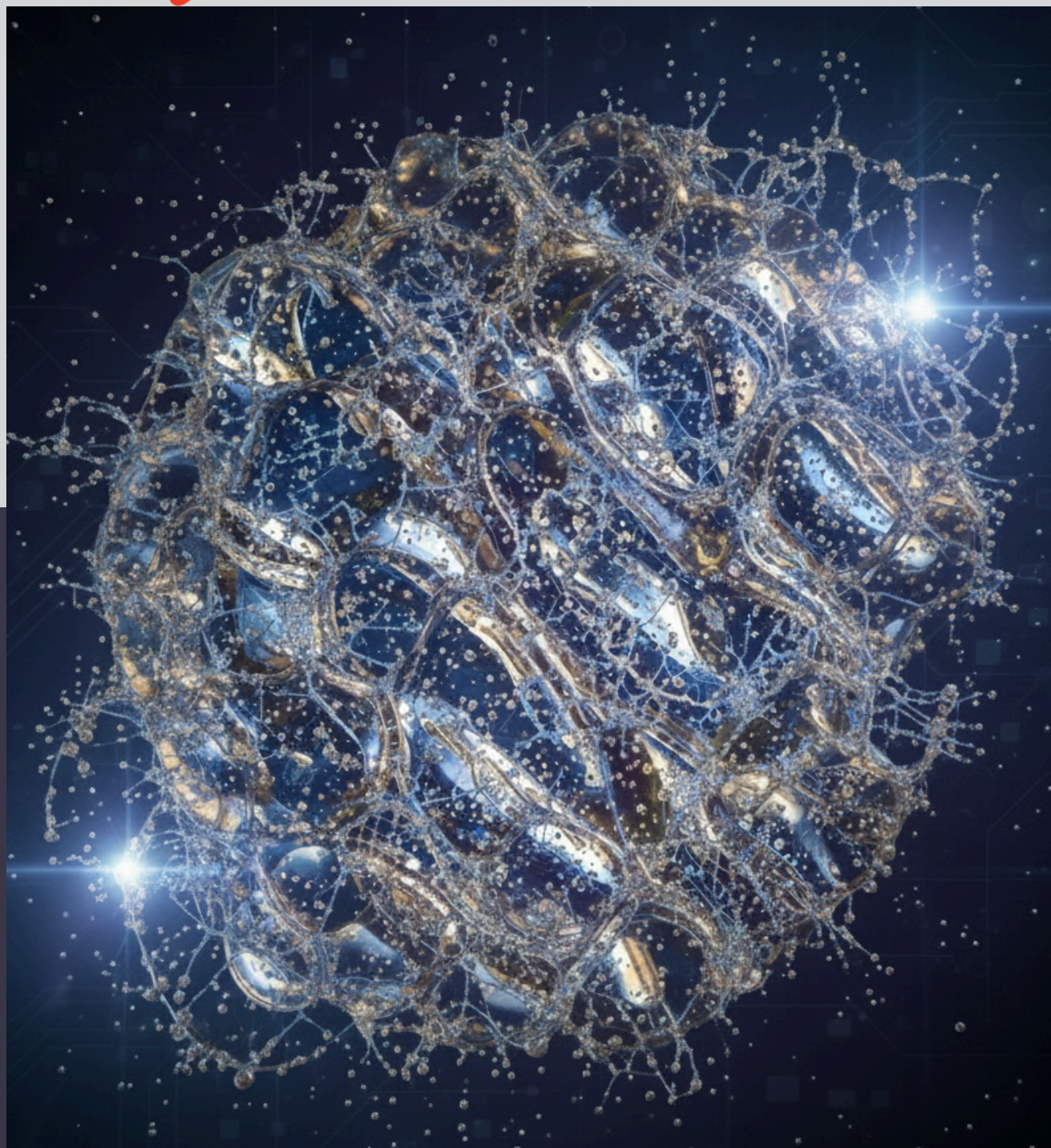




JOCYTEC
Jóvenes en la Ciencia y la Tecnología
Revista de divulgación científica y tecnológica multidisciplinaria



