

Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno

www.revistaestudiosieeg.com

04

JUL-DIC 2025

ISSN: EN TRÁMITE



Ilustración generada con inteligencia artificial, por Fidel Romero



UNIVERSIDAD DE
GUADALAJARA
Red Universitaria de Jalisco



Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno

Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno Año 2, No. 4, Julio-Diciembre 2025, es una publicación semestral, editada por la Universidad de Guadalajara, a través del Departamento de Economía y Ciencias Políticas y por la División de Ciencias Económicas, Empresa y Gobierno del Centro Universitario de Tonalá. Domicilio Av. Nuevo Periférico No. 555, Ejido San José Tateposco, C.P. 45425, Tonalá, Jalisco, México; Tel. 3320002300; página web <https://revistaestudiosieeg.com/index.php/eieeg>, correo electrónico reieeg@cutonalaj.udg.mx, Editor responsable: Dr. Julio Santiago Hernández. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2024-062016595700-102, ISSN: en trámite, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de éste número: Departamento de economía y ciencias políticas, con domicilio en Av. Nuevo Periférico No. 555, Ejido San José Tateposco C.P. 45425, Tonalá, Jalisco, México, Dr. Julio Santiago Hernández. Fecha de la última modificación 14 de julio de 2025. Tamaño del archivo 1.1 MB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad de Guadalajara.

Sobre la revista

1. Objetivos

Objetivo general

La revista será un órgano de difusión cuyo eje articulador trate temas que afecten los núcleos temáticos de mayor relevancia en la agenda pública alrededor de temas contemporáneos en economía, empresa y gobierno que puedan ser abordados desde distintos ámbitos de las ciencias, siendo sociales, naturales o exactas y de interés para la comunidad académica y del público en general.

Objetivos Específicos.

1. Desarrollar una herramienta de difusión y divulgación de investigación de carácter interdisciplinario para el Centro Universitario a través de la División de Ciencias Económicas, Empresa y Gobierno.
2. Generar identidad y cultura institucional.
3. Generar un espacio para dar a conocer investigaciones e información de carácter académico.
4. Constituir un ámbito de debate técnico, académico y científico alrededor de temas contemporáneos en economía, empresa y gobierno.
5. Informar y actualizar sobre los temas que se llevan a cabo en el Centro Universitario y particularmente los correspondientes a la División y sus investigaciones, donde al mismo tiempo puedan interactuar docentes-estudiantes y realizar búsquedas avanzadas de temas relacionados al medio

2. Enfoque

La revista se orientará en los temas inherentes a economía, empresa, gobierno y disciplinas afines.

3. Alcance

La revista está dirigida a la comunidad académica primordialmente del Centro Universitario de Tonalá y del público en general.

4. Secciones de la revista

- Introducción o editorial
- Ensayo
- Artículo de investigación
- Reseñas

Equipo editorial

Director:

- Dr. Julio Santiago Hernández

Consejo Editorial:

- Mtra. María Felicitas Parga Jiménez
- Mtra. Anisse Jacinta Musalem Enríquez
- Dra. Aimée Pérez Esparza
- Dr. Luis Téllez Arana
- Dr. Edgar Ricardo Rodríguez Hernández
- Dra. María Fernanda Isadora Corona Meraz
- Mtro. Carlos Macías Hernández
- Dr. Arturo Estrada Vargas

Contenido



06 Introducción

Consejo Editorial

11 La Química Click: Un nuevo aliado educativo

Hugo Enrique Ceja Pelayo, Diego Antonio Nava Vélez y Héli Herrera López

17 La química click: hacia una agroquímica más sostenible en México

Jonathan Mendoza Guzman, Morelia Eunice López Reyes

23 El papel de la innovadora química click y bioortogonal en el desarrollo de tratamientos sostenibles contra el cáncer en México

Francisco Javier Moreno Mora, Noé Isaías Gómez Arámbula, Elena Sarahí Chávez Hernández, Jorge Sánchez Camarena

31 Quimioremediación de metales pesados en agua mediante síntesis de polímeros basados en química click

Nelly Berenice Delgado Angeles, Felipe de Jesús Orozco Luna, Raúl Cuauhtémoc Baptista Rosas

40 Sistemas Simbióticos de Xenobots para la Degradoación de Plásticos

Omar Cano-García, Iveth Gómez-Morales, Yajaira Zepeda-García, Omar Paredes

47 La química click como potencial herramienta para remediar la contaminación en el lago de Chapala

Edwin Bladimir Bonilla Ascencio, Víctor Daniel Carrera Rentería, Osiris Farias Elvira, Maite Rentería Urquiza

Introducción

La continuación de un proyecto académico resulta, por decir lo menos, retador. En ese sentido, hoy más que nunca resulta crucial mantenerse vigente sin perder la continuidad. En ese sentido, la entrega de este cuarto número de la revista de Estudios Interdisciplinarios en Economía, Empresa y Gobierno es un claro ejemplo de que estos desafíos pueden superarse. Nos llena de satisfacción haber dado voz a más colegas que han explorado diversos horizontes intelectuales. La creación de este espacio de diálogo se presenta como una necesidad imperiosa para la comunidad del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Entre las funciones sustantivas de la institución se encuentran la difusión del conocimiento, la divulgación de los avances en investigación y el fomento de nuevas perspectivas para comprender la realidad en la que vivimos. Destacamos con entusiasmo la visión renovadora de la actual Directora de la División de Ciencias Económicas, Empresa y Gobierno, la Dra. Karla Alejandra Contreras Tinoco, quien -en colaboración con el Jefe de Departamento de Economía y Ciencias Políticas, el Mtro. Reginaldo González Téllez- han dado continuidad y solidez a este valioso proyecto editorial.

La revista de Estudios Interdisciplinarios en Economía, Empresa y Gobierno busca impulsar la transformación de la propia comunidad universitaria, fomentando la reflexión crítica sobre el cambio en el contexto de la comunidad. Su objetivo es consolidarse como un órgano de difusión académica cuyo eje articulador trate temas que afecten los núcleos temáticos de mayor relevancia en la agenda pública alrededor de temas contemporáneos en economía, empresa y gobierno que puedan ser abordados desde distintos ámbitos de las ciencias, siendo sociales, naturales o exactas y de interés para la comunidad académica y del público en general. Es decir, la revista como declaración de principios, busca constituir un espacio de debate técnico, académico y científico de temáticas que atañen a nuestras comunidades desde una perspectiva interdisciplinar.

Uno de los propósitos más ambiciosos desde el inicio es que los manuscritos publicados en la revista reflejen un enfoque interdisciplinario en toda su extensión. Por tanto, la

interdisciplina no es un punto de partida, sino una meta a la que aspiramos llegar por medio de la colaboración en diversos ámbitos de estudio.

Con este desafío en mente, presentamos el cuarto número de la revista, continuación del dossier especial iniciado en la edición anterior, bajo el título “Hacia una economía verde y sostenible para el Siglo XXI: La contribución de Morten Peter Meldal”. En el número pasado nos dimos a la tarea de publicar, cómo se ha hecho desde el primer número, el trabajo de académicas, académicos y estudiantes interesadas e interesados en divulgar y compartir sus conocimientos. Por lo que es necesario agradecer a las personas que han confiado en nuestro espacio editorial para publicar el resultado de su trabajo. En nuestro equipo consideramos que la decisión de compartir los conocimientos adquiridos a través de una publicación física o digital como ésta, surge de un deseo generoso y desinteresado por democratizar lo aprendido. Y de esta manera, hacer llegar a otros el resultado de procesos educativos y de investigación que no siempre son accesibles para todos. Lo anterior, se suma a la simplificación del proceso de aprendizaje para las personas que pertenecen a otras disciplinas.

Es por ello que la revista de Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno es una oportunidad para que académicos, estudiantes y personas del área de Economía y Ciencias Políticas o de cualquier otra área se sensibilicen y aprendan sobre temas que nos afectan a todos como sociedad. El resultado de los esfuerzos del número anterior de la revista fue la publicación de 6 trabajos que en su conjunto le permiten al lector adentrarse en temas que evidencian el potencial transformador de la química click en diversas áreas estratégicas como la purificación del agua y la producción de biocombustibles mediante materiales adsorbentes funcionalizados; así como de la transición energética de México con soluciones sostenibles; y en los procesos de monitoreo y remediación ambiental. De igual forma, se exploran sus beneficios en ámbitos como la salud pública por medio de tecnologías para la detección de glucosa, su papel en la innovación educativa mediante el uso de disolventes verdes en la enseñanza superior, y su contribución al desarrollo de nuevas herramientas terapéuticas.

En este cuarto esfuerzo, de julio-diciembre del 2025, nos emociona ampliar la reflexión en torno al papel de la química contemporánea –y en particular de la química click-

en la construcción de un futuro más sostenible. Entre los propósitos sustantivos de la Universidad de Guadalajara se busca la formación integral de los estudiantes asegurando el desarrollo de habilidades y competencias para la vida profesional y la construcción de una ciudadanía ética y con perspectiva global.

Los trabajos presentados en esta segunda parte del número especial, continúan siendo resultados de la convocatoria organizada por la Coordinación General de Investigación Posgrado y Vinculación de la Universidad de Guadalajara, en la que se convocó a todas y todos los estudiantes de la Red de la Universidad de Guadalajara a participar en el concurso: “Aplicaciones de la química click para resolver problemas en México”.

Se invitó a los estudiantes a responder por medio de un ensayo la siguiente pregunta: ¿Cómo se puede utilizar la química click para resolver un problema en México?

En el año 2000, el químico estadounidense Barry Sharpless publicó un manifiesto científico que invitaba a buscar una nueva química sencilla y barata; que usase el agua como base y que funcionase a temperatura de ambiente. Lo llamó química click, porque se trataba de unir dos moléculas como quien abrocha los dos extremos del cinturón del coche. Un año después, Morten Peter Meldal y Barry Sharpless descubrieron de forma independiente y casi simultánea la cicloadición de azidas-alquino catalizada por cobre; un enrevesado nombre para una reacción sencillísima que une dos moléculas para crear una tercera con propiedades nuevas. El proceso suponía un salto gigante respecto a la química del momento, porque funcionaba casi el 100% de las veces y no dejaba residuos (Domínguez, 2023).

En este contexto y aprovechando la visita del Dr. Morten Peter Meldal, Premio Nobel de Química 2022, en el marco del Foro Ciencia UDG, durante las actividades de la Feria Internacional del Libro 2024. Se propuso un ejercicio, en el que se invitó a estudiantes a realizar un ensayo que presentará una propuesta utilizando la química click para abordar y solucionar un problema social, ambiental o económico.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de esta segunda parte de este número. En particular al Dr. Arturo Estrada Vargas (UdeG-CUTONALA) coordinador de este cuarto número especial, su apoyo

ha sido fundamental para su éxito. A los revisores anónimos les expresamos nuestra profunda gratitud por su valiosa lectura y sus comentarios constructivos, los cuales sin duda han permitido mejorar la calidad de los trabajos presentados.

Consejo Editorial

BIBLIOGRAFÍA

Domínguez Nuño (2023). Morten Meldal, premio Nobel: “La química clic nos ayudará a vencer al cáncer y al alzhéimer”. El país. <https://elpais.com/ciencia/2023-06-16/morten-meldal-premio-nobel-la-quimica-clic-nos-ayudara-a-vencer-al-cancer-y-al-alzheimer.html>

La Química Click: Un nuevo aliado educativo

*Click Chemistry:
A new educational ally*

Hugo Enrique Ceja Pelayo^a, Diego Antonio Nava Vélez^b y
Helí Herrera López^c

RESUMEN

Hablar del término Química Click es incluir términos como innovación, revolución y tecnología, conceptos que sin duda forman parte de los alcances que ha tenido la teoría de Meldal, así como el impacto que ha desarrollado en campos como la industria, biotecnología, medicina personalizada, por mencionar algunos. Los límites de la química click han llegado incluso hasta el campo formativo donde a través de una inclusión de sus principales preceptos se ha promovido habilidades críticas y analíticas las cuales son necesarias para enfrentar los desafíos globales del siglo XXI. Esta teoría ha demostrado ser eficiente, selectiva y bastante fácil de asimilar lo cual ha permitido que los estudiantes visualicen conceptos abstractos y complejos de forma más sencilla, de esta forma se permite construir un aprendizaje interdisciplinario, con una visión más global y actual.

