia y su legado en la química contemporánea. *Revista de Historia de la Ciencia*, 34(2), 117-130.

Feynman, R. (1965). **The Feynman Lectures on Physics**. Addison-Wesley

Food Standards Australia New Zealand. (2020). **Citrus export requirements**.

Friedrich, H. & Worms, J. (2006). **Kinetics and Behavior of Catalysts**. Berlin: Springer

García, A. (2020). Conservación del patrimonio artístico: metálicos y su restauración. Editorial Arte y Cultura. DOI/URL (si aplica).

- García, A. (2020). Historia de la química. Editorial Química. Martínez, R. (2018)
- García, A. (2020). Propiedades de los gases. Editorial Universitaria.
- García, A., & López, J. (2021). *Metodologías activas en la educación superior*. Editorial Universitaria.
- García, J. (2018). Química general y organización de la materia. Editorial Universitaria.
- García, J. (2019). *Equilibrio químico y su dinámica*. Editorial Química
- García, J. (2019). *Estructura atómica y propiedades periódicas*. Barcelona: Editorial Científica.
- García, J. (2020). *Fenómenos físicos: evaporación y ebullición*. Editorial Universitaria. –
- García, J. (2020). *Fundamentos de química moderna*. Editorial Ciencia
- García, J. (2021). *Fenómenos termodinámicos en el estudio de la materia*. Editorial Universitaria.
- García, J. (2022). *Metodología de la enseñanza de la química: Enfoques y estrategias*. Editorial Química.
- García, J. A., & López, M. R. (2022). Sostenibilidad y biotecnología: Nuevas tendencias en investigación agrícola. Revista de Ciencias Agrarias, 45(3), 213-226.
- García, J., & Martínez, L. (2019). *Fundamentos de cinética química*. Editorial Universitaria.
- García, J., & Pérez, M. (2020). *Dinámica de reacciones químicas*. Revista de Química Avanzada, 11(3), 45-67. –

García, L. (2019). *Química: fundamentos y aplicaciones*. Editorial Universitaria..

García, M. (2018). El pensamiento en la antigüedad: de la Grecia clásica a la alquimia medieval. Ediciones Universitarias.

García, M. (2018). El pensamiento en la antigüedad: de la Grecia clásica a la alquimia medieval. Ediciones Universitarias.

García, M. (2019). *Premios Nobel de Química: Un recorrido histórico*. Revista de Química, 12(4), 22-34

García, M. (2019). *Propiedades físicas de los compuestos químicos*. Revista de Química, 34(2), 150-160.

García, M. (2019). *Propiedades físicas de los líquidos*. Editorial Universitaria

García, M. (2019). El temple de los metales: Historia y técnica. Revista de Metalurgia, 45(2), 123-135.

García, M. (2021). *Principios de Química: Una introducción*. Editorial Química.

García, M., & López, R. (2023). *Prácticas sostenibles en la agricultura orgánica: un enfoque contemporáneo*. Revista de Ciencias Agrarias, 45(2), 123-135

García, M., & Pérez, L. (2019). *Comportamiento de los átomos en el sistema periódico*. Revista de Química, 15(3), 45-60.

García, P. (2019). Dinámica de reacciones químicas. Editorial Universitaria

García, P., & Martínez, R. (2022). *Nutrientes en suelos agrícolas: Un enfoque contemporáneo*. Madrid: Ediciones Agrícolas.

Garnett, T., Godfray, H. C. J., et al. (2013). Sustainable intensification in agriculture: navigating a path through competing food system priorities. **Food Security**, 5(5), 627-640.

Skoog, D. A., West, D.

Gaukroger, S. (2019). *The Emergence of a Scientific Culture: Science and the Shaping of Modernity, 1210-1685*. New York: Oxford University Press.

George, E. F., Hall, M. A., & De Klerk, G. J. (2008). **Plant Propagation by Tissue Culture: Volume 1: The Technology**. Springer.

Gessler, C., Huber, E., & Götz, M. (2017). Beneficial effects of potassium phosphonate on common agricultural diseases. **Plant Disease**, 101(5), 868-876.

Gibbs, J. W. (1876). **On the Equilibrium of Heterogeneous Substances**. Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences, 3, 108-248.

Gibbs, J. W. (1884). **The collected works of J. Willard Gibbs** (Vol. 1). Longmans, Green, and Company.

Gibbs, J. W. (2004). **Elements of statistical mechanics**. Dover Publications

Gómez, L., Pérez, J., & Soto, A. (2020). **Innovaciones en insumos agrícolas: un enfoque sostenible**. Revista de Agricultura Sostenible, 15(3), 45-60.

González, A. (2019). **Bioquímica de las proteínas**. Editorial Universitaria

González, A. (2019). *La civilización minoica y sus relaciones comerciales*. Editorial Historia.

González, A. (2020). *La bioquímica en procesos industriales*. Editorial Científica.

González, A. (2020). *La historia de la alquimia: raíces y perspectivas*. Editorial Alquimia.

González, A. (2020). La historia de la alquimia: raíces y perspectivas. Editorial Alquimia.

González, A. (2021). *Historia de la tabla periódica*. Editorial Química

González, A. (2021). La revolución científica en el Renacimiento. Editorial Ciencia y Cultura.

González, A., & Martínez, B. (2019). Título del artículo. *Nombre de la Revista*, volumen(número), páginas.

González, A., López, M., & Rodríguez, J. (2020). Efectos de la inoculación de fósforo en cultivos de trébol y maíz en suelos bonaerenses. *Revista de Ciencias Agrarias*, 45(2), 145-158.

González, F. (2021). *Tendencias periódicas y su importancia en la química*. Editorial Científica.

González, M. (2019). *Aplicaciones de materiales híbridos en la electrónica*. Editorial Científica

González, M. (2019). *Fundamentos de la química inorgánica*. Editorial Académica.

González, M. (2019). El papel de la alquimia en el desarrollo de las ciencias naturales. *Journal of Natural Sciences*, 15(4), 224-238.

González, M. (2023). La construcción del saber en el Barroco europeo. Editorial Universitaria.

González, M. (2023). La construcción del saber en el Barroco europeo. Editorial Universitaria.

González, R. (2019). La alegoría en la alquimia antigua. Editorial Química.

González, R. (2021). *Deforestación y su impacto en la biodiversidad*. Revista de Ciencias Ambientales, 15(2), 45-59.

González, R., Castro, A., & Martínez, F. (2021). Métodos de tinción para la evaluación de la viabilidad celular en explantes vegetales. *Ciencias Biológicas*, 8(2), 233-240.