Enero - Diciembre 2025



Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología

No. 02 - Año. 02

ISSN



30617448

Información legal

“JOCYTEC”, Jóvenes en la Ciencia y la Tecnología. Revista de divulgación científica y tecnológica multidisciplinaria, Año 2, número 2, enero-diciembre 2025, es una publicación electrónica semestral sobre investigación y tecnología multidisciplinarias, relacionada con las Ingenierías y Ciencias Básicas, editada por la Universidad Autónoma de Tlaxcala a través de la Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Calzada Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, C.P. 90300, Tel. +52(241)70249, <https://ingenieria.uatx.mx/revistas3.html>, jocytec.editor@uatx.mx, Editor responsable, Dra. Shirley Carro Sánchez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-061312031700-102, ISSN: 3061-7448, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Calzada Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, C.P. 90300, México. Tel.+52(241)70249, Dra. Shirley Carro Sánchez. Fecha de última modificación, 31 de diciembre de 2025.

La responsabilidad de los textos publicados en la revista JOCYTEC recae exclusivamente en los autores y su contenido no refleja necesariamente el criterio de la Institución. Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.

**Revista:
JOCYTEC**

**Volumen 2, No. 2
2025, México**

ALCANCE

Revista “JOCYTEC, jóvenes en la ciencia y la tecnología. Revista de divulgación científica y tecnológica multidisciplinaria” es una publicación semestral (Enero-Junio y Julio-Diciembre) de acceso abierto sobre investigación y tecnología multidisciplinarias, relacionada con las Ingenierías y Ciencias Básicas. El objetivo de la revista es ofrecer un espacio en el que se presenten investigaciones científicas y/o tecnológicas llevadas a cabo por estudiantes de licenciatura en conjunto con profesionistas, con el fin de promover el desarrollo científico y tecnológico del país. Se publican revisiones, artículos de investigación original, reportes de investigación corta o de desarrollo tecnológico, en todas las áreas de la Ingeniería. Los artículos pueden ser escritos ya sea en español o en inglés, con título, resumen y palabras clave en ambos idiomas y deberán ser inéditos y no está postulados simultáneamente en otras revistas u órganos editoriales

**Revista:
JOCYTEC**

**Volumen 2, No. 2
2025, México**

JOCYTEC
Año 2, No. 2
Julio-Diciembre 2025
CONTENIDO

UN VISTAZO A LOS MATERIALES NANOCOMPUESTOS

A LOOK AT NANOCOMPOSITE MATERIALS 1

Yolanda Torres-Salcedo, Enrique González-Vergara, Teresa Zayas-Pérez, Guillermo Soriano-Moro, Brenda Leonor Sánchez-Gaytán.

TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA QUÍMICA DE LA PRODUCCIÓN DE AMONÍACO. 13

ENERGY TRANSITION IN THE CHEMICAL INDUSTRY OF AMMONIA PRODUCTION.

Lorena Elizabeth Ruiz-Marin, Ángel Castro-Agüero, Enedina Flores Tlilayatzí, Jhonatan Mendez Valencia

PROTEÍNAS INACTIVADORAS DE RIBOSOMAS (RIPS): DE AGENTES TÓXICOS A POSIBLES TERAPIAS ONCOLÓGICAS. 24

RIBOSOME INACTIVATING PROTEINS (RIPS): FROM TOXIC AGENTS TO POTENTIAL CANCER THERAPIES.

Enedina Flores-Tlilayatzí, Lidia Patricia Jaramillo-Quintero, Shirley Carro-Sánchez, Dulce Yolotzin Medina-Velázquez, Lorena Elizabeth Ruiz-Marín

PROPUESTA DE MÓDULO DIDÁCTICO PARA CURSOS BÁSICOS DE ELECTRICIDAD USANDO IMPRESIÓN 3D 39

PROPOSAL FOR A DIDACTIC MODULE FOR BASIC ELECTRICAL COURSES USING 3D PRINTING.