^a Estudiante de La Maestría en Docencia para la Educación Media Superior (MDEMS) CUGDL. e-mail: hugo.ceja23b@udgvirtual.udg.mx

^b Estudiante de La Maestría en Docencia para la Educación Media Superior (MDEMS) CUGDL. e-mail: diego.nava5448@academicos.udg.mx

^c Profesor investigador de la Universidad de Guadalajara. Maestría en Docencia para la Educación Media Superior (MDEMS) CUGDL. e-mail: heherrera@msev.gob.mx

La química click se convierte entonces en un poderoso aliado, el cual promoverá en el estudiantado las habilidades necesarias para formar el profesionalista del siglo XXI.

Palabras clave: Química Click, Educación, Innovación, Tecnología

ABSTRACT

To speak of the term Click Chemistry is to include terms such as innovation, revolution and technology, concepts that are undoubtedly part of the scope that Meldal's theory has had, as well as the impact it has developed in fields such as industry, biotechnology, personalized medicine, to mention a few. The limits of click chemistry have even reached the educational field where, through the inclusion of its main precepts, critical and analytical skills have been promoted, which are necessary to face the global challenges of the 21st century. This theory has proven to be efficient, selective and quite easy to assimilate, which has allowed students to visualize abstract and complex concepts in a simpler way, thus allowing the construction of an interdisciplinary learning, with a more global and current vision. Click chemistry then becomes a powerful ally, which will promote in the students the necessary skills to form the professional of the XXI century.

Keywords: Click Chemistry, Education, Innovation, Technology

INTRODUCCIÓN

La educación y formación de capital humano en química avanzada representa uno de los pilares fundamentales para el progreso científico y tecnológico en las sociedades contemporáneas. En un mundo cada vez más globalizado y dependiente de la innovación científica, el desarrollo de tecnologías emergentes como la Química Click, propuesta por Morten Meldal y sus colaboradores, abre nuevas oportunidades para la mejora de diversos sectores industriales. Desde la creación de nuevos materiales hasta el desarrollo

de medicamentos altamente específicos, la Química Click ha revolucionado la forma en que los científicos abordan la síntesis de moléculas complejas, lo cual es esencial para campos como la biotecnología, la medicina personalizada y la sostenibilidad (Melda & Tornoe, 2008). En este sentido, la incorporación de la Química Click en los programas académicos no solo capacita a los futuros profesionales en una tecnología de vanguardia, sino que también fomenta el desarrollo de habilidades críticas como el pensamiento analítico y la resolución de problemas, esenciales para enfrentar los desafíos científicos y tecnológicos del siglo XXI.

A pesar de los avances que la Química Click ha introducido en la química moderna, la enseñanza de conceptos tan avanzados plantea retos significativos en el aula. La complejidad inherente a esta tecnología requiere la implementación de estrategias educativas que permitan una comprensión profunda y su aplicación práctica en situaciones reales. Esto implica reestructurar la forma en que se enseña la química avanzada a nivel universitario, promoviendo no solo la adquisición de conocimientos teóricos, sino también el desarrollo de competencias técnicas que permitan a los estudiantes generar nuevas aplicaciones basadas en esta tecnología (Sharpless & Kolb, 2001).

DESARROLLO

La Química Click, más que una herramienta técnica, representa un nuevo paradigma en la ciencia química, caracterizado por la eficiencia, la especificidad y la simplicidad en la construcción de moléculas complejas. Este enfoque no solo permite a los estudiantes visualizar conceptos abstractos como la catálisis y la selectividad, sino que también les brinda la oportunidad de aplicar estos principios en la resolución de problemas globales. Por ello, la enseñanza de esta tecnología debe enfocarse en la vinculación de estos conceptos con aplicaciones prácticas, de esta forma se permite realizar una transición al entorno educativo a través de un aprendizaje significativo que trascienda las aulas y prepare a los estudiantes para innovar en sus respectivas áreas profesionales.

Considerando que la implementación exitosa de la Química Click en la educación superior debe contemplar la creciente tendencia hacia la sostenibilidad y la “química

verde". Al integrar esta tecnología en el ámbito académico, no solo se fomenta el desarrollo de conocimientos científicos avanzados, sino que también se forma a una nueva generación de profesionales comprometidos con el uso eficiente de los recursos y la reducción del impacto ambiental de los procesos químicos (Premio Nobel, 2022).

Por su parte, la denominada Química Click ha permitido simplificar la síntesis de compuestos, lo que acelera significativamente los procesos de descubrimiento de nuevos fármacos(Díaz et al., 2022). Considerando que la química, con su enfoque experimental, se oriental estudio de las transformaciones de la materia ha pasado de mezclar sustancias en soluciones simples a apoyarse en tecnologías avanzadas para determinar estructuras, propiedades y transformaciones de gran complejidad. En ese contexto, los ganadores del premio nobel 2022, Carolyn R. Bertozzi, P. Meldal y K. Barry Sharpless, propusieron una nueva filosofía de trabajo, orientada a simplificar lo complejo mediante una forma innovadora de organizar y construir compuestos a partir de la singularidad de cada molécula.

Como una analogía a los bloques de construcción de LEGO la química otorga la posibilidad de realizar la unión de moléculas de forma rápida, sencilla y eficiente. La ciencia química intrínsecamente tiene la capacidad de organizar y clasificar los elementos, esta propiedad es utilizada para la generación de dichas uniones y seleccionar los que cuenten con las siete características: facilidad experimental, compatible con gran variedad de grupos funcionales y condiciones de reacción, altamente selectiva y regio selectiva, aislamiento y purificación del producto final sencilla, alta economía atómica, rendimientos elevados. Dando como resultado la simplificación en la síntesis de compuestos permitiendo acelerar los procesos y reducir los costos y tiempos (Hidalgo Misas, 2016)

Destacando la simplicidad de la conexión entre molécula, y no así, lo complejo que hay detrás de estos elementos. La formación de profesionistas deberá de ponerse al corriente y estar en sintonía con estos avances científicos, por lo tanto, la estructura de la Química Click deberá permear en el ámbito educativos y ser implementada en la formación de profesionistas independientemente de su disciplina. En el ámbito educativo se deberán establecer ese mismo tipo de conexiones, conexiones que sean lo más simples pero significativas, haciendo uso de teorías constructivistas como la evolutiva de Piaget, el aprendizaje significativo de Ausubel, La interacción del individuo con el medio de Vygotsky ayudando a que los estudiantes construyan un conocimiento significativo. (Ortiz Granja, 2015)

A diferencia de los bloques de construcción de LEGO definida en la analogía de la Química Click, la formación de profesionistas deberá contar con conexiones articuladas, conexiones que permitan un movimiento relativo entre estas, la implementación de pedagogías activas como el aprendizaje basado en problemas. Les da la posibilidad de construir activamente su aprendizaje creando estructuras funcionales y aplicables desde los espacios académicos, lleva a los estudiantes a observar su realidad y proponer alternativas de mejora en torno a lo observado. (Cardona y Barrios, 2017)

CONCLUSIÓN

Muchos podrán considerar que el impacto de los aportes de Meldal se deben restringir exclusivamente al mundo de la química. La síntesis de compuestos químicos sin duda ha transformado varios campos y áreas de la Química. Sin embargo, limitar un aporte tan valioso y con tanta visión sería imprudente y quitaría valor al verdadero aporte generado por Meldal. Por ello, el analizar y reflexionar sobre su impacto en el campo educativo se considera como un punto obligado dada la gran importancia que tienen en las aulas los profesores al ser ellos quien forjarán y promoverán el desarrollo de futuros científicos.

La incorporación de las ideas y estructura de la Química Click en el proceso formativo será una herramienta poderosa para conformar una nueva generación de profesionistas, altamente preparados y con una visión más aplicada, a través de un adecuado desarrollo de habilidades críticas y analíticas necesarias para enfrentar los desafíos globales. De esta forma podrán abordar problemas del mundo actual para proponer soluciones a las situaciones que actualmente nuestra sociedad desarrolla.

REFERENCIAS

- Cardona, S., & Barrios, J. (2017). Aprendizaje basado en problemas (ABP): el “problema” como parte de la solución. *REVISTA ADELANTE-AHEAD*, 6(3). <https://ojs.unicolombo.edu.co/index.php/adelante-ahead/article/view/92>

- Díaz, L., Martínez, I., & Bernal, M. (2022). *Una nueva forma de hacer Click: Premio Nobel de Química 2022*. Academia de Ciencias de Morelos, A.C. <https://acmor.org/publicaciones/una-nueva-forma-de-hacer-Click-premio-nobel-de-qu-mica-2022>
- Hidalgo Misas, A. (2016). *Obtención de hidrogeles químicos mediante metodología “Click” a partir de polímeros tipo elastina para el tratamiento del glaucoma*. [Tesis de Grado, Universidad de Valladolid] <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/23027>
- Ortiz-Granja, D. (2015). El constructivismo como teoría y método de enseñanza. *Sophia*, 19(2), pp. 93-110. <https://doi.org/10.17163/soph.n19.2015.04>
- Meldal, M., & Tornøe, C. W. (2008). Cu-Catalyzed Azide–Alkyne Cycloaddition. *Chemical Reviews*, 108(8), 2952-3015. <https://doi.org/10.1021/cr0783479>
- Sharpless, K. B., & Kolb, H. C. (2001). Click chemistry: Diverse chemical function from a few good reactions. *Angewandte Chemie International Edition*, 40(11), 2004-2021. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010601\)40:11<2004::AID-ANIE2004>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010601)40:11<2004::AID-ANIE2004>3.0.CO;2-5)
- Premio Nóbel. (2022). *Premio Nobel de Química 2022: Morten Meldal, Carolyn Bertozzi y K. Barry Sharpless*. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2022/summary/>

La química click: hacia una agroquímica más sostenible en México

Click chemistry: towards a more sustainable agrochemistry in Mexico

Jonathan Mendoza Guzman^a y Morelia Eunice López Reyes^b

RESUMEN

La agricultura mexicana es vital para la economía, pero enfrenta grandes desafíos ambientales. La química click ofrece una alternativa para desarrollar agroquímicos más sostenibles, como triazoles y/o otros derivados, simplificando su síntesis y reduciendo la generación de residuos. No obstante, su implementación enfrenta obstáculos como falta de infraestructura y capacitación. Promover la colaboración entre universidades e industrias, junto con un marco político favorable, puede transformar la agroquímica en México, beneficiando a los agricultores y al medio ambiente.

Palabras clave: Química click, Agroquímicos, sostenible, Colaboración, Desarrollo agrícola

ABSTRACT

Mexican agriculture is vital to the economy, but faces major environmental challenges. Click chemistry offers an alternative to develop more sustainable agrochemicals, such as triazoles

^a Alumno del Centro Universitario de Ciencias Exactas en Ingenierías (CUCEI). e-mail: jonathan.mguzman@alumnos.udg.mx

^b Profesora Investigadora, Departamento de Química, CUCEI - Universidad de Guadalajara e-mail: morelia.lopez@academicos.udg.mx

and/or other derivatives, simplifying their synthesis and reducing waste generation. However, its implementation faces obstacles such as lack of infrastructure and training. Promoting collaboration between universities and industry, together with a favorable policy framework, can transform agrochemicals in Mexico, benefiting farmers and the environment.

Keywords: Click chemistry, Agrochemicals, sustainable, Collaboration, Agricultural development.

INTRODUCCIÓN

La agricultura es un sector esencial para la economía mexicana, generando empleo y alimento para millones de personas (Monterroso, et al., 2012; Romero, 2002). Sin embargo, enfrenta desafíos significativos, como la necesidad de mantener un aumento de la producción y la protección el medio ambiente. En este contexto, la química click se presenta como una herramienta innovadora que puede ayudar en el desarrollo de nuevos agroquímicos, ofreciendo soluciones más sostenibles que minimicen el impacto ambiental y maximicen la productividad.

