

PROPUESTA PARA UN ENFOQUE DE LA QUÍMICA ORGÁNICA CONTEXTUALIZADO DESDE LA QUÍMICA VERDE, APOYADO CON TIC

Pedro Casullo Cabrera

Profesorado Semipresencial – CERP del Este.

pedro.casullo@gmail.com

Resumen

Se describe una propuesta de enseñanza para un curso introductorio de química orgánica dirigido a estudiantes de profesorado de química. Esta propuesta tiene como eje la vinculación de dicha rama de la química con la perspectiva de la química verde, dándole a las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) un rol preponderante entre los recursos educativos utilizados.

La vinculación entre química orgánica y química verde se plantea desde una perspectiva Ciencia, Tecnología, Sociedad y Ambiente (CTSA).

El uso de las TIC apunta a resolver la dificultad que implica la visualización en tres dimensiones de las moléculas orgánicas. Esto también se aplica al aprendizaje de la formulación, la nomenclatura, la comprensión de mecanismos de reacción y la evaluación.

Palabras clave: química orgánica, química verde, TIC.

Introducción

En el presente trabajo se expone un proyecto de aula sobre el tratamiento de la estructura y propiedades de las moléculas orgánicas para, a partir de las mismas, explicar las propiedades físicas y químicas de las sustancias constituidas por estas moléculas.

Considerando que el tema está dirigido a futuros profesores, cuyo rol principal será formar ciudadanos, por lo que es sumamente relevante el enfoque ético de la enseñanza, se propone el tratamiento de la química orgánica con la perspectiva de la química verde.

Con respecto a la enseñanza de la química orgánica, la experiencia docente evidencia que uno de los mayores obstáculos para el aprendizaje de esta disciplina se encuentra en las dificultades que presentan los estudiantes para visualizar las moléculas en tres dimensiones. Esto es confirmado por las investigaciones sobre el tema.

La estereoquímica es la rama de la química orgánica, que estudia la disposición espacial que asumen los átomos o grupos en una molécula orgánica o inorgánica; en este campo de la química se presentan importantes problemas de comprensión para los estudiantes, según Ferik, Vrtacnik & Andrej (2003) debido en parte a la alta exigencia cognitiva que se requiere. Durante un estudio previo sobre estereoquímica, inteligencia viso-espacial y procesos metacognitivos realizado en la Universidad de Caldas, se pudo evidenciar que las habilidades viso-espaciales de los estudiantes son restringidas y adicionalmente no son tenidas en cuenta durante la enseñanza de conceptos que requieren estas habilidades para poder ser comprendidos adecuadamente. (Cadamid y Tamayo, 2013, p. 547).

Para solucionar este problema es habitual el uso de modelos moleculares materiales de bolas y varillas. Estos, si bien facilitan este aprendizaje, presentan algunas dificultades. El armado de los mismos requiere tiempo, por lo que no son prácticos para la representación de macromoléculas. Por otra parte, la cantidad de modelos en las instituciones educativas suele ser escasa, limitando el uso individual por parte de los estudiantes.

Sin embargo existe software que puede suplir esta dificultad. Los programas de representación molecular tienen características que, en algunos aspectos, superan a los modelos materiales. Por ejemplo, muchos de ellos muestran los ángulos y longitud de enlace. Después de aprender su utilización, es mucho más rápido realizar representaciones moleculares que con los modelos materiales.

Algunos de estos programas permiten representar fórmulas estructurales en dos o en tres dimensiones y escribir ecuaciones químicas. ChemSketch (ACD/Labs 2008), por ejemplo, permite representar las moléculas en dos dimensiones y visualizarlas en tres. Además del aprovechamiento directo de la herramienta,

los estudiantes están aprendiendo el uso de esta, lo que resultará aplicable a su futura labor como docentes.

Junto con el uso de programa de representación y visualización molecular, se plantea el uso de diversos recursos virtuales: sitios interactivos sobre mecanismos de reacción, plataformas con actividades de autoevaluación interactivas, juegos virtuales de aprendizaje.

El uso de recursos digitales permite que la propuesta sea fácilmente adaptable, tanto para la modalidad de cursado del profesorado presencial, como semipresencial. En el uso de estas se priorizan las metodologías de trabajo activas sobre las expositivas. Esto se fundamenta tanto en la experiencia docente, como en investigaciones que evidencian las ventajas de las primeras en cuanto a motivación y aprendizaje.

Esto cobra relevancia considerando la importancia que tienen, para el desempeño futuro del docente, los modelos didácticos que recibe mientras es estudiante. (Marcelo, 2010, pp. 22-23). Es decir que, además de que las estrategias de enseñanza que se utilizan son relevantes para que el estudiante aprenda los contenidos específicos, estas pueden servir de referencia para su futura labor como docente.

Contenidos específicos a tratar

Al comenzar a trabajar química orgánica, se considera relevante que el estudiante considere la existencia de algunos prejuicios o concepciones alternativas sobre esta temática. Algunos de estos prejuicios son, en parte, responsables de la mala imagen que tiene la química, contribuyendo con la generación de rechazo por parte de los alumnos. (Chamizo, 2011). Uno de estos prejuicios es la identificación social que tiene lo natural como sinónimo de bueno y artificial o sintético como sinónimo de malo. Una confusión similar se produce con el uso del término “orgánico” como sinónimo de natural y no contaminado. Por eso es muy importante trabajar sobre estas concepciones, aclarando muy bien el concepto de química orgánica, su rol social, su incidencia en la vida actual, considerando sus repercusiones, tanto en los aspectos positivos, como es el aumento de la expectativa de vida; como en los negativos, por ejemplo la producción de residuos no biodegradables.