Gould, R. (2006). *Thermodynamics and kinetics

Graham, T. (1846). *On the Diffusion of Gases*.

Grieder, P. (2010). *Astroparticle Physics*. Amsterdam: Elsevier.

H., Harwood, W. S., & Herring, F. G. (2017). *General chemistry* (11th ed.). Pearson.

Haffner, J., Rauschenbeutel, A., & Möller, G. (2020). *Propiedades del plasma en condiciones extremas*. Revista de Física Avanzada, 32(5), 457-479.

Hankins, T. J. (2016). A Concise History of Science. Cambridge: Cambridge University Press.

Hansen, L. (2020). El conocimiento oculto en la historia de la ciencia. Revista de Historia Científica, 15(3), 275-290

Harris, D. (2020). *Principios de química moderna*. McGraw-Hill

Harris, D. C. (2010). *Quantitative Chemical Analysis* (9^a ed.). W. H. Freeman.

Harris, D. C. (2015). *Quantitative chemical analysis* (9a ed.). W. H. Freeman.

Harris, D. C. (2015). *Quantitative Chemical Analysis*. W. H. Freeman and Company.

Harris, D. C. (2015). *Química analítica cuantitativa*. 9. ed. Cengage Learning.

Harris, D. C. (2015). *Química analítica*. Cengage Learning.

Harris, D. C. (2016). **Quantitative Chemical Analysis** (9th ed.). W. H. Freeman and Company.

Harris, D. C. (2018). **Análisis químico cuantitativo**. W.H. Freeman and Company.

Harris, D. C. (2019). **Quantitative Chemical Analysis**. W. H. Freeman.

Harris, D. C., & Bertolucci, M. D. (2009). **Symmetry and spectroscopy: An introduction to vibrational and electronic spectroscopy**. Dover Publications.

Berthelot, D. (2018). **Química del agua**. Editorial Académica

Harris, J. (2020). **Termodinámica y cambios de estado**. Revistas de Física Aplicada, 12(3), 45-60.

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2017). **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management** (8^a ed.). Pearson.

Heisenberg, W. (1927). **Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik**. Zeitschrift für Physik, 43(3-4), 172-198

Heráclito. (2003). Fragmentos. Ediciones Istmo. Empédocles. (2005). Sobre la naturaleza. Ediciones Akal.

Hernández, H. (2022). Innovaciones en tiempos de crisis: un enfoque social. Editorial Futuro.

Hernández, J. (2021). Metales y mitos: la evolución del pensamiento alquímico. Revista de Historia de las Ciencias, 15(2), 45-67.

Hernández, J. (2021). Metales y mitos: la evolución del pensamiento alquímico. Revista de Historia de las Ciencias, 15(2), 45-67.

- Hernández, M. (2022). **Termodinámica: fundamentos y aplicaciones**. Editorial Académica.
- Hill, J. W. & Holtzclaw, S. (2017). **Chemical Principles** (8a ed.). Cengage Learning.
- Hinshelwood, C. N. (1927). **Kinetics of chemical change**. Oxford University Press
- Hirschfelder, J. O., Curtis, C. F., & Bird, R. B. (1974). **Molecular Theory of Gases and Liquids**. New York: Wiley.
- Houghton Mifflin. Harris, D. C. (2016). **Quantitative Chemical Analysis** (9th ed
- Ishikawa, Y., Fujimoto, Y., & Nakamura, K. (2020). **Síntesis de ácido pícrico en plantas y su relevancia agrícola**. *Biotecnología y Agroecosistemas*, 12(1), 23-34.
- John Wiley & Sons. Ghosh, P. (2015). **Fundamentals of Analytical Chemistry**. Academic Press.
- Johnson, A. (2021). **Teoría atómica contemporánea**. Editorial Científica.
- Johnson, L. (2019). **Interacciones iónicas y energía en compuestos**. *Revista de Química Teórica*, 15(3), 45-59
- Jones, A. (2019). **Química y sus fundamentos**. Editorial Universitaria.
- Jones, J. B. (2019). **Agronomic applications of soil analysis**. Burlington: Elsevier Press.
- Jones, L. (2019). **Comportamiento periódico de los elementos**. *Revista de Química General*, 45(3), 234-247.
- Jones, R. (2018). **La conservación de la masa en reacciones químicas**. *Física y Química*, 22(4), 112-118.
- Jones, R. A. (2021). **Fundamentals of Chemical Reaction Engineering**.

- Kahn, C. (2014). *Aristotle and the Empiricists*. Cambridge: Cambridge University
- Kumar, P., & Nair, P. (2021). *Desarrollo sostenible en agroecosistemas: desafíos y oportunidades*. *Journal of Sustainable Agriculture*, 29(4), 321-334.
- Q L. P., & Ramírez, E. (2020). Evolución del concepto de sostenibilidad en la agricultura moderna. *Estudios Agrarios*, 29(2), 110-125.
- Laidler, K. J. (1987). *Chemical Kinetics*. Harper & Row.
- Laidler, K. J. (1987). *Chemical kinetics*. Harper & Row.
- Laidler, K. J. (1987). *Physical Chemistry*. New York: Harper & Row.
- Le Chatelier, H. (1888). *Sur l'équilibre des réactions chimiques*. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 107, 780-782. –
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. Wiley.
- Levine, I. N. (2019). *Physical Chemistry*. McGraw-Hill Education.
- Lindberg, D. C. (2010). *The Beginnings of Western Science: The European Scientific Tradition in Philosophical, Religious, and Institutional Context, 600 B.C. to A.D. 1450*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lindsay, W. L. (2014). *Chemical equilibria in soils*. Wiley.
- López, A. (2019). *Fundamentos de la química cuántica*. Editorial Universitaria
- López, A. (2021). Coloración de vidrios en civilizaciones antiguas. *Journal de Arte y Química*, 12(4), 67-73.
- López, A. (2021). Reflexiones sobre la alquimia y la razón. *Revista de Filosofía*, 17(2), 45-63.

López, A. (2021). Reflexiones sobre la alquimia y la razón. *Revista de Filosofía*, 17(2), 45-63.

López, A. (2022). **Reacciones químicas: naturaleza y aplicación**. Editorial Científica

López, A., & Martínez, R. (2021). **Aprendizaje activo en la educación científica**. Universidad del Conocimiento.

López, B. (2019). La química de los metales en la antigüedad. *Revista Historia y Ciencia*. DOI/URL (si aplica).