México es un país que ha experimentado un uso intensivo de agroquímicos, que han conducido a problemas graves, como la degradación del suelo, la contaminación del agua y la resistencia de plaga (Aguilar & Pérez, 2008; Alvarado & Romero, 2024; Espinosa-Calderón, 2024; Genevieve et al., 2020; Monterroso et al., 2012). Por ejemplo, pesticidas como el glifosato son efectivos, pero sus efectos nocivos en la salud humana y el medio ambiente han sido ampliamente cuestionados (Sánchez et al., 2024). Del mismo modo, el uso de fungicidas y fertilizantes nitrogenados convencionales puede provocar problemas de contaminación. Esto resalta la necesidad urgente de desarrollar agroquímicos que sean tanto efectivos como sostenibles. Por lo cual, la colaboración entre universidades y empresas es esencial para impulsar la innovación de la agroquímica mexicana. La transferencia de tecnología, como lo destacan las aportaciones de K. Barry Sharpless y Morten Meldal en el desarrollo de la

química click, permitirán que la investigación científica se traduzca en aplicaciones prácticas para la obtención de agroquímicos que impacten positivamente en el medio ambiente.

QUÍMICA CLICK: UNA ALTERNATIVA SOSTENIBLE

La química click se basa en reacciones rápidas y altamente selectivas que permiten la formación de enlaces de manera eficiente, manteniendo una economía atómica (Düzleyen et al., 2024). Este enfoque reduce el número de pasos en la síntesis de compuestos y minimiza la producción de residuos, haciéndolo ideal para el desarrollo de nuevos agroquímicos. La química click facilita la creación de productos específicos que pueden abordar las necesidades particulares de los cultivos mexicanos donde por ejemplo podrían utilizarse los grupos azida, para desarrollar métodos más sencillos y menos contaminantes para la obtención de fungicidas funcionalizados como los triazoles.

IMPORTANCIA DE LOS TRIAZOLES

Los triazoles (Figura 1), son un grupo de compuestos nitrogenados que se utilizan ampliamente como fungicidas en la agricultura. Su eficacia en el control de enfermedades fúngicas los convierte en herramientas valiosas para aumentar la productividad de los cultivos (Rani et al., 2024; Song et al., 2024; Vaishnani et al., 2024).

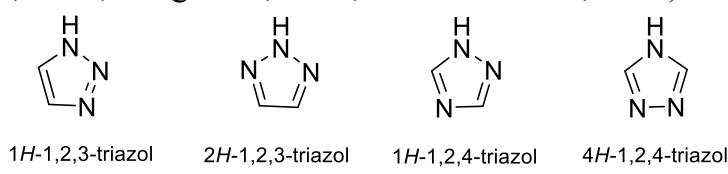


Figura 1. Triazoles.

Sin embargo, la síntesis de triazoles convencionales, como el tebuconazol (Figura 2), a menudo implica procesos complejos y costosos. Por ejemplo, existen diferentes síntesis convencionales para la obtención del tebuconazol, pero en general todas y cada una de ellas requiere un proceso de varios pasos y con condiciones severas, lo que puede generar una cantidad significativa de residuos (Díaz t al., 2016).

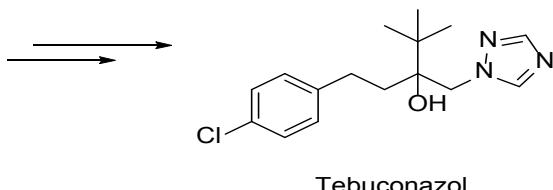


Figura 2. Tebuconazol.

Por ello una estrategia basada en química click podría involucrar la reacción de un compuesto que contenga un grupo azida, el cual se hace reaccionar con un alquino en presencia de un catalizador adecuado. Este enfoque simplificaría la síntesis de triazoles, permitiendo la formación de enlaces carbono-nitrógeno de manera eficiente y en un solo paso. De esta forma podrían obtenerse una gran cantidad de derivados de triazoles funcionalizados para una síntesis convergente destinada a la obtención de agroquímicos.

DESARROLLO DE FERTILIZANTES Y PESTICIDAS

Además de la síntesis de triazoles, la química click también puede ser aplicada en el desarrollo de fertilizantes nitrogenados. Alternativos a la urea la cual se disuelven rápidamente en el suelo, lo que puede llevar a la pérdida de nutrientes a través de la escorrentía. Por otra parte, a partir de los grupos azidas, se pueden diseñar fertilizantes que liberación controlada de nitrógeno. A través de la selección de materias primas adecuadas y de fácil acceso. Este es un punto importante para considerar, ya que al comparar las condiciones de reacción relativamente simples de la reacción de Sharpless (Lastres, 2022; Wasserman, 2022), en contraste a al gasto enorme de energía del proceso industrial para la obtención de la urea (Robles, 2015; Silva & Quesada, 2015). Proceso que implica la ruptura de un enlace triple nitrógeno-nitrógeno con un alto costo energético a pesar de ser una reacción catalizada para obtener la fuente de nitrógeno.

RETOS EN LA IMPLEMENTACIÓN

A pesar de las ventajas que ofrece la química click, su adopción en la agroquímica mexicana enfrenta desafíos. La falta de infraestructura para la investigación y el desarrollo,

así como la escasez de capacitación para los agricultores en el uso de nuevos productos, son obstáculos importantes. Además, es fundamental que los nuevos agroquímicos sean accesibles y asequibles, especialmente para los pequeños productores que representan una gran parte del sector agrícola. Conjuntamente para que la química click tenga un impacto significativo en la agroquímica de México, es necesario contar con un marco político que promueva la investigación, la educación y la transferencia de tecnología. Fomentar la colaboración entre universidades, centros de investigación y la industria puede acelerar el desarrollo de soluciones innovadoras. Asimismo, es esencial incluir a los agricultores en el proceso de desarrollo para garantizar que las soluciones respondan a sus necesidades.

CONCLUSIÓN

La química click ofrece una oportunidad única para transformar la agroquímica en México, permitiendo el desarrollo de productos más sostenibles y efectivos. Al abordar los desafíos actuales de la agricultura, esta metodología puede contribuir a una producción más responsable que beneficie tanto a los agricultores mexicanos como al ecosistema por medio de la reducción de contaminantes. Sin embargo, su éxito dependerá de un enfoque colaborativo que incluya a todos los actores del sector agrícola y de políticas que promuevan la innovación y la sostenibilidad. De esta forma la agroquímica podrá contribuir en la construcción un futuro agrícola próspero y sostenible para México.

REFERENCIAS

- Aguilar, A. & Pérez, R. H. (2008). La contaminación agrícola del agua en México: retos y perspectivas. *Problemas del desarrollo*, 39(153), 205–215.
- Alvarado, R. A. R. & Romero, M. Á. M. (2024). Perfil actual del consumidor agroecológico de Colima, México. *Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica*, 4(1), 74–97.
- Díaz B., V., Medina, D. I., Padilla, E., Bortolini, R., Olvera, M. & Luna, G. (2016). Nanoemulsion formulations of fungicide tebuconazole for agricultural applications. *Molecules*, 21(10), 1271.
- Düzleyen, B., Karakaya, G. & Aytemir, M. (2024). The Use of Click Chemistry in Drug

- Development Applications. *Hacettepe University Journal of the Faculty of Pharmacy, Special Issue/International Multidisciplinary Symposium on Drug Research and Development, DRD-2023*, 54–63.
- Espinosa, A. (2024). Sustitución de agroquímicos para promover la sostenibilidad de los recursos agua, suelo, biota. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 42.
- Genevieve, A., Pasquier M., & Bertran M., (2020). La agricultura en México: desempeño económico. *Alimentación, salud y sustentabilidad: hacia una agenda de investigación*. Universidad Nacional Autónoma de México, 117.
- Lastres, L. (2022). Premio Nobel de Química 2022. *Educación en la Química*, 28(02), 170–180.
- Monterroso, A. I., Conde, A. C., Gay, C., Gómez, J. D. & López, J. (2012). Indicadores de vulnerabilidad y cambio climático en la agricultura de México. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 8.
- Rani, S., Teotia, S. & Nain, S. (2024). Recent Advancements and Biological Activities of Triazole Derivatives: a Short Review. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 1–9.
- Robles, M. D. R. (2015). Proceso de Haber-Bosch. Síntesis de amoníaco. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 17, 3–7.
- Romero, E. (2002). *Un siglo de agricultura en México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones.
- Sánchez, E. D. T., Gutiérrez, C. A. F., Jasso, J. H. T., Uribe, E. R. & Flores, J. S. (2024). Exposición laboral a plaguicidas y la salud en agricultores Ciénega, Jalisco, México.: Agricultores expuestos a plaguicidas. *Revista Bio Ciencias*, 11.
- Silva, R. E. & Quesada, B. (2015). El Proceso Haber-Bosch en la Sociedad Agroindustrial: Peligros y Alternativas. *El Otro Derecho*, 42(1), 75–96.
- Song, H., Wang, S., Cai, Q. & Chen, J. (2024). Research progress of triazole derivatives in the discovery of agricultural chemicals. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 61(2), 365–386.
- Vaishnani, M. J., Bijani, S., Rahamathulla, M., Baldaniya, L., Jain, V., Thajudeen, K. Y., Ahmed, M. M., Farhana, S. A. & Pasha, I. (2024). Biological importance and synthesis of 1, 2, 3-triazole derivatives: a review. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 17(1), 2307989.
- Wasserman, M. (2022). La síntesis química “click” y la “bioortogonal” ganan el premio Nobel 2022. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(181), 999–1001.

El papel de la innovadora química click y bioortogonal en el desarrollo de tratamientos sostenibles contra el cáncer en México

The role of innovative click and bioorthogonal chemistry in the development of sustainable cancer treatments in Mexico

Francisco Javier Moreno Mora^a, Noé Isaías Gómez Arámbula^b,
Elena Sarahí Chávez Hernández^c y Jorge Sánchez Camarena^d

RESUMEN

El artículo analiza la utilidad de la química click y la química bioortogonal para el tratamiento del cáncer en México, resaltando su relevancia en el campo de la biomedicina. Estas técnicas, creadas por Morten P. Meldal, K. Barry Sharpless y Carolyn R. Bertozzi, facilitan las reacciones químicas en la producción de productos químicos, tales como fármacos. Se identifica como principal desafío los elevados costos de los tratamientos oncológicos, proponiéndose la colaboración internacional entre entidades académicas como el Instituto de Tecnología de Massachusetts (por sus siglas en inglés, MIT) o al Colegio Universitario de Londres (por sus siglas en inglés, UCL) y entidades nacionales como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en el empleo de la química bioortogonal para alcanzar tratamientos más eficaces y potencialmente más asequibles y económicos. Asimismo, se examina la forma en que estas tecnologías pueden contribuir a un sistema de

^a Universidad de Guadalajara, Secretaría de Educación Media Superior (SEMS), Preparatoria No. 9. e-mail: francisco.moreno6058@alumnos.udg.mx

^b Universidad de Guadalajara, Secretaría de Educación Media Superior (SEMS), Preparatoria No. 9. e-mail: noe.gomez6072@alumnos.udg.mx

^c Universidad de Guadalajara, Secretaría de Educación Media Superior (SEMS), Preparatoria No. 9. e-mail: elena.chavez5704@alumnos.udg.mx

^d Coordinador del programa de Internacionalización de la Preparatoria No. 9 (Zapopan). Universidad de Guadalajara, Secretaría de Educación Media Superior (SEMS). e-mail: jorge.scamarena@academicos.udg.mx

salud más equitativo e innovador en México, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras clave: Química click, Bioortogonal, Cáncer, ODS, Cooperación internacional

ABSTRACT

The article analyzes the usefulness of click chemistry and bioorthogonal chemistry for the treatment of cancer in Mexico, highlighting their relevance in the field of biomedicine. These techniques, created by Morten P. Meldal, K. Barry Sharpless and Carolyn R. Bertozzi, facilitate chemical reactions in the production of chemical products, such as drugs. The main challenge is identified as the high costs of cancer treatments, proposing international collaboration between academic institutions such as the Massachusetts Institute of Technology (MIT) or the University College London (UCL) and national institutions such as the National Autonomous University of Mexico (UNAM) in the use of bioorthogonal chemistry to achieve more effective and potentially more affordable and economical treatments. It also examines how these technologies can contribute to a more equitable and innovative health system in Mexico, aligning with the Sustainable Development Goals.