Luego de esto se tratan las propiedades físicas y químicas de las sustancias orgánicas a partir de teoría cinético – molecular.

La verdadera utilidad del estudio teórico – corpuscular de la materia es que permite explicar las propiedades de las sustancias. “La química orgánica siempre ha sido, y continúa siendo, la rama de la química que mejor relaciona la estructura con las propiedades.” (Carey 2006, p. 27), “(...) la teoría estructural es la base sobre la cual se han acumulado millones de hechos acerca de cientos de miles de compuestos individuales, ordenándolos en forma sistemática.

Es la base sobre la que estos hechos pueden explicarse y comprenderse mejor.” (Morrison y Boyd, 1998, p.3).

Esta propuesta está planificada para un solo curso destinado a la formación de profesores, independientemente de que pueda utilizarse en otros contextos. Esto impone la necesidad de un recorte, realizando una jerarquización y priorización de contenidos. Al realizar dicha priorización se considera para quiénes está destinada esta propuesta (futuros profesores de educación media) y por qué estos destinatarios requieren tener los conocimientos y desarrollar las competencias que se trabajarán. En química orgánica es fundamental que el futuro profesor desarrolle las competencias necesarias para analizar las propiedades macroscópicas, tanto físicas como químicas, de las sustancias orgánicas y explicarlas desde la referida teoría estructural. Por lo tanto, estructura molecular y reactividad son conceptos estructurantes de química orgánica.

Las principales propiedades físicas que el estudiante tiene que explicar son temperatura de ebullición, temperatura de fusión, densidad y solubilidad. Para ello requiere el conocimiento de la polaridad o carga de las partículas que forman las sustancias (moléculas o iones), y de las fuerzas intermoleculares u otras interacciones entre partículas. Para ello debe determinar previamente el tipo de enlace de las moléculas y su geometría, los dos factores que determinan su polaridad. Esto implica el uso del concepto de momento dipolar.

En cuanto a las propiedades químicas, debe determinar la clase de reactivos con la que reacciona, el tipo de productos que se forma y la rapidez con la que se producen cada una de las referidas reacciones. Esto último implica también la comprensión de los mecanismos de reacción. Dicha comprensión requiere que el estudiante, mediante el análisis de la estructura molecular, sea capaz de predecir su reactividad como nucleófilo o como electrófilo, como ácido o como base. Se propone una muestra de diferentes ejemplos de mecanismo de reacción, favoreciendo una comprensión de los mismos, que luego pueda ser aplicada a otras situaciones. Es decir que se procura una asimilación de dichos mecanismos, y de las variables que en ellos inciden, más que la memorización de los mismos.

Se trabaja con ejemplos de cada uno de los mecanismos más representativos: sustitución por radicales, sustitución nucleofílica bimolecular y unimolecular, eliminación unimolecular y bimolecular, adición electrofílica y sustitución electrofílica aromática.

Con respecto al tema estructura, se plantea el análisis de las fórmulas y las distintas formas de representación, partiendo de las más sencillas para luego pasar a las más abstractas: desarrollada, semidesarrollada, condensada, simplificada, representaciones de cuñas, proyecciones de Fischer y estructuras de Newman.

Paralelamente a esto, se trabaja nomenclatura aplicando las reglas de la IUPAC, y se plantea la existencia de distintos tipos de isomería.

La orgánica es una rama específica de la química. El futuro profesor contribuirá a formar a sus alumnos principalmente en aspectos generales de la misma. Considerando esto, ¿qué enfoque de la enseñanza de la química orgánica debe proponerse?

Muchos de los estudiantes que pasan por educación media, en la que los futuros profesores se desempeñarán, no seguirán carreras vinculadas directamente con la química. La función principal de la química para estos estudiantes es la alfabetización científica. Los problemas ambientales atañen a todos los ciudadanos y están muy vinculados con la referida disciplina científica. Y muy especialmente con la química orgánica. Ante esto ha surgido un enfoque de la química que apunta a revertir esta situación, previniendo las acciones que la provocan. Este enfoque es llamado química verde, sustentable o sostenible. Independientemente del nombre, esta se refiere al uso de principios y metodologías de la química para prevenir la contaminación, partiendo de la consigna de que es mejor prevenir que luego solucionar las consecuencias. (Anastas y Warner, 2000). Para llevar esto adelante Anastas y Warner proponen 12 principios:

1. Evitar los residuos (insumos no empleados, fluidos reactivos gastados).
2. Maximizar la incorporación de todos los materiales del proceso en el producto acabado.
3. Usar y generar sustancias que posean poca o ninguna toxicidad.
4. Preservar la eficacia funcional mientras se reduce la toxicidad.
5. Minimizar las sustancias auxiliares (por ejemplo disolventes, agentes de separación).
6. Minimizar los insumos de energía (procesos a presión y temperatura ambiental).
7. Preferir materiales renovables frente a los no renovables.