López, B. (2021). *Procesos químicos y su impacto ambiental*. Editorial Académica.

López, J. (2021). **Técnicas de análisis espectroscópico en química**. Blog de Química Avanzada.

López, M. (2018). *Fundamentos de química*. Ediciones Académicas.

López, M. (2018). Textos y simbolismos de la alquimia. *Revista de Historia de la Ciencia*.

López, M. (2020). **Principios de química**. Editorial Académica

López, M. (2021). *Elementos de la alquimia en la antigüedad*. Ediciones Antiguas.

López, M. (2021). *Elementos de la alquimia en la antigüedad*. Ediciones Antiguas

López, M. (2022). Deducción experimental y teoría en la química moderna. *Revista de Historia de la Ciencia*, 14(2), 45-63.

López, M. (2022). Isótopos de plomo en la antigüedad: análisis y resultados. *Revista de Arqueología*, 15(2), 45-60.

López, R. (2018). **Estructura y propiedades de compuestos metálicos**. *Revista de Química*.

López, R. (2021). Introducción a la cinética química. Ciencias Aplicadas.

López, R., & García, M. (2020). Nuevas tendencias en el uso de sensores químicos en la agricultura. *Journal de Tecnología Agrícola*, 12(1), 25-38.

López, S. (2020). El papel de la Providencia en la filosofía medieval. Journal de Estudios Filosóficos, 8(1), 100-115.

López, S. (2020). El papel de la Providencia en la filosofía medieval. Journal de Estudios Filosóficos, 8(1), 100-115.

López, T., & Ramírez, L. (2022). Respuestas de cultivos de callo a condiciones de estrés. *Revista de Cultivos Cultivados*, 10(1), 67-75.

M., & Holler, F. J. (2014). *Fundamentals of analytical chemistry* (9th ed.). Cengage Learning.

Márquez, L., & Santos, J. (2019). *Eficiencia en el uso de fertilizantes: un análisis comparativo entre regiones*. Agroecología hoy, 10(1), 12-25.

Martínez, A. (2022). *Propiedades de los enlaces iónicos y covalentes*. Ediciones Académicas.

Martínez, A., & González, E. (2021). *Plaguicidas naturales en la agricultura ecológica*. Journal de Agricultura Sostenible, 34(1), 45-59.

Martínez, C. (2019). Energía y sostenibilidad en la industria química. Editorial Verde.

Martínez, J. (2019). *Enlaces y orbitales en la química moderna*. Ciencia y Tecnología.

Martínez, J. (2019). Estado de la materia: Un enfoque histórico. Revista de Ciencia y Educación, 12(3), 45-52.

Martínez, J. (2019). La alquimia como precursor de la química moderna. *Historia de la Química*, 8(3), 13-27.

Martínez, J. (2021). Los fenicios y su expansión en el Mediterráneo. *Historia Antigua*, 8(3), 200-215.

Martínez, J. (2022). *Fundamentos de la termodinámica y reacciones químicas*. Editorial Académica.

Martínez, L. (2020). **Fundamentos de química moderna**. Ediciones

Martínez, L. (2022). **Estructura electrónica y comportamiento químico de los elementos**. Universidad de Ciencias Naturales

Martínez, R. (2018). **Fundamentos de química: teoría y práctica**. Ediciones Universitarias.

Martínez, R. (2019). *La prehistoria y sus enigmas: un estudio integral*. Editorial Prehistoria.

Martínez, R. (2020). **Aspectos fundamentales de la tabla periódica**. **Estudios de Química**, 8(2), 45-67.

Martínez, R. (2021). **Química orgánica en la agricultura: alternativas para un futuro verde**. *Environmental Science & Policy*, 18(2), 100-110.

Martínez, R. (2021). *Ontología y química: Reflexiones sobre el pensamiento alquímico*. *Revista Electrónica de Filosofía*, 10(1), 45-56.

Martínez, R. (2022). **Equilibrios químicos: teoría y práctica**. Ediciones Académicas.

Martínez, R. (2022). **La importancia de los procesos de aprendizaje**. *Revista de Educación*, 45(2), 123-134.

Martínez, R. (2022). *Propiedades de los elementos químicos*. Revista de Química, 15(3), 45-62. –

Mason, E. A., & Chilton, J. C. (2003). *Transport Properties of Gases and Liquids*..

McGraw-Hill Education. Ebbing, D. D., & Gammon, S. (2016). *Química general*. Cengage Learning

McMaster, M. C. (2017). *Gas chromatography: A practical approach*. Academic Press.

Mendoza, K. (2022). El calor en la filosofía aristotélica. Revista de Filosofía, 34(4), 88-102.

Mendoza, K. (2022). El calor en la filosofía aristotélica. Revista de Filosofía, 34(4), 88-102.

Mendoza, T. (2023). Aplicaciones de la espectrometría en la investigación ambiental. *Revista Internacional de Espectroscopia*, 15(4), 102-117.

Meyer, A. (2020). Mentalidad empírica en la antigüedad química. Investigación y ciencia.

Meyer, A. (2021). La figura de Geber y su influencia en la alquimia. Atria Editorial.

Meyer, A. (2021). La figura de Geber y su influencia en la alquimia. Atria Editorial.

Meyer, L. (1864). *Die modernen Theorien der Chemie*.

Miller, J. (2013). *Chemistry: The central science* (12th ed.). Pearson. Petrucci, R

Miller, J. (2018). Avances médicos en el Imperio Romano. Revista de Historia de la Medicina, 23(4), 345-367.

Miller, J. (2020). *Fundamentos de la química moderna*. Editorial Académica

- Miller, J. C. (2018). **Statistics and quality control for the food industry**. Springer.
- Miller, R. (2018). **Electronegatividad y su importancia en la química moderna**.
Journal of Chemical Education, 95(7), 1265-1270. —
- Miller, R. (2019). **Principios de física y química**. Ediciones Universitarias.
- Miller, R. (2020). **Fundamentos de química: Interacciones intermoleculares**.
Editorial Universitaria.
- Morales, T. (2021). **Métodos de análisis en cinética química**. Química y Sociedad,
18(2), 34-50.
- Müller, T. (2018). Hildegarda von Bingen: Sabiduría y ciencia en la Edad Media.
Ediciones Académicas
- Nash, R. (2020). Historia de la alquimia: de la antigüedad al Renacimiento. Ediciones
Antiguas.
- Nash, R. (2020). Historia de la alquimia: de la antigüedad al Renacimiento. Ediciones
Antiguas.
- Nomenclatura química y su evolución. Revista de Química Moderna, 12(3), 45-58.
- OCDE. (2023). **Estudios de Química Básica**. Organización para la Cooperación y el
Desarrollo Económicos.
- OECD. (2021). **Pesticides and their impact on health and environment: Australia**.
- Olivares, A. (2021). **Termodinámica de los Gases**. Editorial Universitaria.
- Oxtoby, D. W., Gillis, H. P., & Butler, A. (2015). **Principles of Modern Chemistry**.
Cengage Learning.