Keywords: Click Chemistry, Bioorthogonal, Cancer, SDGs, International cooperation.

INTRODUCCIÓN: EL IMPACTO DE LA QUÍMICA CLICK Y BIOORTOGONAL EN LA CIENCIA MODERNA

La química click y la química bioortogonal han emergido como enfoques revolucionarios en el campo de la química moderna, ofreciendo soluciones innovadoras a problemas complejos en biomedicina y otros sectores. Estos conceptos se han consolidado gracias a los trabajos de investigadores como Morten Meldal, K. Barry Sharpless y Carolyn R. Bertozzi, cuyos descubrimientos, incluyendo la cicloadición de azida-alquino catalizada por

cobre (CuAAC) y la cicloadición de azida-alquino sin catalizador de cobre (SPAAC), que permite reacciones químicas dentro de sistemas vivos sin interferir en procesos naturales, han abierto nuevas posibilidades en ramas como la biomedicina, transformando la síntesis de moléculas y el desarrollo de fármacos; por ello les fue otorgado el premio nobel de química 2022 (Royal Swedish Academy of Sciences, 2022). El creciente uso de estas herramientas impulsa la necesidad de fomentar la cooperación internacional, especialmente en países como México, donde su integración podría impulsar la sostenibilidad del sistema de salud al mejorar la eficacia terapéutica y reducir costos a largo plazo.

MARCO TEÓRICO: DEFINICIÓN Y PRINCIPIOS DE LA QUÍMICA CLICK Y BIOORTOGONAL

La química click, propuesta en 2001 por K. Barry Sharpless, se refiere a un tipo de reacciones químicas rápidas, eficientes y muy selectivas que producen productos con alto rendimiento, bajo costo y poca generación de subproductos no deseados; por otro lado, el término química bioortogonal se refiere a cualquier reacción química que pueda ocurrir dentro de los sistemas vivos sin interferir con los procesos bioquímicos naturales (Nobel Prize, 2022).

Uno de los elementos que ha hecho que tenga más importancia este descubrimiento es la sencillez, porque no importa qué tan sofisticado sea algo, o qué tan complejo pueda ser diseñarlo, si al ponerlo en práctica es fácil. Gracias a estas técnicas, se han podido alterar moléculas específicas para crear y mejorar fármacos ya existentes, entre otros tratamientos. “Ha permitido la creación de medicamentos en los cuales lo que se hace es tomar un fármaco que se sabe es aplicable para un determinado cáncer, pudiendo ser más específicos en la destrucción de la célula sin dañar a otros organismos”, destacó Zinser (Sánchez, 2022). Adicionalmente, estas metodologías abren nuevas vías hacia tratamientos de menor toxicidad y mayor sostenibilidad clínica (Mir & Banik, 2025; Li et al., 2024).

La sencillez y eficacia de estas técnicas, como la CuAAC y la SPAAC, han facilitado la modificación de moléculas específicas, optimizando la exactitud de los tratamientos con medicamentos, como en el caso del cáncer.

PROBLEMÁTICA: EL DESAFÍO DEL CÁNCER EN MÉXICO Y LOS COSTOS DEL TRATAMIENTO

A pesar de los avances internacionales sobre las aplicaciones de la química click en países en desarrollo como México, el cáncer sigue siendo una de las enfermedades más costosas y difíciles de tratar. El Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) ha invertido más de 1,850 millones de pesos en equipos médicos para el tratamiento del cáncer (2018), siendo el padecimiento más costoso de acuerdo con los datos de Gastos Médicos Mayores (GMM) de AXA México, con un costo promedio de tratamiento de 386,000 pesos. En el 2023 los costos de tratamiento aumentaron 11% en comparación con el año anterior (Rendón, 2020). Los tratamientos de cáncer de mama ascienden a 245,000 pesos, mientras que los de leucemia pueden llegar a 875,000 pesos. Estos elevados costos llevan a un seguimiento incompleto del tratamiento y por ende un aumento de mortalidad (Accesos, 2024). Según Gutiérrez et al. (2024), el acceso y la calidad de la atención oncológica en México presentan grandes desigualdades entre estados, lo que evidencia la urgencia de adoptar innovaciones tecnológicas sostenibles y equitativas para mitigar esta brecha.

De acuerdo con los datos del Departamento de Hematología del Instituto Nacional de Cancerología (INCan) en México se diagnostican cada año alrededor de 195, 500 casos de cáncer en sus diferentes tipos, 46% de pacientes fallecen por esta causa. Cifras del 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) indican que, en México, la leucemia y el cáncer hematológico representa 50% de los cánceres infantiles y es una de las principales causas de deceso por cáncer en adultos varones (Secretaría de Salud, s.f.).

SOLUCIONES INTERNACIONALES: AVANCES EN EL TRATAMIENTO DEL CÁNCER A TRAVÉS DE LA QUÍMICA CLICK

Diversas instituciones de investigación alrededor del mundo están aprovechando los avances de la química click para desarrollar tratamientos contra el cáncer. Por ejemplo, en Estados Unidos, el *Koch Institute* en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (por sus

siglas en inglés, MIT) es un líder mundial en la investigación del cáncer y el desarrollo de tecnologías para la liberación de fármacos. Utilizan la química click en el desarrollo de nanopartículas y polímeros funcionalizados para mejorar tratamientos dirigidos, reduciendo los efectos secundarios de las quimioterapias (The Johnson Research Group, 2024). En Europa, el Colegio Universitario de Londres (por sus siglas en inglés, UCL) trabaja en colaboración con la Universidad de Stanford para poder unir anticuerpos de las células T para poder identificar células cancerígenas y destruirlas, aunque sólo está mostrando efecto en cáncer sanguíneo (2023).

Estos descubrimientos, plantean la posibilidad de producir tratamientos más efectivos y menos dañinos, así como ser potencialmente más económicos para los pacientes. La cooperación internacional para hacer llegar estos conocimientos a otras partes del mundo, así como permitir ampliar el rango de investigación y de investigadores, es la clave para unir esfuerzos y lograr avances sin precedentes en la cancerología. La aplicación de estas tecnologías permite tratamientos más personalizados, eficaces y potencialmente más accesibles, alineados con una perspectiva de salud sostenible. Esto es respaldado por estudios como el de Li et al. (2024), donde se propone un sistema nanocarreador activado por bioortogonalidad capaz de superar la heterogeneidad tumoral, aumentando eficacia terapéutica con menor carga tóxica.

OPORTUNIDADES PARA MÉXICO: COOPERACIÓN INTERNACIONAL, TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA Y SOSTENIBILIDAD

Pese a que México ya está trabajando en proyectos similares mediante los centros de investigación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) (2022), el poder cooperar internacionalmente entre instituciones, con una ventaja mayor en la investigación del tema como lo son el MIT y la UCL, generarían avances científicos y tecnológicos gracias a las aplicaciones de la química bioortogonal en el campo de la cancerología, para introducir nuevas áreas de trabajos y a su vez, mejorar la esperanza y calidad de vida de los mexicanos con los resultados obtenidos en estas áreas.

Si bien instituciones como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) o el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (2022) ya participan en proyectos biotecnológicos, la cooperación con centros de excelencia como el MIT podría acelerar la transferencia tecnológica. La integración de la química click y bioortogonal podría reducir el uso indiscriminado de quimioterapia, al permitir tratamientos dirigidos que conllevan menores costos y efectos secundarios. Por ejemplo, Mir y Banik (2025) destacan que el uso de productos naturales y tecnologías como la nanotecnología y la biocatálisis puede fortalecer la sostenibilidad terapéutica, al reducir residuos tóxicos, aumentar la biocompatibilidad y fomentar tratamientos más accesibles.

CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE: INNOVACIÓN EN SALUD Y CIENCIA

La química click y la química bioortogonal representan avances clave en la búsqueda de soluciones innovadoras para mejorar la salud pública en México, alineándose directamente con algunos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En particular, su aplicación contribuye al ODS 3: Salud y Bienestar, al permitir el desarrollo de tratamientos más efectivos y específicos para enfermedades como el cáncer, lo que mejora la calidad de vida y reduce los efectos secundarios de los tratamientos tradicionales. Además, con el apoyo de tecnologías avanzadas provenientes de centros en Estados Unidos y Europa, refuerza el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura, al fomentar la innovación en la biotecnología y la medicina en México. Finalmente, la colaboración entre países y el intercambio de conocimiento científico abonan al ODS 17: Alianzas para Lograr los Objetivos, permitiendo que México acceda a tecnologías y avances que podrían revolucionar su sistema de salud y avanzar hacia un tratamiento más equitativo y eficiente de las enfermedades (Gamez, 2022; Naciones Unidas en México, s.f.).

CONCLUSIÓN: EL FUTURO DE LA QUÍMICA CLICK EN MÉXICO Y SU POTENCIAL PARA COMBATIR EL CÁNCER

La química click y bioortogonal son herramientas clave en el tratamiento de enfermedades como el cáncer, ofreciendo tratamientos más precisos y menos invasivos; la evidencia revisada demuestra que estas tecnologías son viables y necesarias para abortar los tratamientos de cáncer desde una perspectiva innovadora y sostenible. Sin embargo, su implementación está limitada por barreras económicas y la escasa colaboración internacional. Superar estas limitaciones permitirá no sólo reducir costos, sino fortalecer la sostenibilidad del sistema de salud mediante terapias más efectivas.

REFERENCIAS

- Accesos. (2024, 16 de abril). Cáncer, la enfermedad más costosa de 2023 en México. [Accesos.](https://www.accesos.mx/salud/cancer-la-enfermedad-mas-costosa-de-2023-en-mexico/) <https://www.accesos.mx/salud/cancer-la-enfermedad-mas-costosa-de-2023-en-mexico/>
- CINVESTAV. (2022). Hacer fácil lo complicado: sobre el premio Nobel de química 2022. *Conexión CINVESTAV.* <https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/hacer-facil-lo-complicado-sobre-el-premio-nobel-de-quimica-2022>
- Gamez, M. J. (2022, 24 de mayo). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. *Desarrollo Sostenible.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Gutiérrez, J. P., García-Saisó, S., Hernández-Ávila, J. E., & Mokdad, A. H. (2024). *Performance evaluation of Mexico's health system at the national and subnational level, 1990–2019: An analysis of the health access and quality index.* The Lancet Regional Health – Americas, 25, 100621. <https://doi.org/10.1016/j.lana.2024.100621>
- Instituto Mexicano del Seguro Social. (2018, marzo 6). IMSS invierte más de 1,850 mdp en equipos de alta tecnología para atender a pacientes con cáncer. <https://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/201803/065>

- Li, Y., Chen, X., Wu, Z., Wang, J., & Liu, H. (2024). *A tumor heterogeneity-independent antigen-responsive nanocarrier enabled by bioorthogonal pretargeting and click-activated self-immolative polymer*. *Nature Nanotechnology*, 19(3), 312–321. <https://doi.org/10.1038/s41565-024-01450-0>
- Mir, M. A., & Banik, B. K. (2025). *Sustainable healing: Natural compounds facilitating the future cancer treatment*. *World Development Sustainability*, 6, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2025.100215>
- Naciones Unidas en México. (s.f.). Objetivos de desarrollo sostenible. *Las Naciones Unidas en México*. <https://mexico.un.org/es/sdgs>
- Nobel Prize. (2022, diciembre 15). *Química “Click” y Bioortogonal: la gran herramienta para desarrollos farmacéuticos y de nuevos materiales* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=tbAuOkCATvM>
- Rendón, K. (2020, 21 de noviembre). Cáncer: Esto cuesta un tratamiento en México para la enfermedad que golpea duro el bolsillo. *Merca2.0*. <https://www.merca20.com/cancer-cuanto-cuesta-tratamiento-mexico-ernesto-canto-muerte/>
- Royal Swedish Academy of Sciences, The Nobel Committee for Chemistry. (2022, 5 de octubre). *Scientific Background on the Nobel Prize in Chemistry 2022: Click chemistry and bioorthogonal chemistry* [PDF]. Nobel Prize. <https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/advanced-chemistryprize2022-2.pdf>
- Sánchez, J. (2022, 13 de octubre). Premio Nobel de Química 2022: por el desarrollo de las técnicas de biología molecular. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/2022/10/13/cien>
- Secretaría de Salud. (s.f.). México registra al año más de 195 mil casos de cáncer: Secretaría de Salud. *Gob.mx*. <https://www.gob.mx/salud/prensa/294-mexico-registra-al-ano-mas-de-195-mil-casos-de-cancer-secretaria-de-salud>
- The Johnson Research Group. (2024). *The Johnson Research Group at MIT*. <https://web.mit.edu/johnsongroup/>
- UCL. (2023, 24 de julio). Potent anti-cancer therapy created using click chemistry. *UCL News*. <https://www.ucl.ac.uk/news/2023/jul/potent-anti-cancer-therapy-created-using-click-chemistry>

Quimiorremediación de metales pesados en agua mediante síntesis de polímeros basados en química click

Chemioremediation of heavy metals in water by synthesis of click chemistry-based polymers

Nelly Berenice Delgado Angeles^a, Felipe de Jesús Orozco Luna^b y Raúl Cuauhtémoc Baptista^c

RESUMEN

En este trabajo se propone el desarrollo de modelos de quimiorremediación in silico para la eliminación de metales pesados en agua, por medio de la síntesis de polímeros basados en química click. Se utilizan simulaciones computacionales en lenguaje R, se modelaron polímeros con ligandos específicos capaces de capturar iones metálicos, los cuales serán validados experimentalmente mediante espectrofotometría UV-Vis. La combinación de química click y modelado computacional permite optimizar procesos de remediación, reducir costos y riesgos, así como diseñar soluciones sostenibles y escalables adaptadas a distintos entornos contaminados. Esta estrategia contribuye a mejorar la calidad del agua y proteger el medio ambiente.