8. Evitar derivaciones innecesarias (por ejemplo grupos de bloqueo, pasos de protección y desprotección).
9. Preferir reactivos catalíticos frente a reactivos estequiométricos.
10. Diseñar los productos para su descomposición natural tras el uso.
11. Vigilancia y control «desde dentro del proceso» para evitar la formación de sustancias peligrosas
12. Seleccionar los procesos y las sustancias para minimizar el potencial de siniestralidad. (Mascarell y Vilches, 2016, p. 28 – 29).

Refiriéndose a los campos de aplicación de la química sostenible, Mestres afirma:

En efecto, los principios están dirigidos a la química preparativa y aparentemente a la síntesis orgánica. De hecho, los mayores éxitos en la aplicación de los 12 principios se han dado en las industrias de la química fina y farmacéutica, que emplean fundamentalmente conversiones orgánicas. Sin embargo, el ámbito es más amplio y contiene aspectos tales como el cambio climático y la producción energética. (Mestres, 2011, p. 22).

La química verde no es otra rama de la química, sino un enfoque transversal de esta, pero sus mayores aplicaciones están vinculadas con la orgánica.

Otro aspecto muy relevante que ofrece la química verde para la formación de profesores, es la posibilidad de contextualización de los contenidos. En este sentido quien presenta este proyecto acuerda con Mascarell y Viches, en cuanto a la importancia de

(...) hacer comprender la relevancia de la química en nuestras sociedades, en particular en el desafío al que nos enfrentamos: la construcción de un futuro sostenible en el que la química debe desempeñar un importante papel. Por tanto abordar esta problemática en las clases de ciencias, y muy en particular en la formación del profesorado, contribuirá a mostrar una imagen más real, más contextualizada de la química y, al mismo tiempo, a superar algunas reticencias e incomprensiones hacia el papel y la responsabilidad de la química frente a los problemas del planeta, favoreciendo así el interés de los jóvenes hacia esta y su estudio (Mascarell y Vilches, 2016, p. 28).

La síntesis de contenido que se realiza aquí es muy escueta. Esta se amplía al plantear el desarrollo de la secuencia didáctica que se propone.

Fundamentación histórica y epistemológica de la relevancia disciplinaria del tema

Al trabajar cada uno de los conceptos se analizará el contexto histórico en el que estos surgieron. Saber cómo se ha ido construyendo el conocimiento científico aporta al docente una perspectiva de la ciencia para evitar dar una imagen estática de esta. Muchas veces se enuncian las teorías como si fueran hechos indiscutibles. Una forma de evitar esto es ir contextualizando históricamente los conceptos, lo que muchas veces no se hace por falta de tiempo, falta de conocimiento del docente, o una postura epistemológica positivista que solo pone el énfasis en el resultado final de la investigación.

Una gran parte de la ciencia escolar consiste en un conjunto de herramientas conceptuales que se proporcionan a los estudiantes, aparentemente salidas de la nada, y cuya justificación se encontraría siempre a posteriori, siendo entonces que el contenido conceptual de la ciencia presentado a los estudiantes no contienen problemas, sino únicamente las soluciones.

En razón de lo anterior, al suprimir los problemas de las reformulaciones conceptuales de la ciencia con propósitos pedagógicos, desaparece un componente que hace menos arbitrario el contenido conceptual de la ciencia, por lo que la historia de la ciencia permite usar la ciencia privada como materia prima sobre la cual trabajar para conseguir estructuras conceptuales de la ciencia escolar con más significado psicológico. (Castillo, Ramírez, González, Ferrer y Montiel, 2017, p. 82).

Relevancia del tema para la enseñanza en la formación de formadores

Según afirma McMurry (2008), de los 30 millones de sustancias conocidas en ese momento el 99 % eran orgánicas. Actualmente la cantidad de sustancias superó los 160 millones y se supone que la proporción se mantiene. Las sustancias orgánicas naturales y sintéticas están presentes permanentemente en la vida del ser humano, desde las biomoléculas que lo forman, pasando por la constitución de la gran mayoría de los materiales de uso cotidiano, incluyendo la comida y medicamentos, y también la composición de las sustancias que afectan el ambiente de forma negativa para la supervivencia de la mayoría de los seres vivos. El profesor de química, como formador de ciudadanía, no puede cumplir su labor

sin conocer este campo de la disciplina, entendiendo su complejidad. Comprender esa complejidad implica tener conciencia de todo lo que la química orgánica, como rama de la química, aporta para el mejoramiento de la calidad de vida y el aumento de expectativa de la misma, pero también reconocer las consecuencias negativas para el equilibrio ecológico que derivan de su accionar. La química verde, con su consigna de conseguir los mismos beneficios que se logran con la química tradicional, pero afectando lo menos posible el ambiente, aporta una visión que no sólo es relevante para el investigador químico, sino para la ciudadanía en general. Por eso, quien plantea la presente propuesta considera que la enseñanza de la química orgánica con una perspectiva desde la química verde es fundamental para la formación de un profesor de química.

Secuencia de contenidos y actividades

Los estudiantes de profesorado tienen una muy variada formación previa.