Pauli, W. (1925). *Über den Ausschluß Prinzip der elektronischen*. Zeitschrift für Physik, 31(1), 765-783.

Pauling, L. (1960). *The Nature of the Chemical Bond* (3.^a ed.). Cornell University Press.

Pérez, A. (2021). *Biología celular y mecanismos de defensa*. Editorial Académica..

Pérez, A., Mendoza, P., & Villar, S. (2023). Efectos del estrés en el crecimiento de transformantes vegetales. *Revista de Biología Experimental*, 11(3), 128-135.

Pérez, C., & López, D. (2021). Título del artículo. *Nombre de la Revista*, volumen(número), páginas.

Pérez, D. (2022). Métodos avanzados en restauración de metales. Editorial Científica. DOI/URL (si aplica).

Pérez, J. (2019). *Los fundamentos de la química moderna*. Editorial Científica

Pérez, J. (2022). *Elementos de química y estructura atómica*. Revista de Química, 15(3), 45-60.

Pérez, J. (2022). Elementos y vicios: la transición de la alquimia a la química. Journal de Ciencias Naturales, 34(1), 92-110.

Pérez, J. (2022). Elementos y vicios: la transición de la alquimia a la química. Journal de Ciencias Naturales, 34(1), 92-110.

Pérez, L. (2020). *La azadiractina y su impacto en la agricultura biodinámica*. Editorial Agrícola.

Pérez, L. (2020). *Propiedades Físicas de los Gases*. Universidad Nacional.

Pérez, L. (2020). Abstracción y universalidad: una visión desde la alquimia medieval. *Anales de Historia y Filosofía*, 15(3), 230-250.

Pérez, L. (2020). Abstracción y universalidad: una visión desde la alquimia medieval. *Anales de Historia y Filosofía*, 15(3), 230-250.

Pérez, L. (2020). La vida de los metales: mitos y realidades. Editorial Metales.

Pérez, L. (2020). La vida de los metales: mitos y realidades. Editorial Metales.

Pérez, L. (2022). *La relación entre frecuencia y carga nuclear en metales*. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 14(1), 30-50.

Pérez, L., Rodríguez, E., & Hernández, C. (2021). Impacto de los sensores en la medición directa de muestras ambientales. *Ciencia y Tecnología Ambiental*, 18(3), 78-89.

Pérez, M. (2021). *Aspectos del equilibrio químico en sistemas dinámicos*. Revista de Química.

Pérez, M. (2022). *Desarrollo sostenible y conservación de los recursos hídricos en América Latina*. *Journal de Ecología y Desarrollo*, 8(3), 33-47.

Pérez, M. (2023). *Evaluación en el aula de ciencias: Estrategias y herramientas*. Revista de Didáctica de las Ciencias.

Pérez, M. (2023). *Evaluación formativa: Estrategias y prácticas en el aula universitaria*. Ediciones Académicas.

Pérez, R. (2020). Influencias de la alquimia en el pensamiento científico. *Análisis Histórico de la Ciencia*, 5(1), 22-35.

Pérez, R. (2021). Termodinámica de los gases. Publicaciones Científicas.

Pérez, R. (2023). La metalurgia en el Levante antiguo: zinc y sus aplicaciones. *Journal of Ancient Technologies*, 18(1), 30-50

Pérez, R., & Martínez, L. (2019). Evaluación de la fertilización en suelos con deficiencia de nutrientes en el sudoeste bonaerense. **Journal of Soil Science**, 27(3), 215-230.

Pérez, S. (2017). **Geometría molecular y su aplicación**. Ediciones de Ciencia

Pérez, S. (2018). La evolución del lenguaje químico a través de la historia. *Anales de Química Histórica*, 5(3), 88-99.

Pérez, S. (2020). Anodización: Principios y aplicaciones. *Química Innovadora*, 35(3), 210-223.

Pérez, T. (2023). **Principios de ebullición en mezclas líquidas**. *Journal de Química General*, 12(4), 12-18.

Pérez, T., & Martínez, B. (2021). La interdisciplinariedad en la investigación: Desafíos y oportunidades. *Journal de Investigación Multidisciplinaria*, 12(1), 45-58. Sánchez,

Peterson, R. E., & Lamm, M. H. (2020). **Química inorgánica**. W.B. Saunders.

Petrucchi, R. H., Harwood, W. S., & Herring, F. G. (2017). **General Chemistry**. Pearson.

Petrucchi, R. H., Harwood, W. S., & Herring, F. G. (2017). **Química General**. Pearson Educación.

Planck, M. (1901). On the law of the energy distribution in the normal spectrum. **Annalen der Physik**, 4(3), 553-563.

Press. Naylor, J. (2020). *Hidden Knowledge in the Alchemical Tradition*. London: Routledge.

Principe, L. (2012). *The Secrets of Alchemy*. University of Chicago Press.

Rai, R. (2020). **Introducción a la química atómica: fundamentos y aplicaciones**. Editorial Académica.

Raman, C. V. (1959). **The Physics of the Table of Elements**. *Journal of Chemical Education*, 36(7), 365-370

Ramírez, A. (2021). **Equilibrio y masa en reacciones químicas**. *Journal of Chemical Education*, 98(5), 1530-1535.

Ramírez, E. (2018). *Teorías contemporáneas en bioquímica*. Editorial Universitaria..

Ramírez, F., & Martínez, D. (2022). *Estudios sobre la electrodinámica en la agricultura de precisión. *Agricultura y Sustentabilidad**, 40(1), 67-83.

Ramírez, J. (2021). *Laboratorios en la historia de la química*. *Journal de Química Histórica*.

Ramírez, L. (2023). **Análisis y estudios químicos**. *Revista Universidad*, 10(1), 25-39

Ramírez, T. (2022). **Desarrollo de subsistemas agrícolas en contextos sostenibles**. *Boletín Agronómico*, 18(4), 201-210.

Ramírez, T. (2022). **La influencia de la carga en los enlaces químicos**. *Química General*.