Palabras clave: Química click, remediación, quimio remediación, metales pesados, contaminación de agua.

^a Estudiante de Ingeniería Informática. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara. e-mail: nelly.delgado5469@alumnos.udg.mx.

^b Estudiante del Doctorado en Tecnologías de la Información. Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas, Universidad de Guadalajara. e-mail: felipe.orozco0998@alumnos.udg.mx

^c Doctorado en Ecología Molecular y Biotecnología. Centro de Investigación Multidisciplinario en Salud y Departamento de Ciencias de la Salud, enfermedad como Proceso Individual. Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara. e-mail: raul.baptista@academicos.udg.mx

ABSTRACT

*In this work we propose the development of *in silico* chemoremediation models for the removal of heavy metals in water, by means of the synthesis of polymers based on click chemistry. Using computational simulations in R language, polymers were modeled with specific ligands capable of capturing metal ions, which will be experimentally validated by UV-Vis spectrophotometry. The combination of click chemistry and computational modeling allows optimizing remediation processes, reducing costs and risks, as well as designing sustainable and scalable solutions adapted to different contaminated environments. This strategy contributes to improve water quality and protect the environment.*

Keywords: Click chemistry, remediation, chemo remediation, heavy metals, water pollution.

INTRODUCCIÓN

La química *click* es una herramienta que está cobrando importancia en el desarrollo de proyectos de remediación ambiental (Devaraj, 2021), debido a su eficiencia, especificidad, coste y adaptabilidad (Sethiya et al., 2021). El uso de química *click* permite desarrollar métodos sostenibles para captura, neutralización, separación, eliminación o prevención de su dispersión de contaminantes ambientales (Kaur, 2021) con el fin de reducir o eliminar los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente (Chio, 2019, Nwe, 2009).

La contaminación por metales pesados en México es un problema que está creciendo en las últimas décadas, debido a las actividades industriales por lo que existe una gran necesidad de implementar soluciones para remediación de ecosistemas. Actualmente, existen diversas soluciones tanto para remediación de metales pesados en tierra como en aguas.

El presente trabajo consiste en proponer métodos de remediación desarrollados, modelados y probados *in silico*, para identificar qué componentes químicos basados

en polímeros *click*, aportan soluciones de quimiorremediación de metales pesados en agua.

In silico se refiere a simulaciones computacionales y técnicas de modelado utilizadas para predecir y optimizar procesos, a menudo creando las simulaciones antes de las pruebas físicas experimentales. En el contexto de la remediación ambiental, las soluciones computacionales se pueden aplicar para modelar la interacción entre contaminantes, agentes de remediación, y el ambiente contaminado a tratar, para diseñar mejores estrategias y optimizar el proceso general de remediación. Proponemos considerar la adopción del término **Quimiorremediación**, como aquellas tecnologías basadas en reacciones químicas simples, desde la perspectiva de la química *click*, para el saneamiento del medio ambiente.

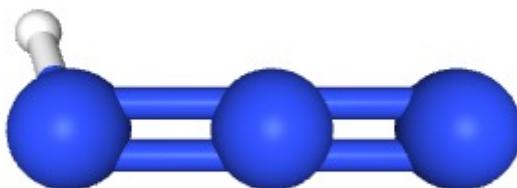
Para el desarrollo de esta propuesta, se ha trabajado en lenguaje de programación *R* (<https://cran.r-project.org/>), modelando el uso de cicloadición de azidas y alquinos catalizados por cobre, sintetizando polímeros que contienen ligandos específicos para atraer y capturar iones metálicos, lo que permite realizar caracterización de la presencia de metales en agua, validando en una segunda fase de manera experimental en laboratorio mediante análisis de eficiencia del método de detección de metales pesados en muestras ambientales de agua detección por espectrofotometría en longitud de rango ultravioleta-visible (UV-Vis).

FASE 1 DEL PROYECTO

Desarrollo de modelo computacional para simulación

Utilizando bases de datos especializadas *NBCI Pubchem* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> se descargaron los archivos *3D* de las moléculas ácido hidrazoico y 1,2-dibromoetano (Figura 1).

1. Ácido hidrazoico



2. 1,2-dibromoetano

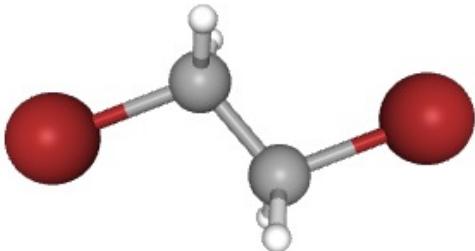


Figura 1. Reconstrucción de moléculas ácido hidrazoico (A) y 1,2-dibromoetano (B) a partir de cristalografía empleadas en experimentación *in silico* para modelación de reacción basada en química click para quimioremedación de metales pesados en agua. Las moléculas disponibles en NCBI PubChem <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> con número de accesos CID 24530 y 7839 respectivamente.

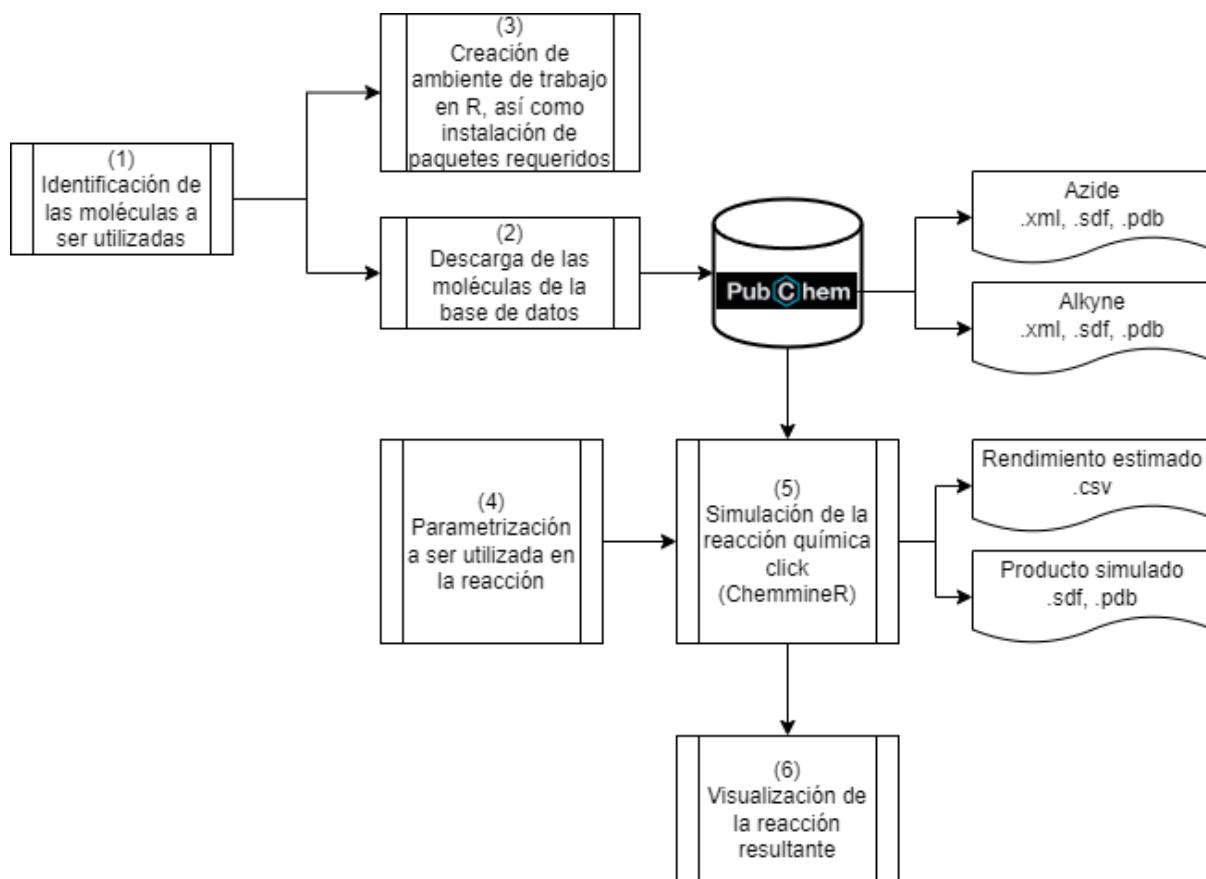


Figura 2. Esquema de fase inicial del proyecto mediante modelación de reacción basada en química click para quimioremedación de metales pesados en agua.

FASE 2 DEL PROYECTO

Metodología para validación de modelo computacional

Usando la cicloadición de azidas y alquinos catalizada por cobre (la reacción *click* más conocida), proponemos sintetizar en laboratorio experimental de química en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Este polímero contiene ligandos específicos (Dudchak et al., 2024) que al atrapar iones metálicos cambiará su espectro de emisión, lo que permitirá su detección mediante curvas de calibración en espectrofotometría UV-Vis.

REACTIVOS Y PROCEDIMIENTO NECESARIOS PARA PREPARACIÓN DE ALQUINOS

Dihaloalcano (ej. 1,2-dibromoetano): 10 mmol.

Base fuerte (ej. hidróxido de sodio, NaOH): 20 mmol.

Disolvente (etanol o un disolvente polar): 50 mL.

Agua destilada: según sea necesario para ajuste del volumen total.

Pesar 10 mmol de 1,2-dibromoetano y disolverlo en 25 mL de etanol en un matraz limpio.

Añadir 20 mmol de NaOH en 25 mL de agua destilada.

Añadir la solución de NaOH al matraz con el dihaloalcano lentamente, agitando para asegurar la mezcla uniforme. Colocar el matraz en un sistema de reflujo y calentar la mezcla a 70-80°C durante 1-2 horas. Esto permite la eliminación de los haluros y la formación del alquino (Sethiya et al., 2021).

Purificación: Enfriar la mezcla y extraer el producto alquino utilizando un embudo de decantación con un solvente no polar (como éter dietílico). Este método de dehidrohalogenación permite obtener un alquino funcionalizado listo para la reacción *click*.

REACTIVOS NECESARIOS Y PROCEDIMIENTO PARA PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN CON AZIDA FUNCIONALIZADA

Azida de sodio (NaN_3): 0.1 M.

Aqua destilada: suficiente para disolver el reactivo.

Alquino funcionalizado: en la cantidad estequiométrica deseada para la reacción.

Preparación de la solución de azida de sodio 0.1 M: Pesar la cantidad necesaria de azida de sodio (6.5 g) para preparar 1 litro de una solución 0.1 M.