Emmanuel López-Muñoz, Brian Manuel González-Contreras

SÍNTESIS DE HIDROGELES DE ACRILAMIDA - MUCILAGO DE NOPAL MEDIANTE POLIMERIZACIÓN POR RADICALES LIBRES. 49

SYNTHESIS OF ACRYLAMIDE - NOPAL MUCILAGE HYDROGELS FROM THE FREE-RADICAL POLYMERIZATION

Verónica Romero-Montiel, Shirley Carro-Sánchez, Alejandro Rodríguez-Juárez, María Ariadna Ramírez-Martínez¹

Revista:
JOCYTEC

Volumen 2, No. 2
2025, México

UN VISTAZO A LOS MATERIALES NANOCOMPUESTOS

A LOOK AT NANOCOMPOSITE MATERIALS

Yolanda Torres-Salcedo, Enrique González-Vergara, Teresa Zayas-Pérez, Guillermo Soriano-Moro*,
Brenda Leonor Sánchez-Gaytán*

Centro de Química, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 18 sur, Ciudad Universitaria, San Manuel, Puebla, 72570
jesus.soriano@correo.buap.mx; brendale.sanchez@correo.buap.mx

Recibido: 08-Julio-2025

Aceptado: 06-Agosto-2025

RESUMEN

Los materiales nanocompuestos son importantes en la sociedad actual pues exhiben propiedades mejoradas y versátiles respecto a sus constituyentes. Estos materiales combinan dos o más componentes en donde al menos uno de estos tiene la escala nanométrica en una o más de sus dimensiones y se encuentra disperso, por lo tanto, es conocido como relleno. La combinación resulta en características que no se encuentran en los componentes por separado y esto afecta algunas propiedades como lo son la resistencia mecánica, conductividad eléctrica, reactividad y estabilidad térmica, entre otras. Los nanocompuestos son clasificados en función de su matriz y son separados en tres grupos; cerámicos, metálicos, y poliméricos y al ser tan adaptables, sus aplicaciones impactan de forma significativa amplios sectores. A pesar de su gran potencial, estos materiales aún enfrentan desafíos que mejorar. Las proyecciones futuras apuntan al desarrollo de nuevos nanomateriales mediante nuevas técnicas de síntesis y estrategias de funcionalización para mejorar su biocompatibilidad y competencias con el fin minimizar impactos negativos. En el ámbito académico, en el centro de química del ICUAP-BUAP se trabaja en el desarrollo de nanocompuestos poliméricos con propiedades conductoras, antimicrobianas y no citotóxicas, abriendo nuevas posibilidades para la electrónica flexible y aplicaciones médicas.

Palabras Clave: nanocompuestos, nanorellenos, propiedades funcionales, estrategias de diseño

ABSTRACT

Nanocomposite materials are important in today's society because they exhibit enhanced and versatile properties compared to their constituents. These materials combine two or more components, at least one of which is at the nanoscale in one or more of its dimensions and is dispersed; therefore, they are known as fillers. The combination results in characteristics not found in the individual components, affecting some properties such as mechanical strength, conductivity, reactivity, and thermal stability, among others. Nanocomposites are classified based on their matrix and are separated into three groups: ceramic, metallic, and polymeric. Because they are highly adaptable, their applications significantly impact broad sectors. Despite their great potential, these materials still face challenges that need to be addressed. Future projections point to the

development of new nanomaterials through new synthesis techniques and functionalization strategies to improve their biocompatibility and minimize negative impacts. In the academic field, the ICUAP-BUAP Chemistry Center is working on the development of polymeric nanocomposites with conductive, antimicrobial, and non-cytotoxic properties, opening up new possibilities for flexible electronics and medical applications.

Keywords: Nanocomposites, nanofillers, functional properties, design strategies

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el progreso de la humanidad ha estado ligado a la creación y transformación de materiales con el fin de cubrir necesidades (Callister y Rethwisch, 2018). En este contexto, surgieron los materiales compuestos, los cuales resultan de la unión de dos o más componentes distintos, generando un nuevo material con propiedades fisicoquímicas mejoradas respecto a las de cada constituyente (Chinta, 2017) y a su vez exhiben una mejor relación coste beneficio (Ibraheem y Bandyopadhyay, 2017). Es posible decir que los materiales compuestos se utilizan prácticamente desde hace siglos, como por ejemplo el hormigón usado mayormente en construcción (Reduwan Billah, 2019) y que está constituido por cemento, agua, arena y grava, o el acero, usado en estructuras y compuesto principalmente de hierro y carbono (Smallman y Ngan, 2014) y que sustituye aplicaciones que requieren alta resistencia.