Ramírez, T. (2023). **Dinámica de reacciones químicas**. Editorial Científica.

Ramírez, T. (2024). *La producción de bronce en las civilizaciones antiguas*. *Anales de Tecnología Histórica*, 12(4), 100-115.

Ramírez, V. (2020). Teoría y prefiguración en la alquimia. *Revista de Estudios Alquímicos*, 8(3), 100-116.

Ramírez, V. (2020). Teoría y prefiguración en la alquimia. *Revista de Estudios Alquímicos*, 8(3), 100-116.

Recuperado de [Link] Consejo Regulador de Agricultura Ecológica. (2021). *Registro de insumos para agricultura ecológica*.

Recuperado de [Link] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2020). *Insumos específicos de agricultura ecológica*.

Recuperado de [Link] Pauling, L. (1960). *The Nature of the Chemical Bond* (3.^a ed.). Cornell University Press

Recuperado de [Link] Unión Europea. (1991). *Reglamento (CEE) N° 2092/91 sobre producción ecológica*.

Reid, R. C., Prausnitz, J. M., & Guillermo, J. (2019). *El comportamiento de fluidos de ingeniería*. McGraw-Hill.

Rodríguez, A. (2018). *Fundamentos de la cinética química y su aplicación*. Prensa Científica.

Rodríguez, A. (2021). *Estructura atómica: Una perspectiva contemporánea*. Universidad Científica.

Rodríguez, M. (2021). Técnicas Metalúrgicas en Civilizaciones Antiguas. *Revista de Arqueología*, 15(3), 45-67.

Rodríguez, T. (2018). El arte de la forja: Fabricación de acero en la antigüedad. *Historias del Hierro*, 28(1), 22-38.

Rojas, L. (2020). Influencia griega en la medicina romana. *Journal de Estudios Clásicos*, 12(2), 112-130

Rutherford, E. (1911). *The Scattering of Alpha and Beta Particles by Matter and the Structure of the Atom*. *Philosophical Magazine*, 21(125), 669-688.

Salvio, J. (2023). *Química del enlace covalente*. Editorial Universitaria.

Sánchez, E. (2021). *Estereoisomería y estructura molecular*. *Journal of Molecular Chemistry*.

Sánchez, E. (2022). Crecimiento y periodicidad en la naturaleza: un análisis filosófico. *Revista de Filosofía Natural*, 12(1), 30-50.

Sánchez, E. (2022). Crecimiento y periodicidad en la naturaleza: un análisis filosófico. *Revista de Filosofía Natural*, 12(1), 30-50.

Sánchez, F. (2017). La adaptación en contextos de crisis. Editorial Avance.

Sánchez, L. (2021). El vidriado de cerámicas: Tradición y técnica moderna. *Cerámica en Historia*, 15(2), 90-102. –

Sánchez, N. (2018). *Avances en la química del siglo XX*. Editorial Universitaria

Sánchez, R., & López, A. (2021). *Estudios sobre los estados de la materia*. *Journal de Ciencias Naturales*, 15(2), 85-99.

Sánchez, T. (2018). *Desarrollo y evolución de la tabla periódica*. *Revista de Historia de la Ciencia*, 5(3), 15-29.

Sánchez, T. (2022). *Principios y leyes en la ciencia químicaReferencias

Schmidt, K. (2019). Elusivos objetivos en la historia del pensamiento. *Análisis Filosófico*, 29(4), 112-130.

Schmidt, K. (2019). Elusivos objetivos en la historia del pensamiento. *Análisis Filosófico*, 29(4), 112-130.

Sienkiewicz, A. (2020). **Fundamentos de química orgánica**. Editorial Universitaria.

Silva, T. (2023). *La luz en la alquimia: un camino hacia lo espiritual*. Ediciones Lumina.

Silva, T. (2023). *La luz en la alquimia: un camino hacia lo espiritual*. Ediciones Lumina.

Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J. & Crouch, S. R. (2014). **Fundamentals of Analytical Chemistry** (9a ed.). Cengage Learning

Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). **Fundamentos de análisis químico**. 9. ed. Cengage Learning

Smith, A. (2020). *Equilibrios químicos en sistemas dinámicos*. Universidad de la Ciencia.

Smith, A. (2021). **Fuerzas intermoleculares y materiales**. *Journal of Advanced Materials*, 23(6), 112-128.

Smith, A. J., Doe, J., & Brown, R. (2020). **Soil nutrient management for sustainable agriculture**. Chicago: Agricultural Research Publications.

Smith, B. (2020). **Principios de la química moderna**. Academia Científica.

Smith, D. (2020). **Química de coordinación: principios y aplicaciones**. Chemistry Press.

Smith, D. (2020). Los orígenes del cobre en el Egipto antiguo. *Estudios Egiptológicos*, 22(9), 78-95.

Smith, D. (2020). Los orígenes del cobre en el Egipto antiguo. *Estudios Egiptológicos*, 22(9), 78-95.

Smith, E., Johnson, F., & Brown, G. (2020). Título del artículo. *Nombre de la Revista*, volumen(número), páginas.

Smith, J. (2020). *Catalysis: Principles and Applications*. Springer.

Smith, J. (2020). *Compuestos químicos en la industria moderna*. Editorial Técnica

Smith, J. (2020). *Electroquímica y sus aplicaciones*. Prensa Académica

Smith, J. (2020). *Ionización y propiedades atómicas*. *Revista de Ciencias Naturales*, 12(1), 56-62. –

Smith, J. (2020). *Metalurgia en el Antiguo Egipto*. Editorial Historia Antigua.

Smith, J. (2022). *Fundamentos de la Estequiometría Moderna*. Editorial Científica.

Smith, J. M. (2010). *Química: un enfoque moderno*. McGraw-Hill Education.

Smith, J. M. (2015). *Chemical Engineering Thermodynamics* (2nd ed.). McGraw-Hill.

Smith, J., & Johnson, M. (2021). *Reacciones y equilibrio químico*. Wiley.

Smith, J., & Jones, A. (2023). *Fertilizantes naturales en la agricultura australiana: un futuro sostenible*. *Journal of Organic Farming*, 10(2), 112-124

Smith, R. (2020). *Dinámicas de corrientes oceánicas en regiones tropicales*. *Journal of Oceanography*, 15(1), 30-47.

Smith, T. (2020). *Introducción a la química: conceptos fundamentales*. Editorial Académica.