Disolver el NaN_3 en 1 litro de agua destilada en un matraz adecuado.

Catalizador de cobre: Se usará una solución de Cu(I) para catalizar la reacción de cicloadición.

REACTIVOS NECESARIOS Y PROCEDIMIENTO PARA PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN CATALIZADORA DE SULFATO DE COBRE

Sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$): 1 M.

Aqua destilada: suficiente para disolver el reactivo.

Soporte (como carbón activado o Al_2O_3 , según sea el caso).

Disolver 24.96 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en 100 ml de agua destilada para obtener una solución 1 M. Se recomienda agitar la mezcla para asegurar una completa disolución. Añadir la solución de sulfato de cobre a un soporte, como carbón activado o Al_2O_3 , mediante el método de impregnación. El soporte se empapa completamente con la solución de CuSO_4 y se deja reposar para garantizar una distribución homogénea del cobre sobre el material.

La mezcla se coloca en un baño de agua o se deja en reposo para permitir la evaporación del agua. Esto deja una capa de sulfato de cobre sobre el soporte. Finalmente, el soporte impregnado se calienta a temperaturas de 350-450 °C para descomponer el CuSO_4 y formar el catalizador activo de óxido de cobre (CuO) sobre el soporte.

REACCIÓN CLICK MEDIANTE ADICIÓN DEL POLÍMERO FUNCIONALIZADO

Agregar el alquino funcionalizado a la solución de azida de sodio en la proporción estequiométrica adecuada para la reacción de cicloadición. Mantener la mezcla en agitación constante y calentar a temperatura ambiente o a la temperatura óptima para la reacción (normalmente entre 65-85 °C). Se recomienda realizar la reacción bajo **atmósfera inerte** para evitar la descomposición del alquino y mejorar la eficiencia del proceso (Se obtiene eliminando o disminuyendo la cantidad de oxígeno mediante su sustitución por un Nitrógeno o Argón).

En un matraz limpio, combinar las soluciones de alquino y azida en proporciones estequiométricas. Añadir el catalizador de cobre a la mezcla y agitar vigorosamente.

Mantener la reacción a temperatura ambiente y en medio acuoso (usar agua destilada como disolvente para simplificar el proceso). Dejar reaccionar durante 12 a 24 horas para garantizar la funcionalización del polímero.

Al terminar la reacción de síntesis del polímero funcionalizado, el producto se purifica utilizando un disolvente adecuado (Sethiya et al., 2021), como Tetrahidrofurano (THF), mediante técnicas de extracción en fase líquida. Este proceso permite la funcionalización de la azida para su posterior uso en reacciones *click*. Filtrar, lavar y secar el polímero formado para separar cualquier residuo no deseado.

PRUEBAS DE DETECCIÓN DE METALES

Disolver el polímero sintetizado en una muestra de agua contaminada con iones metálicos (Se propone probar con diferentes concentraciones de mercurio).

Observar cambios en la señal espectrómetro UV-Vis en diferentes longitudes de onda entre 140 a 780 nm para cuantificar la sensibilidad del polímero para detección de metales pesados.

Se sumergirá el polímero en soluciones de prueba que contienen diferentes concentraciones de metales pesados y se documentaran observaciones de registro en rango

UV-Vis para construir una curva de detección y analista estadístico descriptivo e inferencial de los datos obtenidos. Se medirá la respuesta del polímero usando espectroscopía UV-Vis en rango 195 a 780 nm, comparando la sensibilidad a concentraciones de mercurio en solución acuosa.

DISCUSIÓN

La importancia de abordar problemas ambientales de contaminación de metales pesados, combinando la química click y simulación *in silico*, permite simular sistemas complejos, para comprender cómo las diferentes modelos de remediación interactúan con los contaminantes, ahorrando tiempo, recursos, al mismo tiempo de aprovechar todas las facilidades que permiten los bases de datos actuales de química molecular, aplicaciones científicas, librerías y lenguajes de programación orientados al quehacer científico.

El uso de modelos *in silico*, puede ayudar a simular años de interacciones de contaminantes y su efecto de remediación en poco tiempo, teniendo la capacidad de probar niveles de dosificación de agentes quelantes permitiendo optimizar los mejores enfoques de biorremediación, asegurando la máxima eficiencia con el mínimo uso de productos químicos, reducir la cantidad de desechos químicos y garantizar estrategias de químico remediación más sostenibles.

El uso de modelación computacional, adicionalmente permite la escalabilidad de las tecnologías de remediación química, desde pequeños sistemas (por ejemplo, filtración de agua potable) hasta cuerpos de agua industriales o naturales a gran escala. La posibilidad de poder escalar en complejidad y volumen de los modelos de simulaciones computacionales, es factible gracias a la colaboración con el CADS, Centro de Análisis de Datos y Supercómputo de la Universidad de Guadalajara.

El promover el desarrollo de modelos de remediación *in silico*, reducen el riesgo de esfuerzos de remediación en físico que pueden resultar costosos e ineficaces. Adicionalmente estos modelos de remediación *in silico*, podrá apoyar en buscar soluciones personalizadas, ya que cada sitio contaminado puede tener propiedades únicas,

permitiendo la personalización específica de cada entorno contaminado, y reduciendo así la necesidad de crear y probar en físico soluciones que pudieran generar perturbaciones ecológicas adicionales.

Concluyendo que el uso de modelos de quimiorremediación *in silico* puede ayudarnos a obtener avances en la purificación del agua, la recuperación de metales pesados, mejorar la calidad de vida en nuestra sociedad y la protección del medio ambiente.

REFERENCIAS

- Chio, T. I., & Bane, S. L. (2019). Click chemistry conjugations. In Antibody-Drug Conjugates: Methods and Protocols (pp. 83-97). New York, NY: Springer US.
- Devaraj, N. K., & Finn, M. G. (2021). Introduction: Click chemistry. *Chemical Reviews*, 121(12), 6697–6698.
- Dudchak, R., Podolak, M., Holota, S., Szewczyk-Roszczenko, O., Roszczenko, P., Bielawska, A., Lesyk, R., & Bielawski, K. (2024). Click chemistry in the synthesis of antibody-drug conjugates. *Bioorganic Chemistry*, 143, 106982.
- Kaur, J., Saxena, M., & Rishi, N. (2021). An overview of recent advances in biomedical applications of click chemistry. *Bioconjugate Chemistry*, 32(8), 1455–1471.
- Nwe, K., & Brechbiel, M. W. (2009). Growing applications of “click chemistry” for bioconjugation in contemporary biomedical research. *Cancer Biotherapy and Radiopharmaceuticals*, 24(3), 289–302.
- Sethiya, A., Sahiba, N., & Agarwal, S. (2021). Role of click chemistry in organic synthesis. In Current Topics in Chirality-From Chemistry to Biology. IntechOpen.

Sistemas Simbióticos de Xenobots para la Degradación de Plásticos

Symbiotic Xenobot Systems for Plastic Degradation

Omar Cano García^a, Iveth Gómez Morales^b, Yajaira Zepeda García^c y Omar Paredes^d

RESUMEN

El creciente problema ambiental generado por la acumulación de micro y nanoplásticos en lagos, lagunas y ríos ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras y efectivas. Entre las diferentes propuestas de resolución, la química click se ha destacado por su enfoque sencillo, permitiendo crear reacciones altamente eficientes y sin dejar residuos. En este trabajo, centramos la posibilidad de emplear la química click como un principio para el diseño de xenobots, organismos especializados capaces de transportar bacterias degradadoras de nanoplásticos con el fin de mitigar la contaminación.

Palabras clave: Biorremediación, Xenobots, Química click, Nanopartículas, PETasa

ABSTRACT

The growing environmental problem generated by the accumulation of micro- and nanoplastics in lakes, lagoons and rivers has prompted the search for innovative and

^a Estudiante Maestría en Ciencias en Química. Biodigital Innovation Lab, Translational Bioengineering Department, CUCEI, Universidad de Guadalajara. e-mail: omar.cano7952@alumnos.udg.mx

^b Estudiante Maestría en Ciencias en Química. Biodigital Innovation Lab, Translational Bioengineering Department, CUCEI, Universidad de Guadalajara.

^c Estudiante Maestría en Ciencias en Química. Biodigital Innovation Lab, Translational Bioengineering Department, CUCEI, Universidad de Guadalajara.

^d Profesor investigador Biodigital Innovation Lab, Translational Bioengineering Department, CUCEI, Universidad de Guadalajara. e-mail: omar.paredes@academicos.udg.mx

effective solutions. Among the different proposals for resolution, click chemistry has stood out for its simple approach, allowing the creation of highly efficient reactions without leaving residues. In this work, we focus on the possibility of employing click chemistry as a principle for the design of xenobots, specialized organisms capable of carrying nanoplastic degrading bacteria in order to mitigate pollution.

Keywords: Bioremediation, Xenobots, Click chemistry, Nanoparticles, PETase.

INTRODUCCIÓN

Los xenobots, son estructuras biológicas programables creadas a partir de células epiteliales y cardíacas de *Xenopus laevis*, ofrecen un enfoque novedoso en la biotecnología moderna. Estos organismos han demostrado que su función depende de la forma que tienen y de la proporción de células, presentando capacidades notables como movimiento autónomo, transporte de pequeños objetos y auto reparación en caso de lesiones. Además, su capacidad para colaborar en grupo sugiere un gran potencial para aplicaciones prácticas (Kriegman et al., 2020).

En busca de potenciar estas capacidades, los xenobots pueden equiparse con receptores químicos a través de nanopartículas plasmónicas, diseñadas específicamente para detectar la presencia de nanoplásticos en ambientes acuáticos (Schiavi et al., 2023). Su capacidad para sobrevivir en agua dulce sin necesidad de alimento durante un tiempo considerable los convierte en una solución prometedora para tareas específicas como la recolección de nanoplásticos. Sin embargo, existe una limitación fundamental: las células musculares y de piel que los conforman, al ser diferenciadas, son menos flexibles y difíciles de modificar genéticamente. Esta característica dificulta la producción continua de enzimas como las PETasas, incluso cuando se logra una modificación exitosa.

Para superar estas limitaciones, la química click representa una herramienta valiosa en el diseño biotecnológico. Esta metodología, que comprende un conjunto de reacciones

químicas modulares y versátiles, se ha establecido como un componente importante en la biología sintética. Basada en principios de eficiencia, especificidad, simplicidad y mínimo desperdicio (Devaraj & Finn, 2021), la química click funciona de manera análoga a un sistema de bloques de construcción: las moléculas o compuestos se ensamblan de forma precisa y complementaria, resultando en reacciones altamente eficientes. Su versatilidad ha permitido aplicaciones exitosas en diversos campos, desde la farmacología hasta innovadoras propuestas de biorremediación (Patra, 2022).

DESARROLLO

Un ejemplo reciente de la aplicación la química click fue propuesto por Qi et al., quienes desarrollaron microrobots a base de algas para la eliminación de nanoplásticos, utilizando una reacción de química click para ensamblar estas algas en microbots con capacidad de movimiento acuático (Qi et al., 2024).

Inspirados por estos avances, planteamos el diseño de un xenobot con nanopartículas ancladas que funcione como vehículo transportador de bacterias capaces de expresar enzimas degradadoras de nanoplásticos. Nuestra propuesta se basa en la generación de bloques funcionales que, al unirse en una forma y dirección específicas, formen xenobots especializados en el movimiento y la captación de plásticos, donde la disposición precisa de las células epiteliales y cardíacas contribuya a la conformación de un xenobot híbrido (Figura 1).

Este enfoque nos lleva a diseñar un sistema simbiótico entre xenobots y bacterias especializadas capaces de expresar PETasas, donde los xenobots actúan como vehículos transportadores hacia áreas contaminadas con plásticos, eliminando la necesidad de modificarlos genéticamente. La química click facilita este proceso al permitir el ensamblaje preciso de las células de los xenobots con nanopartículas receptoras y bacterias especializadas. La química click, y específicamente la reacción conocida como CuAAC (Copper-catalyzed Azide-Alkyne Cycloaddition) (Qi et al., 2024) permite ensamblar los xenobots, las bacterias y las nanopartículas. Los bloques funcionales de los xenobots serían functionalizados químicamente con grupos alquino mediante un proceso suave que no altera

su viabilidad. Paralelamente, las nanopartículas que recubren su superficie y las bacterias portadoras de PETasas modificadas para portar grupos azida. Al poner ambos componentes en contacto en presencia de un catalizador de cobre, se produce la reacción click CuAAC, uniendo covalentemente las nanopartículas y las bacterias a la superficie del xenobot.