En esta propuesta se parte de un diagnóstico de situación y una introducción desde los conceptos más elementales. A continuación, se plantea una descripción muy general de los subtemas que se tratan y las actividades que se proponen.

Subtema 1: Evaluación diagnóstica

Esta se centra en la determinar la capacidad que tienen los estudiantes para diferenciar sustancias inorgánicas de orgánicas, detectar la existencia o no de concepciones alternativas sobre los conceptos de “orgánico”, “natural” y “artificial”. Además, se evalúa la existencia o no de los conocimientos previos requeridos.

Subtema 2: Introducción a la química orgánica

Se plantea el análisis de dos lecturas: una que incluye los orígenes del concepto de química orgánica, su evolución y su presencia en la vida cotidiana: “La fuerza vital: una larga discusión” (Alegría, Bosack, Dal, Franco, Jaul y Rosi, 2004, p. 259); y otra que evidencia la relatividad de la asimilación de lo natural con lo bueno y lo artificial con lo malo. (Yurkanis 2008, p. 3). Estas dos lecturas se acompañan del análisis crítico de ejemplos de publicidades, que muestran los conceptos de orgánico o natural como sinónimos de bueno o saludable.

Subtema 3: El carbono y la estructura de las moléculas orgánicas

A partir de diagramas de Lewis se explica la formación de enlaces entre los átomos de carbono entre sí y con el hidrógeno. Se evidencia la insuficiencia de este modelo para explicar la tetravalencia del carbono y la geometría molecular de los hidrocarburos más sencillos. Se plantea la teoría del enlace de valencia, incluyendo la hibridación de orbitales, para explicar la formación de enlaces simples, dobles y triples entre átomos de carbono. Esto se acompaña de una breve síntesis histórica de la constitución de la teoría estructural. Se sigue con la lectura grupal del artículo “¿Por qué carbono y no silicio?” (Yurkanis, 2008, p. 361). Los estudiantes, como tarea domiciliaria, leen distintos capítulos del libro “X representa lo desconocido”: “El hermano mayor”, “Pan y Piedra” y “Una diferencia de una E” (Asimov, 1983, pp. 45 a 72). Estas lecturas especulan con la posibilidad de existencia de vida en torno al silicio en lugar del carbono, terminando por explicar por qué esto no es posible. En clase, cada estudiante comparte un resumen del capítulo leído, y entre todos elaboran una síntesis.

Subtema 4: Revisión de nomenclatura de las sustancias orgánicas

Se plantean las distintas formas de representar las fórmulas de las sustancias orgánicas, el concepto de grupo funcional, y una síntesis de las reglas IUPAC de nomenclatura. Se introduce el concepto de isómero y los distintos tipos de isomería, sin profundizar aún en estereoisomería, tautomería, ni conformación. La práctica de nomenclatura se realiza en el sitio web Alonso Formula (Alonso, 2011), que tiene resumida de forma estricta las reglas de IUPAC, con ejemplos y ejercicios interactivos autoevaluables. Este sitio tiene la ventaja de tener licencia CC. De no estar disponible se utiliza el uso de otro recurso similar.

Para formulación de sustancias orgánicas se plantean actividades con software de edición molecular ChemSketch (ACD/Labs, 2008).

Subtema 5: El rol tecnológico, social y ambiental de la química orgánica y su relación con la química verde

A través de lecturas, videos, o audios de noticias actuales que hacen referencia algunas a aplicaciones de la química que benefician al ser humano, o a otros seres vivos, y otras que hacen referencia a problemas ambientales, se plantea el rol de

la química orgánica frente a estas situaciones, el enfoque de la química desde la química verde, (McMurry, 2008, pp. 395-396).

Se plantea el caso del uso de biocombustibles comparado con el de combustibles fósiles. Los estudiantes, organizados en equipos, discuten sobre las ventajas de una y otra fuente de energía. Cada equipo representa un grupo de interés diferente. Por ejemplo: delegados de países exportadores de petróleo, de países con déficit de alimentos, de países con grandes superficies de tierra sin aprovechar, u otros que surjan a propuesta del grupo.

Subtema 6: Esteoisómeros con software de modelado molecular y vinculación con química verde

Se analizan las distintas conformaciones de hidrocarburos lineales y cíclicos, analizando la estabilidad relativa de cada uno, utilizando modelos moleculares. Se explica el código de colores CPK.

Luego se plantean tareas en las que los estudiantes deban representar distintos conformeros utilizando el software Avogadro. (Hanwell, M. et al., 2012).

A continuación se trabaja isomería geométrica, introduciendo las reglas de Cahn, Ingold y Prelog para su nomenclatura.

Por último se trabaja la isomería óptica, incluyendo rotación de la luz polarizada, teoría de funcionamiento y uso del polarímetro, poder rotatorio específico, ecuación de Biot, centro quiral, enantiómeros, diasterómeros, forma meso y mezcla racémica. Se explicará configuración relativa y absoluta y el uso de R y S en la nomenclatura para indicar esta última. Se ejemplifica la importancia del tema con una lectura sobre la tragedia ocurrida con la talidomida (Yurkanis, 2008, p. 249). Se analizan otros medicamentos cuyas moléculas son ópticamente activas y sus enantiómero tienen distintas actividades fisiológicas. También se plantea las diferencias de olor de algunos aceites esenciales (Yurkanis, 2008, p. 249). A partir de la discusión de estos materiales se presentará la biocatálisis como una herramienta de la química verde que aprovecha la estereoespecificidad de las enzimas. Se visualiza el video “¿Qué es la Biocatálisis?” (González, Sáenz, Gamnara y Giacomini, 2010).