Además de los compuestos tradicionales y debido a la creciente popularidad de la nanotecnología, se han desarrollado nanocompuestos. El término "nanocompuesto" es relativamente nuevo pues se acuñó durante un periodo entre 1982-1983 por Roy, Komarneni y colegas (Yosri y col., 2024) pero es necesario definir un nanocompuesto y el requisito primordial para ser clasificado de esta manera es que al menos uno de sus componentes tenga al menos una dimensión en *tamaño nano*, es decir, en una escala de entre 1 y 100 nm (Iordache y col., 2016; Pirsá y col., 2022) donde la fase nanométrica está embebida en una matriz la cual puede ser de algún polímero, metal o un material cerámico (Reduwan Billah, 2019) esta fase también suele ser denominada "relleno".

Los nanocompuestos se han convertido en una de las opciones más relevantes en diversos sectores de alta tecnología y son considerados como materiales del siglo XXI por sus diversas prestaciones con posibilidades de diseño únicas y combinaciones de propiedades excepcionales (Abid y col., 2022) ya que aprovechan fenómenos fisicoquímicos exclusivos de la escala nanométrica. Esta característica les permite resultar en propiedades superiores a las de los rellenos convencionales, las cuales pueden ser aprovechadas en diferentes aplicaciones, por ejemplo, son utilizados como membranas, sensores, dispositivos de almacenamiento de energía, en la óptica, usos automotrices, retardantes de llama, entre otras muchas (Ates y col., 2020).

Los nanocompuestos pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos o una mezcla, esto usualmente propicia nuevas y mejores propiedades las cuales se denominan sinérgicas, pues su efecto es superior a la suma de los efectos individuales (Komarneni, 2005).

Si se habla de las propiedades de este tipo de compuestos, es posible resaltar sus propiedades químicas, ópticas, alta resistencia mecánica, alta conductividad eléctrica, reactividad redox, actividad catalítica y sus propiedades multifuncionales como una alta relación superficie-volumen para la carga de biomoléculas como enzimas (Nambiar y col., 2024; Omanović-Mikličanin y col., 2020).

En la mayoría de los casos, los nanocompuestos son obtenidos mediante la combinación de diferentes componentes a través de reacciones químicas o interacciones físicas (Komarneni, 2005), donde serán de vital importancia ya que determinan las estructuras y propiedades deseadas en el nanocompuesto (Lu y col., 2021; Weber y col., 2024).

2. RELLENOS NANOMÉTRICOS

Los rellenos o nanoestructuras empleados en los materiales nanocompuestos son seleccionados por contar con tres características que les otorgan ventajas. Primero, a escala nanométrica, estos rellenos exhiben propiedades distintas a las del mismo material en estado en masa, como sus características catalíticas, eléctricas, ópticas, etc. Segundo, su reducido tamaño implica la presencia de defectos pequeños ya que estos ejercen una influencia considerable sobre sus propiedades y su comportamiento funcional (Folorunso y col., 2024; Viswanathan y col., 2006). Finalmente, su gran relación superficie/volumen favorece una mayor interacción en la zona de unión entre la matriz y las nanoestructuras, lo que da lugar a un volumen considerable de material con propiedades diferenciadas respecto a la matriz en estado de granel (Schadler y col., 2007). Esto les confiere a los nanocompuestos un desempeño sobresaliente y versatilidad funcional que les otorga ventajas frente a otros materiales pues son capaces de mejorar múltiples propiedades simultáneamente y adaptarse a necesidades específicas con cargas de relleno más bajas (Guchait y col., 2022).