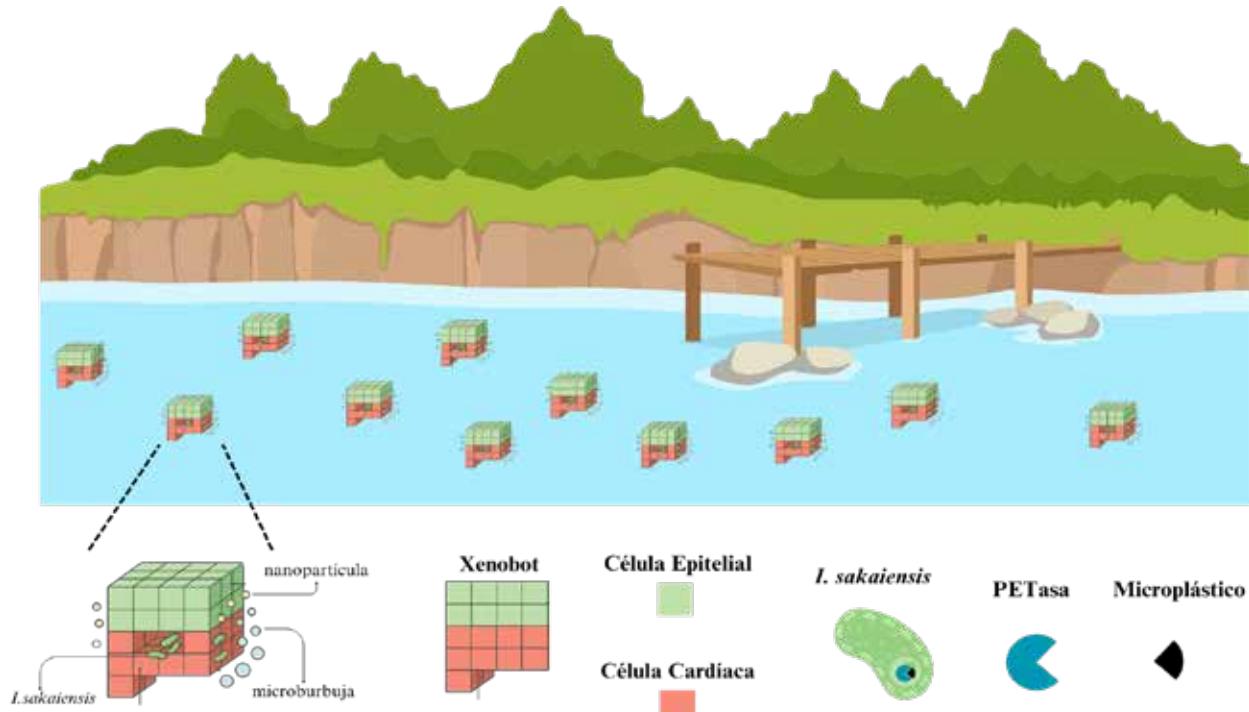


Figura 1. Representación esquemática del sistema simbiótico de xenobots. Autoría Propia.

Esta propuesta se suma a diversas iniciativas existentes en el campo de la biorremediación de plásticos. Empresas como Carbios ya han diseñado enzimas especializadas en la biodegradación de plásticos presentes en el suelo. Adicionalmente, investigaciones previas lograron desarrollar una enzima a partir de mutantes de una proteína formadora de poros de membranas de la anémona de mar, creando nano reactores catalíticos prometedores para filtrar, capturar y descomponer el nano PET (Robles-Martín et al., 2023).

El mecanismo de acción comienza cuando los xenobots, se enlanzan a nanopartículas a través de la reacción CuAAC, elegida por su especificidad bioortogonal, alta eficiencia en agua y mínima citotoxicidad (Rostovtsev et al., 2002). Para la captura de nanoplásticos se emplean nanopartículas plasmónicas de oro (AuNPs) recubiertas con HS–PEG–C≡CH,

seleccionadas por su fuerte resonancia de plasmones superficiales que convierte luz en calor local para generar microburbujas que arrastran partículas plásticas (Moon et al., 2024; Lapotko et al., 2011; Huang et al., 2006).

Para el guiado remoto, se incorporan óxidos de hierro superparamagnéticos (Fe_3O_4 o $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), funcionalizados con dopamina–N₃ y PEG–C≡CH mediante CuAAC. Esto permite dirigir los xenobots mediante campos magnéticos externos sin comprometer la integridad celular (Lu et al., 2007). Asimismo, nanopartículas de sílice mesoporosa (SiO₂), silanizadas con (3-azidopropil) trietoxisilano, inmovilizan PETasa–C≡CH mediante CuAAC, estabilizando su actividad en entornos acuáticos gracias a su elevada porosidad (Hartmann & Kostrov, 2013). Finalmente, nanopartículas de quitosano–C≡CH unidas a grupos azida celulares actúan como esponjas hidrofílicas capaces de adsorber nanoplásticos por interacciones hidrofóbicas y electrostáticas.

Este ensamblaje modular y complementario, habilitado por CuAAC, maximiza la captura, concentración y degradación localizada de nanoplástico en ambientes acuáticos. La concentración local de nanoplástico inducida por los xenobots facilita la entrega dirigida de bacterias a zonas altamente contaminadas, optimizando la interacción entre PETasas y sustrato plástico.

Para la degradación de nanoplástico, se plantea utilizar la bacteria *Ideonella sakaiensis* que expresa la enzima PETasa, que le permite descomponer el nanoplástico PET y utilizarlo como fuente de carbono y energía (Yoshida et al., 2016).

CONCLUSIÓN

Esta propuesta integra de manera transversal los avances de la química click a dos escalas complementarias: a nivel micro, mediante la expresión de proteínas que descomponen nanoplástico a través de bacterias especializadas, y a nivel macro, mediante la creación de bloques funcionales que, al ensamblarse, forman xenobots programables y dirigibles. Esta combinación representa una estrategia prometedora que aprovecha el potencial de la biotecnología y la biología sintética de los xenobots para enfrentar uno de los mayores desafíos ambientales de nuestro tiempo.

REFERENCIAS

- Devaraj, N. K., & Finn, M. G. (2021). Introduction: Click Chemistry. *Chemical Reviews*, 121(12), 6697–6698. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00469>
- Hartmann, M., & Kostrov, X. (2013). Immobilization of Enzymes on Porous Silica Materials: Principles and Applications. *Chem. Soc. Rev.*, 42(15), 6277–6289.
- Huang X, El-Sayed IH, Qian W, El-Sayed MA. Cancer cell imaging and photothermal therapy in the near-infrared region by using gold nanorods. *J Am Chem Soc.* 2006 Feb 15;128(6):2115-20. doi: 10.1021/ja057254a. PMID: 16464114.
- Kriegman, S., Blackiston, D., Levin, M., & Bongard, J. (2020). A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 1853–1859. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910837117>
- Krishna, R., Wang, J., Ahern, W., Sturmels, P., Venkatesh, P., Kalvet, I., Lee, G. R., Morey-Burrows, F. S., Anishchenko, I., Humphreys, I. R., McHugh, R., Vafeados, D., Li, X., Sutherland, G. A., Hitchcock, A., Hunter, C. N., Kang, A., Brackenbrough, E., Bera, A. K., ... Baker, D. (2024). Generalized biomolecular modeling and design with RoseTTAFold All-Atom. *Science*, 384(6693). <https://doi.org/10.1126/science.adl2528>
- Lapotko D. Plasmonic nanobubbles as tunable cellular probes for cancer theranostics. *Cancers (Basel)*. 2011 Feb 23;3(1):802-40. doi: 10.3390/cancers3010802. PMID: 21442036; PMCID: PMC3063943.
- Lu, A. H., Salabas, E. L., & Schüth, F. (2007). Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46(8), 1222–1244.
- Moon, S., Martin, L. M. A., Kim, S., Zhang, Q., Zhang, R., Xu, W., & Luo, T. (2024). Direct observation and identification of nanoplastics in ocean water. *Science Advances*, 10(4). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh1675>
- Patra, S. (2022). Biofunctionalized Nanomaterials for Sensing and Bioremediation of Pollutants. In *Biotechnology for Zero Waste* (pp. 343–360). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527832064.ch22>
- Qi, G., Liu, J., Tian, C., & Zhang, S. (2024). Algae-based self-driven microrobot for efficient removal of nanoplastics from water environment. *Chemical Engineering Journal*, 499,

156216. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156216>

Robles-Martín, A., Amigot-Sánchez, R., Fernandez-Lopez, L., Gonzalez-Alfonso, J. L., Roda, S., Alcolea-Rodriguez, V., Heras-Márquez, D., Almendral, D., Coscolín, C., Plou, F. J., Portela, R., Bañares, M. A., Martínez-del-Pozo, Á., García-Linares, S., Ferrer, M., & Guallar, V. (2023). Sub-micro- and nano-sized polyethylene terephthalate deconstruction with engineered protein nanopores. *Nature Catalysis*, 6(12), 1174–1185. <https://doi.org/10.1038/s41929-023-01048-6>

Rostovtsev, V. V., Green, L. G., Fokin, V. V., & Sharpless, K. B. (2002). A Stepwise Huisgen Cycloaddition Process: Copper(I)-Catalyzed Regioselective “Ligation” of Azides and Terminal Alkynes. *J. Am. Chem. Soc.*, 124(23), 6545–6554.

Schiavi, S., Parmigiani, M., Galinetto, P., Albini, B., Taglietti, A., & Dacarro, G. (2023). Plasmonic Nanomaterials for Micro- and Nanoplastics Detection. *Applied Sciences*, 13(16), 9291. <https://doi.org/10.3390/app13169291>

Sevilla, M. E., Garcia, M. D., Perez-Castillo, Y., Armijos-Jaramillo, V., Casado, S., Vizuete, K., Debut, A., & Cerda-Mejía, L. (2023). Degradation of PET Bottles by an Engineered Ideonella sakaiensis PETase. *Polymers*, 15(7), 1779. <https://doi.org/10.3390/polym15071779>

Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196-1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

La química click como potencial herramienta para remediar la contaminación en el lago de Chapala

Click chemistry as a potential tool to remediate contamination in Lake Chapala

Edwin Bladimir Bonilla Ascencio^a, Víctor Daniel Carrera Rentería^b, Osiris Farias Elvira^c, Maite Rentería Urquiza^d

RESUMEN

El lago de Chapala, el cuerpo de agua dulce más grande de México enfrenta problemas significativos de contaminación, debido a la descarga de diferentes efluentes que aportan una serie de contaminantes, alterando así el ecosistema y todas las especies vivas que dé el dependen de manera directa o indirecta. Este plan de acción propone la implementación de tecnologías avanzadas para la reducción de estos contaminantes; utilizando materiales funcionalizados mediante química click, y de esta forma, mejorar la calidad del agua y proteger la salud pública.

Palabras clave: remediación, química click, lago de Chapala, contaminación de aguas.

ABSTRACT

Lake Chapala, the largest freshwater body in Mexico, faces significant pollution problems due to the discharge of different effluents that contribute a series of pollutants, thus altering

^a Estudiante Maestría en Ciencias en Química. CUCEI, Universidad de Guadalajara, México. e-mail: edwin.bonilla8566@alumnos.udg.mx

^b Estudiante Maestría en Ciencias en Química. CUCEI, Universidad de Guadalajara, México. e-mail: victor.carrera8565@alumnos.udg.mx

^c Estudiante Maestría en Ciencias en Química. CUCEI, Universidad de Guadalajara, México. e-mail: osiris.farias8567@alumnos.udg.mx

^d Profesor investigador Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenieras, Universidad de Guadalajara, México. e-mail: maite.rurquiza@academicos.udg.mx

the ecosystem and all living species that depend on it directly or indirectly. This action plan proposes the implementation of advanced technologies for the reduction of these pollutants; using functionalized materials through click chemistry, and in this way, improve water quality and protect public health.