Se realizará una actividad experimental con polarímetro para comprobar el poder rotatorio de diferentes sustancias ópticamente activas.

Subtema 7: Polaridad de las moléculas y propiedades físicas de las sustancias orgánicas

Partiendo de una adaptación de una actividad experimental propuesta en una investigación realizada con docentes argentinos (Galagovsky, Di Giacocomo y Castelo, 2009), los estudiantes preparan tres sistemas: uno con agua y etanol, otro con agua y aceite de cocina y el tercero agregando sucesivamente, aceite de cocina, alcohol, y agua de manera que se formen tres capas. Luego deben agitar y observar los sistemas. Los estudiantes explican por escrito y con dibujos como imaginan los tres sistemas a nivel corpuscular. Luego se realiza una puesta en común en la que discuten las concepciones alternativas. A partir de esta experiencia, analizan las fuerzas intermoleculares y su dependencia del momento dipolar de las moléculas. Aquí se toman en cuenta los dos factores que determinan estas: la diferencia de electronegatividad y la geometría molecular. Con programas de visualización molecular, los estudiantes representan y observan los mapas de potencial electrostático de diferentes sustancias.

Esta es la fundamentación teórica para explicar las distintas propiedades físicas, comparando tablas temperaturas de fusión y ebullición, densidad y solubilidad en agua, de sustancias de una misma familia. Se hará lo mismo con compuestos que tengan la misma longitud de cadena, pero distintos grupos funcionales. Todo esto se trabajará contextualizado desde ejemplos vinculados con la vida cotidiana. Se ha observado en el aula, en que grupos de estudiantes de Química Orgánica II, de los que la mayoría, han aprobado Química Orgánica I, no pueden explicar por qué en condiciones normales el etanol se encuentra en estado líquido y el etano en estado gaseoso. Esto ocurre a pesar de que los estudiantes pueden diferenciar la distinta polaridad de las moléculas que forman cada una de las sustancias.

La conexión con Química Verde en este punto se plantea a partir del análisis del uso de disolventes no polares para las sustancias orgánicas, tanto en laboratorio como en productos comerciales. Se refieren, a partir de la investigación bibliográfica, los problemas ambientales y de salud que originan los compuestos orgánicos volátiles. Se plantean, como alternativa a estos, los que se proponen desde la química verde: el uso de disolventes en estado supercrítico, líquidos iónicos y disolventes eutécticos profundos (DES por su sigla en inglés) (Sánchez, 2019). En el caso de estos últimos se analizará la estructura de algunos para explicar sus propiedades. También se analiza la toxicidad que presentan, para de

esa manera considerar el cuidado que se debe tener al buscar soluciones de los problemas de contaminación, para no generar otros nuevos.

Subtema 8: Características generales de las reacciones orgánicas

Se destacan algunos aspectos generales que predominan en las reacciones orgánicas: el ser generalmente lentas; formarse variedad de productos en proporciones no determinadas a priori, dificultando esto su igualación; el ser muchas de ellas incompletas o reversibles.

Se plantea una clasificación de los tipos de reacciones orgánicas más importantes: isomerización o rearreglo, sustitución, eliminación, adición, oxidación – reducción y combustión. Se realiza una actividad de observación de la llama del mechero para diferenciar experimentalmente la combustión completa de la combustión incompleta.

Se incorpora el principio de economía atómica para explicar la conveniencia de preferir las reacciones de adición o isomerización por sobre las de sustitución para obtener un mismo producto. A partir de la lectura de un artículo de González y Valea (2009), se analiza la eficiencia atómica, comparando el tipo de reacciones por las que se producía el ibuprofeno en el antiguo proceso patentado por Boots Company of England y el proceso patentado por BHC Company.

Subtema 9: Mecanismos de reacción con animaciones virtuales

Como introducción al tema, y para evidenciar su importancia, se comienza con la lectura “¿De dónde provienen los fármacos?” (McMurry, 2008, pp. 164-165). Acompaña esta lectura una gráfica mostrando que la mayoría de los medicamentos son sustancias totalmente sintéticas, y que otros son resultado de la modificación de productos naturales. De aquí se deduce la importancia de conocer cómo se producen las reacciones químicas para diseñar procesos eficientes de obtención de dichos productos.

Se trabajan los principales mecanismos de las reacciones orgánicas, incluyendo en el momento que sea conveniente los conceptos pertinentes, a partir del análisis de ejemplos. Como las reacciones implican rompimiento y formación de enlaces, primero se aclara la diferencia entre las rupturas homolíticas y heterolíticas de enlace. Al tratar esta última se plantearán los conceptos de nucleófilo y electrófilo, y de bases y ácidos de Lewis.

Se seguirá con los ejemplos específicos para los distintos tipos de reacción. A partir de estos ejemplos se introducirán los conceptos de etapas de una reacción, de energía de activación, ΔG y ΔH de reacción, estado de transición e intermedio.