Existen varias maneras de clasificar los rellenos nanométricos, y estas pueden cambiar dependiendo del enfoque que se utilice. Sin embargo, una de las clasificaciones más comunes se basa en las dimensiones nanométricas que presentan, como se ilustra en la Figura 1. Aquellos que poseen solo una dimensión nanométrica incluyen a las nano plaquetas u hojas, dos dimensiones nanométricas engloban a las nano fibras o nano tubos y tres dimensiones nanométricas corresponden a las nano partículas (Sundarram y col., 2015).

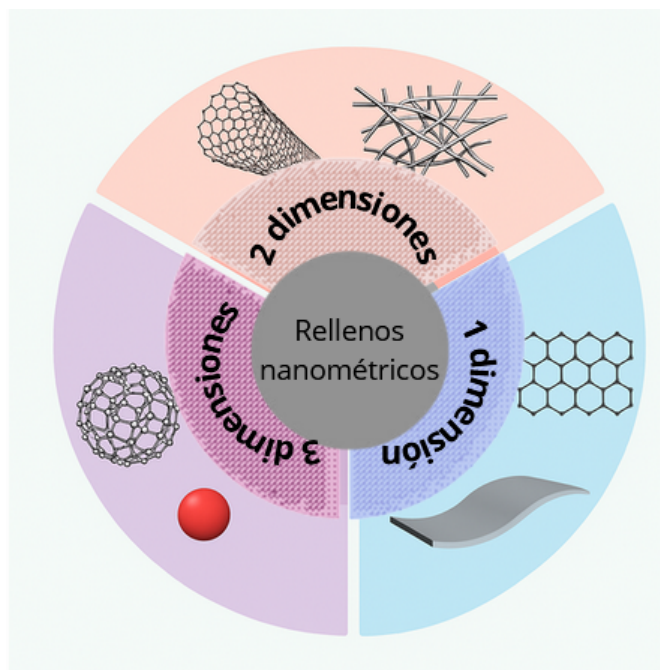


Figura 1. Clasificación de los nanorrellenos según sus dimensiones nanométricas

Una clasificación por considerar es aquella que divide los rellenos en orgánicos e inorgánicos. Los rellenos orgánicos son aquellos que provienen de fuentes naturales como plantas, animales y residuos (Jagadeesh y col., 2021). Así mismo, los inorgánicos derivan de fuentes meramente inorgánicas o de lo que tradicionalmente se considera orgánicas.

Una vez considerados estos criterios y debido a la variedad de clasificaciones, los nanorrellenos pueden organizarse en cuatro grupos representativos: materiales orgánicos, inorgánicos y nanoestructuras de carbono y arcillas (Yadav y col., 2024), aunque estas últimas dos, en algunos casos, también suelen estar clasificados dentro de los inorgánicos debido a que no contienen enlaces carbono-hidrógeno.

Los nano rellenos derivados del carbono como nanotubos, el grafeno, los fulerenos y el negro carbón “carbon black” sobresalen en el ámbito de los conductores y semiconductores debido a sus excelentes propiedades eléctricas y mecánicas, su amplia disponibilidad, peso ligero y sus bajos costos (Kuang y col., 2023), estas características los hacen prospectos ideales en aplicaciones energéticas y ambientales (Lyu y col., 2017).

En otra categorización están englobadas las nanoarcillas que son nanopartículas minerales que incluyen dentro de su estructura silicio y tienen una alta estabilidad térmica y resistencia química (Fernandes y col., 2016). Las nanoarcillas destacan pues son capaces de modificar la microestructura de la matriz mejorando las propiedades físicas del nanocompuesto (Depan y col., 2021). Son prometedoras ya que se obtienen fácilmente pues generalmente son encontradas de manera natural, son económicas y son fáciles de usar (Na y col., 2024). Algunos ejemplos incluyen a la montmorillonita, la saponita, la bentonita, la mica y la hectorita.