Keywords: remediation, click chemistry, Lake Chapala, water pollution.

INTRODUCCIÓN

El lago de Chapala se encuentra entre los estados de Jalisco (86%) y Michoacán (14%); cuenta con una capacidad de 7,897 millones de m³ y una superficie de 114,659 hectáreas, siendo la principal fuente de agua potable para el área metropolitana de Guadalajara^[1]. Este lago está expuesto principalmente a la contaminación producida por las actividades antropogénicas que se desarrollan a su alrededor. Se ha documentado la presencia de contaminantes tanto en los efluentes como en el seno del lago, entre los que destacan: plaguicidas^[2], metales pesados^[3, 4], compuestos activos de fármacos^[5] y microplásticos^[6]. A pesar de contar con regulaciones sobre los niveles permisibles en descargas de aguas residuales en cuerpos de agua^[7, 8], el lago de Chapala sigue siendo uno de los cuerpos de agua más contaminados del país.

La presencia de estos contaminantes plantea riesgos para la salud pública, incluyendo enfermedades como asma, cáncer, daños neurológicos, entre otras^[9]. Por lo tanto, es de suma importancia desarrollar mecanismos que faciliten la remoción de estos, así como la regulación de las fuentes de contaminación. Proponer acciones de remediación con procesos basados en la síntesis química, sin residuos, y de bajo costo, es indispensable para resolver de manera responsable y sin efectos colaterales, esta problemática; una alternativa potencial que cumple estas características es el desarrollo de materiales mediante química click.

Esta nueva forma de hacer síntesis química, documentada de manera simultánea, durante los años 2,000, por los profesores Peter Morten Meldal y Barry Sharpless, **permite**

unir moléculas de manera eficiente y modular para obtener productos sin desechos considerables^[10], siendo esta una de las principales características que motiva y permite desarrollar nuevos materiales potencialmente escalables.

Debido a las innumerables ventajas que trae consigo la química click en el desarrollo de materiales; muchas compañías la han integrado en sus procesos de investigación; desde el desarrollo de nuevos fármacos antivirales, como en el caso de Pfizer y Merck & Co^[11, 12], el desarrollo de conjugados anticuerpo-fármaco (ADC) en Genentech^[13] y la optimización de procesos de síntesis para mejorar materiales con diversas aplicaciones, producidas en BASF^[14]. Además, instituciones como el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), centran esfuerzos en las ventajas de la química click para desarrollar nuevos materiales para la purificación del agua y la remediación ambiental^[15]. UNAM/CINVESTAV están investigando aplicaciones de la química click en biomedicina y materiales avanzados^[16]. Incluso gobiernos como el de Estados Unidos, han financiado proyectos de investigación promoviendo su uso en biomedicina y otras áreas^[17-22].

PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN EL LAGO DE CHAPALA

En respuesta al problema ambiental en el lago de Chapala, se propone el desarrollo de tecnologías avanzadas utilizando la química click, que permitan la remoción de los contaminantes mencionados, y mejorar así la calidad, del agua del lago y, de todas las actividades que de este se derivan, con el fin de proteger la salud pública.

Existen estudios de materiales sintetizados mediante química click que nos pueden ayudar, por ejemplo:

Estructuras macrocíclicas: utilizando azúcares como precursores, es posible desarrollar arquitecturas moleculares macrocíclicas mediante la reacción de cicloadición azida-alquino catalizada por cobre (I) (CuAAC). Esta reacción de química click, permite la formación eficiente y selectiva de enlaces triazólicos entre azidas y alquinos en condiciones suaves^[10].

Estas estructuras macrocíclicas presentan propiedades que permiten la remoción de moléculas pequeñas, como es el caso de los contaminantes emergentes, mediante mecanismos análogos a los observados en las ciclodextrinas.^[10] Los grupos funcionales

presentes en toda la arquitectura macrocíclica podrían facilitar su derivatización a través de reacciones adicionales convencionales, permitiendo la inserción de nuevas funcionalidades y optimizando el desempeño, en procesos de remoción de contaminantes.

Para el caso del lago de Chapala, la idea plantea el desarrollo de una amplia gama de macrociclos con propiedades adaptables, capaces de implementar mecanismos de remoción multifacéticos según el tipo de contaminante a tratar, como pesticidas, fármacos, metales tóxicos, entre otros.

Además, cada macroestructura puede ser anclada, mediante reacciones conocidas, a andamiajes móviles prediseñados para su aplicación en focos específicos de contaminación, previamente identificados, ya sea dentro del lago o en otros efluentes que contribuyen a la contaminación.

CONCLUSIÓN

El problema de contaminación del lago de Chapala representa un impacto negativo en el ámbito social, económico y de salud pública. Por ello, se deben implementar acciones correctivas que faciliten la eliminación de la contaminación existente en este cuerpo de agua. Sin embargo, se requieren acciones preventivas que aseguren la calidad de este recurso hídrico para las generaciones futuras; esto exige el consenso y compromiso entre los principales actores: gobierno, industria, academia y sociedad, cuya sinergia permitiría encontrar rutas eficientes y viables para resolver esta problemática.

REFERENCIAS

- Comisión Estatal del Agua Jalisco - Lago de Chapala. (1 de octubre de 2024). CEA Jalisco.
<https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/chapala/>
- Silva-Madera, R. J., Salazar-Flores, J., Peregrina-Lucano, A. A., Mendoza-Michel, J., Ceja-Gálvez, H. R., Rojas-Bravo, D., ... Torres-Sánchez, E. D. (2021). Pesticide Contamination in Drinking and Surface Water in the Ciénega, Jalisco, Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(2). doi:10.1007/s11270-021-04990-y
- Rueda-Garzon, L. F., Miranda-Avilés, R., Carrillo-Chávez, A., Puy-Alquiza, M. J., Morales-

- Martinez, J. L., & Zanor, G. (2022). Contamination assessment and potential sources of heavy metals and other elements in sediments of a basin impacted by 500 years of mining in central Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(10), 729.
- Maldonado-Villegas, M. M., Ramírez-Hernández, B. C., Torres-Morán, M. I., Álvarez-Moya, C., Zarazúa-Villaseñor, P., & Velasco-Ramírez, A. P. (2020). Presence of arsenic and potentially toxic metals (Cd, Cr, Pb) in water and soil of the NE shore of Chapala Lake, Mexico, and its genotoxic effect in the edible chayote fruit (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.). *European Journal of Horticultural Science*, 85(2), 110-117.
- Peregrina-Lucano, A. A., Mendoza-Michel, J., Rodríguez-Arreola, A., & Peña-Velasco, G. (2024). Detection of pharmaceutically active compounds in tap water samples by direct injection HPLC/MS-MS: A danger signal in deficiency in residue management. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 112(5), 67.
- Padilla Jimenez, S. M., Moncayo Estrada, R., Maruri, D. T., & Álvarez Bernal, D. (2024). Microplastic evidence assessment from water and sediment sampling in a shallow tropical lake. *Water Environment Research*, 96(9), e11123.
- NOM-001-SEMARNAT-2021. (2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
- SEMARNAT. (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario oficial de la Federación.
- Kim, K. H., Kabir, E., & Jahan, S. A. (2017). Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Science of the total environment*, 575, 525-535.
- Pasini, D. (2013). The Click Reaction as an Efficient Tool for the Construction of Macrocyclic Structures. *Molecules*, 18(8), 9512-9530. <https://doi.org/10.3390/molecules18089512>.
- France SP, Lewis RD, Martinez CA. The Evolving Nature of Biocatalysis in Pharmaceutical Research and Development. *JACS Au.* 2023 feb 27;3(3):715-735. doi:10.1021/jacsau.2c00712. PMID: 37006753; PMCID: PMC10052283.
- Ruck, R. T.; Strotman, N. A.; Krska, S. W. The Catalysis Laboratory at Merck: 20 Years of Catalyzing Innovation. *ACS Catal.* 2023, 13 (1), 475–503, DOI:10.1021/acscatal.2c05159.

- Ruan DY, Wu HX, Meng Q, Xu RH. Development of antibody-drug conjugates in cancer: Overview and prospects. *Cancer Commun (Lond)*. 2024 Jan;44(1):3-22. doi:10.1002/cac2.12517. Epub 2023 Dec 30. PMID: 38159059; PMCID: PMC10794012.
- Agathe Mouren, Luc Avérous. Sustainable cycloaliphatic polyurethanes: from synthesis to applications. *Chemical Society Reviews*, 2022, 52 (1), pp.277-317. ff10.1039/D2CS00509Cff. fffhal-04018708f.
- Yilin Zhang, Hui Sun, Yunteng Cao, Maxwell J. Kalinowski, Meng Li, and Benedetto Marelli. Directed Assembly of Proteinaceous–Polysaccharide Nanofibrils to Fabricate Membranes for Emerging Contaminant Remediation. *ACS Nano* 2024 18 (36), 25205-25215. DOI: 10.1021/acsnano.4c07409.
- Guadarrama, P., López-Méndez, L. J., Cabrera-Quiñones, N. C. y Cruz-Hernández, C. A. (2023, enero-marzo). Versátil como ninguna, la química clic y su trascendencia en áreas diversas: de la ciencia de materiales a la investigación farmacéutica. *Educación Química*, 34 (1). <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.1.84649>.
- Kolb, H. C., Finn, M. G., & Sharpless, K. B. (2001). Click chemistry: Diverse chemical function from a few good reactions. *Angewandte Chemie International Edition*, 40(11), 2004–2021.
- Rostovtsev, V. V., Green, L. G., Fokin, V. V., & Sharpless, K. B. (2002). A stepwise huisgen cycloaddition process: Copper(I)-catalyzed regioselective “ligation” of azides and terminal alkynes. *Angewandte Chemie International Edition*, 41(14), 2596–2599.
- Tornøe, C. W., Sengeløv, H., & Meldal, M. (2002). Peptidotriazoles on solid phase: [1,2,3]-Triazoles by regiospecific copper(I)-catalyzed 1,3-dipolar cycloadditions of terminal alkynes to azides. *Journal of Organic Chemistry*, 67(9), 3057–3064.
- Agard, N. J., Prescher, J. A., & Bertozzi, C. R. (2004). A strain-promoted [3 + 2] azide–alkyne cycloaddition for covalent modification of biomolecules in living systems. *Journal of the American Chemical Society*, 126(46), 15046–15047.
- Laughlin, S. T., Baskin, J. M., Amacher, S. L., & Bertozzi, C. R. (2008). In vivo imaging of membrane associated glycans in developing zebrafish. *Science*, 320(5876), 664–667.
- Hang, H. C., Yu, C., Ten Hagen, K. G., Tian, E., Winans, K. A., Tabak, L. A., & Bertozzi, C. R. (2004). Small molecule inhibitors of mucin-type O-glycosylation from a uridine-based library. *Chemistry & Biology*, 11(7), 1009–1016.T

Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno

04

JUL-DIC 2025

ISSN: EN TRÁMITE

www.revistaestudiosieeg.com

Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno Año 2, No. 4, Julio-Diciembre 2025, es una publicación semestral, editada por la Universidad de Guadalajara, a través del Departamento de Economía y Ciencias Políticas y por la División de Ciencias Económicas, Empresa y Gobierno del Centro Universitario de Tonalá. Domicilio Av. Nuevo Periférico No. 555, Ejido San José Tateposco, C.P. 45425, Tonalá, Jalisco, México; Tel. 3320002300; página web <https://revistaestudiosieeg.com/index.php/eieeg>, correo electrónico reieeg@cutonalaj.udg.mx, Editor responsable: Dr. Julio Santiago Hernández. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2024-062016595700-102, ISSN: en trámite, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de éste número: Departamento de economía y ciencias políticas, con domicilio en Av. Nuevo Periférico No. 555, Ejido San José Tateposco C.P. 45425, Tonalá, Jalisco, México, Dr. Julio Santiago Hernández. Fecha de la última modificación 14 de julio de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad de Guadalajara.



**UNIVERSIDAD DE
GUADALAJARA**
Red Universitaria de Jalisco