En todas las reacciones se trabajará con animaciones 3D interactivas que muestren el mecanismo de reacción. Se plantea como una herramienta de posible uso el sitio ChemTube3D - Organic Chemistry Animation de la Universidad de Liverpool, que es de licencia Creative Commons, y tiene aplicación para celular. (Greeves, 2018). Como actividad opcional, se propone que los estudiantes elaboren sus propias animaciones, utilizando programas de diseño representación molecular y Scratch (un software de programación orientado al aprendizaje, muy amigable pero muy eficiente).

El orden en que se presentan los mecanismos toma en cuenta las familias de compuestos, de la que cada uno de los mecanismos es característico. Primero la sustitución por radicales, en alcanos por parte de los halógenos. A continuación las reacciones de sustitución nucleofílica, características de los halogenuros de alquilo, productos de la anterior. En tercer lugar las reacciones de eliminación también característica de los compuestos anteriores. Aquí también se incluye la deshidratación de alcoholes. Después se plantea el mecanismo de adición electrofílica a los alquenos, producto de las anteriores reacciones. Por último, considerando el análisis especial que requiere el concepto de aromaticidad, se plantea la sustitución electrofílica aromática del benceno, para a partir de esta y por comparación con la reacción de adición de los alquenos, explicar la estabilidad especial del anillo aromático.

En todos los casos se comienza con la presentación de datos experimentales para, partir de estos, explicar el mecanismo, remarcando el carácter teórico de este, y la necesidad de ajustarse a los hechos empíricos.

Sustitución por radicales libres

Para la halogenación de alcanos, se plantean los datos experimentales que se conocen: necesidad de luz para la reacción y reacción en cadena. Se analiza el mecanismo y su diagrama energético, la etapa determinante de la rapidez de la reacción, la reactividad relativa de los halógenos y estabilidad relativa de los radicales alquilo, y su incidencia en la proporción en que se forman los isómeros monosustituídos.

Se plantea la fotólisis como una herramienta de la química verde para realizar reacciones, analizando sus ventajas y desventajas, así como las situaciones en que es conveniente su uso. Se propone como ejemplo la “síntesis industrial de ácidos alcanosulfónicos para su uso como tensoactivos”. (Mestres, 2011, p. 288).

Se evidencia la importancia de este mecanismo en la degradación del ozono por reacción con los clorofluorocarbonos. Se plantea como la sustitución de los propelentes de los aerosoles y los gases refrigerantes puede considerarse también un ejemplo de aplicación de la química verde.

Sustitución nucleofílica bimolecular (S_N2)

A partir del análisis de la ecuación de rapidez de esta reacción, se plantea y justifica el mecanismo.

Se justifica teóricamente la inversión estereoquímica del carbono utilizado la analogía de la inversión de un paraguas con el viento. (McMurry, 2008).

Se mostrarán evidencias de cómo afectan a esta reacción cada uno de los siguientes factores: impedimento estérico del halogenuro de alquilo, nucleofici- dad del grupo entrante, estabilidad del grupo saliente y efecto del disolvente. Para cada uno de ellos se mostrarán evidencias experimentales, como la rapidez de reacción relativa, y justificaciones teóricas.

Sustitución nucleofílica unimolecular (S_N1)

Se parte de la ecuación de rapidez igual que en el caso anterior. Se plantea la diferencia con la reacción anterior en cuanto a la no inversión total de la configuración en torno al átomo de carbono quiral. A partir de esto se propone el mecanismo de reacción, justificando el cumplimiento de los hechos experimentales antes referidos.

Se analizan los mismos factores que en el caso anterior. Respecto a la estructura del halogenuro de alquilo, se observa el orden de reactividad según la ubicación del halógeno (terciario > secundario > primario > metilo), así como la trasposición o reordenamiento que se da al formarse, en los casos que es posible, compuestos con una ubicación del sustituyente en un carbono diferente del que se encuentra el halógeno en el reactivo. A partir de esto se explica el orden de estabilidad de los carbocationes por hiperconjugación. En cuanto a la nucleofili- dad del nucleófilo, se observa que, a diferencia de lo que ocurre en la reacción S_N2 , la reactividad no depende de esta, ya que la etapa determinante de la rapi-

dez es la formación del carbocatión, y en esta no interviene el grupo entrante. Considerando el efecto del disolvente, se explica el postulado de Hammond, aplicado a este caso: “cualquier factor que estabiliza al carbocatión intermediario debe incrementar la rapidez de una reacción S_N1 ”. (McMurry, 2008, p. 379). Por lo tanto, aquellos disolventes, que como el agua, solvatan al carbocatión, favorecen la reactividad.

Eliminación bimolecular (E2) y Eliminación unimolecular (E1)

Se analizará la reacción de los halogenuros de alquilo en caliente con una base fuerte.

Primero se plantea la ecuación de la reacción y los datos experimentales que se conocen de la misma: ecuación de rapidez de segundo orden, no se producen transposiciones, por efecto isotópico de hidrógeno se detecta que la ruptura del enlace carbono hidrógeno está en la etapa determinante de la rapidez. Este mecanismo se utiliza para explicar los conceptos de regioselectividad y estereoselectividad, características de esta reacción, aplicando la regla de Zaitseff.