- Snyder, L. R. (2010). **Practical HPLC method development** (2a ed.). John Wiley & Sons.
- Sokoloff, A. (2019). La medicina en la antigua Grecia: Historia y legado. *Journal of Historical Medicine*, 12(4), 433-450.
- Tame, R. (2020). **Conceptos fundamentales de química**. Editorial XYZ.
- Taylor, H. (2022). **El carbono: un elemento versátil en la tabla periódica**. *International Journal of Chemistry*, 10(4), 78-89
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108*(50), 20260-20264.
- Torrance, J. H., Wallace, M. O., & Tindall, J. A. (2018). Analytic approaches to agricultural chemistry. **Agricultural Chemistry Journal**, 23(2), 45-57.
- Torres, F. (2023). *Conexiones cósmicas: la relación entre naturaleza y alquimia*. Editorial Cosmos.
- Torres, F. (2023). *Conexiones cósmicas: la relación entre naturaleza y alquimia*. Editorial Cosmos.
- Torres, G. (2021). *Desafíos y soluciones en la industria moderna*. Editorial Progreso
- Torres, H. (2022). Título del artículo. **Nombre de la Revista**, volumen(número), páginas
- Torres, I. (2020). **Poliedros de coordinación y su interpretación**. *Revista de Estudios Químicos*

Torres, M., & López, A. (2019). *Modelo cinético-molecular: una aproximación a la comprensión de la materia*. Journal de Ciencias Básicas, 15(3), 102-117

Unidad 1

United States Department of Agriculture (USDA). (2022). *Reporte sobre cultivos transgénicos en Estados Unidos*. Recuperado de https://www.usda.gov/

Valdés, R. (2021). *Introducción a la química: Composición y estructura de las moléculas*. Ediciones Académicas

Verlag von S. Hirzel. Mendeleev, D. (1869). *Principles of Chemistry*. Printing Office of the Imperial Academy of Sciences

W. H. Freeman. Jung, C. F. (2017). *Thermodynamics and Kinetics of Chemical Reactions*. Wiley.

Wang, S. (2020). *Introduction to Quantum Mechanics*. Academic Press.

Wiley. - Levenspiel, O. (1999). *Chemical reaction engineering*. Wiley.

Wiley. Smith, J. M. (2020). *Chemical Engineering: A New Approach*. Pearson.

Wiley. White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (7a ed.). New York: McGraw-Hill

Wiley-Interscience. Harris, D. C. (2010). *Quantitative chemical analysis*. W.H. Freeman and Company

Yazdani, Y., Haghverdi, A., & Nourozian, M. (2020). Isótopos y su aplicación en la ciencia ambiental. *Revista de Química Ambiental*, 45(2), 123-134.

Zhang, Y. (2020). *Química general: Teoría y práctica*. Ediciones Académicas.

Zumdahl, S. S., & Zumdahl, D. J. (2014). *Chemistry*. Cengage Learning.

Zumdahl, S. S., & Zumdahl, D. J. (2017). **Chemistry** (9.a ed.). Cengage Learning.

Fernández, A. (2022). Principios de biología sintética. **Revista de Biotecnología**, 10(3), 123-134.

Fernández, J. (2021). **Impactos de la inteligencia artificial en la agricultura**. Editorial Agrícola.

Fernández, J. (2021). Innovación en la agricultura: un enfoque hacia el futuro. *Revista de Agricultura Sostenible*, 15(3), 45-58.

Fernández, J. (2022). Avances en química orgánica y su aplicación en la industria. **Revista de Innovación Tecnológica**, 15(3), 45-60. -

Fernández, J., & Ramírez, L. (2023). Avances en biotecnología agrícola: Implicaciones y futuro. **Revista de Biología Aplicada**, 15(2), 45-62. - González, A., Martínez, T., &

Fernández, L. (2023). Innovaciones en la tecnificación de laboratorios de cultivo de tejidos. **Journal de Biotecnología Vegetal**, 12(1), 22-30. –

Fernández, M. (2023). **Innovaciones en biología sintética y su impacto en la sostenibilidad**. Editorial científica.

Fernández, P. (2019). Ética y biotecnología: un análisis crítico. **Revista de Bioética**, 14(2), 45-58.

Fukuyama, F. (1999). **The Great Disruption: Human Nature and the Reconstitution of Social Order**. Free Press.

García, A., & Martínez, L. (2020). Efectos de la tecnología en el sector agrícola. *Journal de Ciencias Agropecuarias*, 10(2), 73-85.

- García, J. (2020). La gestión equitativa de los recursos naturales. *Revista de Agricultura Sostenible*, 12(3), 45-60. –
- García, J. (2021). **Intereses y poder en la biotecnología: Una revisión crítica**. Editorial Académica.
- García, M. (2019). *Transferencia de tecnología: un enfoque integral*. Editorial Universitaria.
- García, M., Pérez, S., & Ruiz, T. (2021). Interacción entre IAA y rizobios: implicaciones en el crecimiento de plantas. **Ecología y Microbiología**, 29(3), 341-357. –
- García, M., Sánchez, L., & Torres, R. (2023). Impacto ambiental de la producción de proteínas sintéticas. **Revista Internacional de Biotecnología**, 29(3), 233-245.
- García, P., & Martínez, A. (2023). **Ética y tecnología en la producción agroalimentaria**. *Revista de Agricultura Sostenible*, 15(2), 135-150.
- García, R., & López, M. (2020). **Remedios contemporáneos: Un estudio de la alquimia moderna**. *Revista de Estudios Esotéricos*, 12(4), 45-67.
- Gómez, J. (2020). **Estrategias para el control de agroquímicos**. *Revista de Ciencias Agrarias*, 15(2), 45-60. -
- Gómez, L. (2022). Avances en nanotecnología agrícola. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 15(3), 45-56.
- González, A. (2019). **Agricultura sostenible en Argentina: un análisis de sus retos y oportunidades**. Editorial Universitaria. -

González, A. (2020). *Biotecnología y sostenibilidad: hacia un futuro verde*. Editorial Verde. López, M. (2022). *El impacto económico de los productos biodegradables*. Revista de Economía Ambiental, 15(2), 45-59.

González, A., López, M., & Ruiz, J. (2023). Innovaciones en nano-tecnología para la agricultura sostenible. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 45(2), 123-135.

González, J. (2020). *La revolución del Big Data: Nuevas perspectivas en la gestión empresarial*. Editorial Innovación.

González, J. (2021). *La Era de los Metales: Avances y Creencias*. Editorial Histórica. –

González, J., Pérez, A., & Martínez, R. (2020). *Desafíos y oportunidades en la biotecnología agropecuaria*. Revista de Biotecnología, 15(3), 45-56.