Las nanoestructuras inorgánicas tienen propiedades únicas tales como las mecánicas, magnéticas, eléctricas, catalíticas y ópticas (Basavegowda y Baek, 2021) e incluyen metales puros tales como oro, plata y platino, paladio, hierro y óxidos metálicos como CuO, ZnO, y TiO₂ (Sothornvit, 2019). En estas destacan las nanopartículas metálicas pues son nanoestructuras consideradas como modulables debido a que es fácil controlar la forma, tamaño, estructura, ensamblaje y propiedades ópticas (Thakur y col., 2021) y han ganado mucha atención gracias a sus propiedades ópticas, grandes energías de superficie, excitación plasmónica y confinamiento cuántico (M. Sharma, 2018). Otro ejemplo común son los puntos cuánticos “Quantum dots” y son nanocristales semiconductores de 1–10 nm que presentan fluorescencia cuya intensidad y color varía en función de su tamaño. Están compuestos por metales como Ag, Cd, Hg, Ln, P, Pb, Se, Te, Zn. Además de su alta fotoluminiscencia, se destacan por su resistencia al fotoblanqueo, es decir, la resistencia a la destrucción de las moléculas presentes responsables de su fluorescencia y su capacidad para emitir múltiples colores simultáneamente. Estas propiedades los hacen útiles en bioimagen, electrónica y fotónica (Kesrevani y Sharma, 2016).

Por último, están los rellenos nanométricos orgánicos, estos como ya se había mencionado, comprenden aquellos derivados de fuentes naturales, como plantas, animales o residuos agrícolas. Estos nanorrellenos se están investigando ampliamente por su biocompatibilidad, sostenibilidad y bajo impacto ambiental, tomando aplicaciones en el ámbito médico, particularmente en la cicatrización de heridas y en sistemas de liberación controlada de fármacos, algunos ejemplos son las fibras de hidroxipropilcelulosa y quitosano (Ahmed y Ali, 2020) o los nanocristales de celulosa (Ghosh y col., 2024).

3. TIPOS DE MATERIALES NANOCOMPUESTOS

Para comprender mejor la diversidad y funcionalidad de los materiales nanocompuestos, resulta útil explorar los distintos tipos existentes según la naturaleza de su matriz ya que esta actúa como fase continua y determina en gran medida las propiedades del material. (Malik y col., 2020). La Figura 2 ilustra las principales estructuras de nanocompuestos metálicos, cerámicos y poliméricos.

Como se ha mencionado, uno de los grupos más estudiados corresponde a los nanocompuestos con matriz cerámica (CMNC), los cuales los cuales pueden estructurarse de tres maneras, la primera es un nanorrelleno cerámica dentro de una matriz cerámica, también es posible un nanorelleno de carbono en una matriz cerámica, asimismo, toma en cuenta la inclusión de un metal como segundo componente en dicha matriz (Liu y Webster, 2016). Estos materiales fueron creados para resolver las limitaciones de los cerámicos tradicionales los cuales son propensos a fracturarse bajo cargas mecánicas o termomecánicas intensas debido a grietas originadas por diminutos defectos o rayones (Behera y col., 2020) por ello, los nanocompuestos cerámicos representan una alternativa pues la inclusión de nanorellenos refuerza la matriz y contribuye a bloquear la propagación de grietas haciéndolo más resistente. La matriz de estos materiales puede ser clasificada como óxidos cerámicos que incluyen al óxido de aluminio (Al₂O₃), dióxido de silicio (SiO₂), dióxido de circonio (ZrO₂) y como no óxidos cerámicos donde resaltan el carburo de silicio (SiC) y el nitruro de silicio (Si₃N₄) (N. Sharma y col., 2022). Para la producción de diversos nanocompuestos cerámicos se emplean distintas técnicas de síntesis, como la reacción en estado sólido, el método Pechini

modificado, la molienda con bolas planetarias, el método sol-gel, la deposición electroforética, entre otras (Samantaray y col., 2024). Las aplicaciones de los nanocompuestos cerámicos son bastas que abarcan desde aplicaciones biomédicas (Garmendia y col., 2013), de almacenamiento de energía, aeroespaciales, automotrices, de construcción e infraestructura, entre muchas otras (Ahmad y col., 2014).