Paralelamente a cada uno de estos datos experimentales, se plantearán los aspectos del mecanismo que justifica cada uno. Se hará notar el paralelismo entre la reacción E2 y S_N2 .

Se realizará un tratamiento análogo para la reacción E1, comparando la etapa inicial de esta y su similitud con la etapa inicial de S_N1 .

Finalmente se plantea una comparación entre las cuatro reacciones, aclarando cuáles son los factores que favorecen a una u otra.

Adición electrofílica

Como ejemplo de esta reacción se trabaja la adición de halogenuros de hidrógeno a los alquenos, enfatizando la reactividad de los alquenos debido a la existencia del enlace pi. Aquí se retoma el orden de estabilidad de los carbocationes para fundamentar la regla de Markovnikov. (McMurry, 2008, p. 191). Dicha regla se utiliza como una justificación experimental del mecanismo.

Luego de esto, y como vinculación con química verde, se explica el principio de eficiencia atómica y se plantea la ecuación para su cálculo:

(Adaptado de Mestres, 2011, p. 369) donde M_p = masa molar producto que se desea obtener M_R = masas molares de los reactivos multiplicadas por coeficientes estequiométricos de la ecuación química.

Se propone la resolución de un problema contextualizado, en el que se tiene que obtener determinado halogenuro de alquilo. Se dan como alternativas la obtención por sustitución nucleofílica de un alcohol y la adición electrofílica a un alqueno. Los estudiantes deben decidir que alcohol y que alqueno sería conveniente utilizar, calcular la economía atómica para cada una de las reacciones y compararlas.

El benceno y la sustitución electrofílica aromática

Se plantea la fórmula global del benceno. Se propone una reflexión sobre las estructuras posibles con esa fórmula, discutiendo la cantidad de isómeros mono y disustituídos, que debería tener en cada caso, brindando posteriormente el dato de los que tiene realmente el benceno. Luego se entrega la lectura “Benceno, sueño y pensamiento creativo” (Carey, 2006, p. 437), donde aparecen citas de Kekulé con la anécdota sobre su sueño con la serpiente, que le inspiró para proponer la estructura de esa sustancia. En esta lectura aparece una reflexión abierta sobre el rol que juega la racionalidad y la inspiración en la generación del conocimiento científico.

Se compara el tipo de reacciones características del benceno y de los alquenos. Luego se trabaja el concepto de energía de resonancia a partir del análisis de los valores de energía de hidrogenación teórica y experimental del benceno, explicando la aromaticidad del benceno aplicando la teoría de los orbitales moleculares.

A partir de lo anterior se planteará el mecanismo general de la sustitución electrofílica aromática y algún ejemplo como la halogenación o nitración.

Actividad experimental de química verde como cierre del tema

Como ejemplo de otro tipo de reacción, en la que interviene un compuesto que tiene un anillo aromático, se realizará la síntesis de la aspirina por un procedimiento ambientalmente amigable, utilizando microondas. (Pereira, Piñero, Dias y Paixão, 2017). El uso de microondas es una técnica reconocida en el ámbito de la química verde. “Prácticamente todas las reacciones de química orgánica que requieren aporte de calor pueden realizarse con ventajas por medio de las microondas.” (Mestres, 2011, p. 245). En el trabajo reportado por Pereira, et al. (2017), esta experiencia fue realizada con estudiantes de educación media

de Portugal, siendo las ventajas que se detectaron, un menor gasto de energía, menor tiempo, mayor rendimiento de la reacción con la consecuente disminución de residuos.

Evaluación

La evaluación diagnóstica está planteada como primera actividad.

La evaluación formativa, en la que se pondrá especial énfasis, se realiza durante el desarrollo de todas las actividades, mediante la observación del desempeño de los estudiantes en el cumplimiento de cada una de las actividades propuestas y el análisis de los resultados obtenidos, seguido de la correspondiente retroalimentación.

Mientras los estudiantes están trabajando, se realizarán preguntas que los conduzcan a cuestionarse las soluciones intermedias de los problemas que vayan planteando, para favorecer la metacognición.

Paralelamente al desarrollo de cada uno de los temas, se plantean algunos problemas y ejercicios, sobre los mismos. Algunos para resolver en equipo, con apoyo del docente y otros para que cada estudiante resuelva de forma independiente. Unos estarán planteados para que sean resueltos en clase y otros como autoevaluación. En el caso de estos últimos se digitalizarán e incluirán en alguna herramienta que permita plantearlos como juego interactivo, de tal manera que favorezca la motivación. Por ejemplo en exeLearning (Equipo de desarrollo del software libre exeLearning, 2020).

En el caso de las lecturas propuestas, se acompañarán de cuestionarios, cuyas respuestas evidencien la comprensión de los conceptos involucrados, y la reflexión sobre las problemáticas planteadas, sus consecuencias ambientales, tecnológicas, sociales y de salud involucrada, su prevención y solución.

Para la evaluación del debate sobre biocombustibles del subtema 5, que implica un trabajo colaborativo dentro de cada equipo, se planteará la realización de dos rúbricas. Una de autoevaluación y otra de evaluación entre pares.