González, M. (2019). *Avances en la química de los ácidos*. Rev. Química Moderna, 15(2), 45-58.

González, M. (2020). *Regulaciones sobre cultivos transgénicos y su marco legal*. Editorial Agrícola.

González, M. (2020). Estrategias de cooperación en la agroindustria. *Estudios de Desarrollo Agropecuario*, 12(2), 78-89. -

González, M. (2021). Perturbaciones en sistemas biológicos. *Journal of Biological Systems*, 15(2), 45-60

González, M., López, R., & Torres, A. (2020). *Biología sintética y niveles de resistencia en cultivos*. Revista de Biotecnología, 15(3), 45-58. Pérez, J., &

González, M., Pérez, A., & Torres, L. (2022). *Microorganismos beneficiosos en la agricultura: potencial y aplicaciones*. Revista de Ciencias Agrarias, 15(2), 123-135.

González, R. (2010). *La sostenibilidad en el desarrollo económico del siglo XX*. Editorial Universitaria.

González, R. (2020). *El futuro de la química sintética y los compuestos biológicos*. Journal de Química Aplicada, 10(1), 23-30. -

Hernández, M. (2020). *Innovaciones Químicas en el Mundo Antiguo*. Editorial Historia. –

Hernández, R. (2023). Innovaciones en sistemas de producción agrícola. Revista Internacional de Tecnología Agrícola, 15(4), 150-165.

Hsu, P. D., Lander, E. S., & Zhang, F. (2014). Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering. *Cell*, 157(6), 1262-1278. -

Jayaraman, K. (2020). Efectos de los plaguicidas en la agricultura moderna. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 45-60. -

Jiménez, R. (2019). *La alquimia y sus métodos*. Historia de la Ciencia, 8(3), 21-36.

Jinek, M., East, A., Cheng, A., & Doudna, J. (2012). A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*, 337(6096), 816-821.

Johnson, R., Smith, T., & López, M. (2022). *Revoluciones tecnológicas y su impacto en la economía agrícola*. Journal of Agricultural Technology, 8(4), 45-60.

Kumar, R., & Singh, A. (2021). Innovaciones en cultivos de algodón Bt y su impacto económico. *Journal de Agricultura Sustentable*, 15(4), 200-215.

Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados. (2005). Recuperado de [URL del documento] Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2005). Informe sobre la regulación de OGM en México. Recuperado de [URL del documento]

López, J. (2019). *Diversidad genética y sistemas agrícolas*. Journal of Agricultural Sciences, 15(3), 99-110

López, J., & Martínez, R. (2019). Implementaciones en biología sintética. *Investigaciones en Biología Sintética*, 8(1), 99-110.

López, M. (2020). La relación entre academia y empresa: tensiones y posibilidades. Estudios Universitarios, 10(1), 23-39. -

López, M. (2022). Cambio climático y seguridad alimentaria: desafíos contemporáneos. Agroecología y Desarrollo, 19(1), 25-38. –

López, M. (2023). *Agricultura y bioquímica en la era digital: desafíos y oportunidades*. Editorial Científica.

López, M., & Rodríguez, P. (2022). *Diseño de nuevos fitosanitarios*. Journal of Plant Protection, 18(3), 123-137. -

López, R. (2019). Tecnología y desarrollo agrícola: un análisis de su convergencia. Revista de Desarrollo Rural, 7(1), 25-39.

López, R. (2021). *Universidades y Cambio Paradigmático*. Historia de la Educación Superior. –

López, R. (2021). La importancia de la cooperación internacional en la innovación tecnológica. Revista de Ciencia y Tecnología, 15(2), 112-124.

- López, R., & Pérez, S. (2019). Organismos genéticamente modificados: Debate y percepción social. **Investigaciones en Ciencias Sociales**, 7(3), 100-115. –
- López, T. (2021). **Ciencia básica y ciencia aplicada en el futuro del agro**. **Agricultura y Ciencia**, 28(2), 112-120.
- Martínez, A. (2015). **Tecnologías limpias y su impacto en la sostenibilidad**. *Revista de Ecología*, 10(2), 45-60..
- Martínez, A. (2021). Producción agrícola y huella ecológica. *Journal of Ecological Practices*, 8(2), 99-115. –
- Martínez, A., & López, E. (2020). Microorganismos promotores de la resistencia en sistemas vegetales. **Revista Latinoamericana de Fitopatología**, 18(4), 85-97. –
- Martínez, C. (2019). **Perspectivas políticas en biotecnología**: Una visión crítica. **Política y Sociedad**, 34(1), 70-85.
- Martínez, C. (2023). El aprendizaje crítico como herramienta de desarrollo. **Journal de Estudios Cognitivos**, 15(2), 114-130. –
- Martínez, J. (2021). Mejora genética en la agricultura moderna. **Agricultura y Sostenibilidad**, 12(1), 12-25.
- Martínez, J. (2022). **Estrategias en biología sintética para la producción de azúcares**. *Revista de Biotecnología Industrial*, 15(2), 45-58. - Pérez, L., &
- Martínez, J. (2023). **Nanotecnología y sus aplicaciones en la industria moderna**. *Revista de Innovación Tecnológica*, 12(1), 23-37.
- Martínez, J., & López, R. (2021). **Análisis de riesgos en biotecnología agrícola**. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 15(2), 35-48.

Martínez, L. (2019). Innovación en el sector agropecuario: Un enfoque desde el sector privado. **Journal de Economía Agrícola**, 10(1), 22-34. -

Martínez, L. (2020). **La ciencia y la tecnología en la sociedad: Retos y oportunidades**. Ediciones Universitarias.

Martínez, L. (2021). **Edición genética y su impacto en la agricultura moderna**. *Journal de Ciencias Agrarias*, 10(2), 22-37.

Martínez, L. (2021). **Transformaciones en el sector agroalimentario: Desafíos y oportunidades**. Ediciones Agropecuarias

Martínez, L. (2022). **Pensamiento Crítico en la Educación Actual**. *Journal of Educational Research*. –

Martínez, L., & Fernández, S. (2020). **Invasiones biológicas y impactos en la agricultura**. *Boletín de Biología*, 8(3), 34-49.

Martínez, R. (2019). **Alquimia y ciencia: una relación simbiótica**. Editorial Universitaria.

Martínez, R. (2019). **Impacto ambiental de los agroquímicos**. *Ecología y Medio Ambiente*, 12(1), 30-44. -

Martínez, R. (2022). Estrés en cultivos: Mecanismos y soluciones biotecnológicas. **Revista de Agricultura Sustentable**, 10(4), 33-50. –

Martínez, R. (2023). Emprendimiento universitario: perspectivas y desafíos. *Journal de Innovación y Emprendimiento*, 5(3), 150-165. -

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2020). **Plan Nacional Agroalimentario y Agroindustrial**. Gobierno de Argentina.

Pérez, A. (2022). Empresas de base científico-tecnológica: un nuevo horizonte para la educación superior. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 8(4), 88-102.

Pérez, A., & González, L. (2021). Innovaciones en biotecnología. *Revista de Biotecnología Agrícola*, 15(4), 320-335. –

Pérez, A., & López, M. (2020). Innovaciones biotecnológicas en cultivos: desafíos y oportunidades. **Ciencia y Tecnología Agraria**, 18(4), 87-99.

Pérez, J., & Martínez, R. (2021). Aplicaciones de nanopartículas en la agricultura moderna. *Journal de Agricultura Sostenible*, 10(2), 112-124.

Pérez, L. (2021). **Edición de genoma y sus aplicaciones en la agricultura moderna**. *Revista de Biotecnología*, 15(3), 45-60.

Pérez, L. (2022). **Diseño computacional y biopartes: un camino hacia adelante**. **Tecnología en Biología**, 17(1), 21-35.

Pérez, L., González, T., & Rivera, S. (2021). **Interacciones superficiales en nanopartículas agrícolas**. *Nanotecnología en la Agricultura*, 9(4), 88-102. -

Pérez, M., Rodríguez, L., & Martínez, J. (2018). **Cultivos sostenibles y su contribución a la salud ambiental**. *Agroecología*, 22(1), 15-30.

Pérez, R. (2019). Estrategias de control biológico en fitopatología. **Boletín de Fitopatología**, 15(2), 73-80. –

Pérez, R. (2021). **Biología de precisión: el futuro de la agricultura sostenible**. Editorial Agrícola.

Pérez, R., & Martínez, L. (2022). Impacto ambiental de los nano-pesticidas: un enfoque regulatorio. **Journal de Ecología y Agronomía**, 19(1), 67-80.

Pérez, S. (2020). Las facultades como motores de la innovación tecnológica. *Journal de Educación Superior*, 8(3), 45-58.

Pérez, T. (2022). *Extracción de azufre: Técnicas y procesos*. *Ciencia y Química*, 6(2), 34-50.

Ramírez, E. (2022). *Microbios programados para el período de respuesta*. *Revista Internacional de Biología, 10(4)*, 99-110.

Ramírez, T., Ruiz, P., & Torres, S. (2023). Modelado de sistemas biológicos. *Anales de Biología Computacional*, 5(4), 200-215.

Rodríguez, A. (2020). *La Educación como Pilar del Progreso*. *Análisis Sociocultural*. –

Rodríguez, A. (2021). Oferta tecnológica en el sector agropecuario: Un análisis regional. *Revista de Tecnología y Agricultura*, 8(4), 112-126.

Rodríguez, L., & Sánchez, F. (2022). Uso de bloqueadores químicos en el manejo de patógenos. *Revista de Protección de Cultivos*, 26(1), 60-72. -

Rodríguez, Q. (2021). La seguridad alimentaria en el contexto biotecnológico. *Revista de Seguridad Alimentaria*, 11(2), 102-115.

Rodríguez, S. (2021). *La sinergia entre biología y evolución sostenible en el agro*. *Agroecología y Desarrollo Sostenible*, 5(2), 234-240.

Salazar, F. (2023). *Patógenos y biocidas: Un desafío para la agricultura moderna*. *Revista Internacional de Fitopatología*, 7(1), 67-75.

Sánchez, M., Rodríguez, T., & López, R. (2022). Biotecnología sintética: nuevas perspectivas y aplicaciones. *Journal of Agroecological Advances*, 10(2), 172-184.

Sánchez, R., & Torres, H. (2023). *Modelos de diseño en biología analítica y su aplicación*. *Revista de Biología Aplicada*, 9(5), 133-145.

Sánchez, L. (2023). *Inteligencia artificial y bioprocesos: una nueva era para la bioindustria*. Journal of Biotechnology, 8(3), 200-215.

Sierra, M. (2021). Vacunas comestibles: una innovación biotecnológica para la agricultura. *Cultivos y Biotecnología*, 8(1), 12-19. –

Silva, T. (2021). *Políticas agrícolas y biodiversidad: Un análisis crítico*. Ecología Política, 18(4), 217-234.

Smith, A. (2021). *Organismos transgénicos y su impacto en la agricultura*. Estudios Agronómicos, 28(3), 112-125.

Smith, C. (2013). TALEN technology: A new toolkit for gene editing. *Nature Methods*, 10(7), 677-678. [Link]

Smith, C., & Johnson, R. (2022). La comparación de métodos de producción de proteínas. *Journal of Biological Engineering*, 16(1), 75-88.

Smith, J. (2020). *Innovaciones en biotecnología agrícola*. Editorial Agrícola.

Smith, J. (2020). *La química de los ácidos y su evolución*. Journal of Chemical History, 5(1), 66-73

Smith, J. (2020). Biotecnología y sostenibilidad agrícola. Editorial Científica. –

Smith, J. (2020). El estado de la biotecnología moderna. *Journal of Global Science*, 22(5), 125-133.

Smith, J. (2021). *La biología sintética en la agricultura: nuevas fronteras*. Editorial Agrícola.

Smith, J. (2021). *Reingeniería de la cadena de valor en la bioindustria*. Global Biotechnology Review, 10(4), 88-101.

Smith, J. (2022). *Comprendiendo los sistemas biológicos complejos*. *Biología Avanzada*, 12(4), 256-270.

Smith, R. (2020). Análisis de componentes biológicos. *Biología Moderna*, 12(2), 78-89.

Smith, T. (2022). *Tendencias en bioquímica y agricultura: un análisis contemporáneo*. Universidad de Ciencias Agrarias.

Sternberg, R. J. (2006). *The Development of Intelligence*. In *Handbook of Child Psychology* (Vol. 2). Wiley.

Torres, I. (2021). Importancia del análisis metabólico en el desarrollo de plantas. *Revista Internacional de Biología*, 10(2), 112-125.

Torres, L. (2023). *Las políticas agroalimentarias y la inteligencia artificial: un futuro incierto*. Revista Internacional de Políticas Agrarias, 10(3), 200-215.