Las actividades que implican trabajo experimental requieren que los estudiantes, organizados en equipos de dos o tres integrantes, elaboren un informe trabajando en forma colaborativa, en Google Drive, u otra herramienta que permita evidenciar la participación individual de cada uno. Estos también se evaluarán mediante una rúbrica.

En la evaluación formativa se mantiene la coherencia con la modalidad de trabajo con la que se realizó la secuencia, considerando las restricciones que

impongan el plan educativo en el que se esté trabajando y el programa de la asignatura. Como parte de la evaluación sumativa, los estudiantes deben realizar un trabajo con formato de investigación experimental. Esta actividad puede ser, por ejemplo, la extracción de algún producto natural. En este trabajo deben evidenciar la aplicación de los principios de la química verde.

Referencias bibliográficas

- ACD/Labs (2008) *ACD/ ChemSketch Versión 8. Free*. Recuperado de <https://www.acd-labs.com/resources/freeware/chemsketch/index.php>
- Alegría, M., Bosack, A., Dal, A., Franco, R., Jaul, M. y Rosi, R. (2004) *Química I. Sistemas materiales. Estructura de la materia. Transformaciones químicas*. Buenos Aires: Santillana S. A.
- Alonso, C. (2011). Alonso Fórmula – Orgánica. <https://www.alonsoformula.com/organica/>
- Anastas, P. y W., J. (2000). *Green Chemistry: Theory and Practice* (Primer Edición). New York: Oxford University Press.
- Asimov, I. (1983). *X representa lo desconocido*. Barcelona: Plaza y Janés S.A.
- Hanwell, M., Curtis, D., Vandermeersch, T., Zurek, E. y Geoffrey R Hutchison, G. (2012). *Avogadro: un editor químico semántico avanzado, plataforma de visualización y análisis*. *Journal of Cheminformatics*. Recuperado de <http://avogadro.cc/>
- Cadamid, V. y Tamayo, O. (2013) Metacognición en la enseñanza y en el aprendizaje de conceptos de química orgánica. *Enseñanza de las ciencias. Número Extra IX Congreso Internacional sobre investigación en didáctica de las ciencias*. Recuperado de: <https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/306106/396011>
- Carey, F. (2006). *Química Orgánica – Sexta Edición*. México: McGraw Hill / Interamericana Editores. S.A.
- Castillo, A., Ramírez, M., González, M., Ferrer R. y Montiel, E. (10/2017) Enseñanza de los contenidos de química orgánica. Una mirada a la epistemología de la disciplina. En Z. Corredor. (Coordinadora). *II Jornadas de Investigación e Innovación Educativa. I Internacionales*. Ponencia presentada en Universidad Nacional Abierta: Maracaibo, pp. 77-99. Recuperado de: [www.codajic.org/sites/www.codajic.org/files/Memorias II Jornadas de Investigación e Innovación Educativa. I Internacionales.pdf](http://www.codajic.org/sites/www.codajic.org/files/Memorias%20II%20Jornadas%20de%20Investigaci3n%20e%20Innovaci3n%20Educativa.%20I%20Internacionales.pdf)
- Chamizo, J. (2011) La imagen pública de la química. *Educación química*. 22(4), 320-331. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30152-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30152-6)
- Equipo de desarrollo del software libre exeLearning (2020). exeLearning 2.5. Recuperado de: <https://exelearning.net/>

- Galagovsky, L, Di Giacomo, M., y Castelo, V. (2009). Modelos vs. dibujos: el caso de la enseñanza de las fuerzas intermoleculares. *REEC: Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*, 8(1), pp. 1-22. Recuperado de http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen8/ART1_Vol8_N1.pdf
- González, D., Saénz, P., Gaménara, D. y Giacomini, C. (PEDECIBA25). (2010). ¿Qué es la biocatálisis? Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=VgqJ88vBc2E>
- González, M. y Valea, A. (2009). El compromiso de enseñar química con criterios de sostenibilidad: la química verde. *Educació Química*. 2. Recuperado de <https://www.raco.cat/index.php/EduQ/article/download/199220/266484>
- Greeves, N. (2018). ChemTube3D - Organic Chemistry. Recuperado de <http://www.chemtube3d.com/Main%20Page.html>
- Mascarell, L y Vilches, A. (2016). Química Verde y Sostenibilidad en la educación en ciencias en secundaria. *Enseñanza de las ciencias*. 34(2), pp. 25-42. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.1688>
- Marcelo, C. (2010). La identidad docente: constantes y desafíos. *Investigación Educación y Pedagogía*, 3(1). DOI: <https://doi.org/10.15332/25005421>
- Mestres, R. (2011). *Química Sostenible*. Madrid: Editorial Síntesis S.A.
- McMurry, J. (2008). *Química Orgánica. Séptima Edición*. México. Cengage Learning Editores. S.A.
- Morrison, R. y Boyd, R. (1998). *Química Orgánica. Quinta Edición*. México: Adison Wesley Logman. S.A.
- Sánchez, J. (2019) *Formación y caracterización de disolventes eutécticos profundos: aplicación a la extracción de moléculas de interés*. (Trabajo de fin de grado). Universidad Politécnica, Madrid, España.
- Yurkanis, P. (2008). *Química Orgánica. Quinta Edición*. México: Pearson Educación.