Otro tipo de nanocompuestos son aquellos con matriz metálica o MMNC, los cuales son clasificados como aquellos materiales o estructuras avanzadas en las cuales se combina un material ligero, es decir un metal o una aleación con un relleno nanométrico el cual, le brinda una mayor resistencia (Ghahremani y col., 2022). Desde el año 2000, el interés por emplear agentes de refuerzo a escala nanométrica en metales como Al, Mg, Ti, Ni y Cu ha crecido significativamente (Malaki, 2021) ya que ofrecen una combinación de propiedades atractivas como ductilidad, alta resistencia y rigidez, alta conductividad térmica y resistencia a la fluencia (Sarode y col., 2023). Los métodos de síntesis para esta clase de nanocompuestos son diversos e incluyen la fundición por agitación, deposición de material fundido desintegrado (DMD), fundición semisólida (SSC), metalurgia de polvos (PM), procesamiento por fricción y agitación (FSP) y la unión por rodillos acumulativos (Malaki y col., 2019).

Los materiales nanocompuestos con matriz metálica han atraído una gran atención en las industrias aeroespacial, automotriz, biomédica, electrónica y tecnológica debido a su gran potencial para aplicaciones generalizadas. Las inusuales y mejoradas propiedades mecánicas, físicas y químicas de estos, abren nuevas oportunidades para dispositivos y productos de alto rendimiento en diversas industrias (Cao y col., 2024).

Por último, pero no menos relevantes, se encuentran los nanocompuestos poliméricos que comprenden a aquellos compuestos que contienen típicamente, aunque no siempre, estructuras nanométricas inorgánicas dispersas en diferentes matrices poliméricas orgánicas con el objetivo de mejorar o modular sus propiedades (Khan y col., 2022). Estos materiales ofrecen una alternativa innovadora para reemplazar los polímeros convencionales ya que presentan propiedades mecánicas mejoradas, conductividad eléctrica y térmica, resistencia a la llama, capacidad de autocuración y alta resistencia a la corrosión en comparación del polímero original (Tran y col., 2025).

Existen dos métodos principales de síntesis. En el método ex- situ, los rellenos se encapsulan físicamente dentro de la estructura polimérica, proceso que proporciona estabilidad a la fase nanométrica, lo que reduce su tendencia a agregarse ((Hussain y Thomas, 2021) y la metodología in-situ que utiliza un precursor del relleno nanométrico en un solvente inerte no reactivo junto con monómeros. Los precursores experimentan ciertas reacciones que inician la formación de la nanopartícula antes o durante el proceso de polimerización (Adnan y col., 2018).

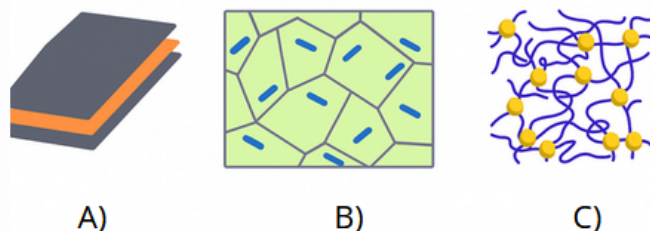


Figura 2. Representación de distintos tipos de nanocompuestos: A) metálico reforzado con láminas, B) cerámico y C) polimérico.

Este tipo de materiales son los que cuentan con mayor variedad de aplicaciones en el campo *nano* e incluyen distintos campos, como la producción de equipos médicos, tratamientos contra el cáncer, materiales para prótesis, dispositivos militares y electromecánicos, así como en la industria automotriz, el embalaje, la generación de energía, la seguridad y el transporte. También se utilizan en el blindaje electromagnético, sistemas de defensa, sensores, catálisis y en la industria de la información, entre otros sectores (Gobena y Woldeyannes, 2024).

Frente al vasto panorama de aplicaciones, los nanocompuestos poliméricos sobresalen como una de las áreas de alto interés en la investigación, en particular, investigadores adscritos a los cuerpos académicos de Investigación experimental- computacional de nuevos materiales y sistemas biomoleculares y química ambiental pertenecientes al ICUAP-BUAP, han reunido esfuerzos en desarrollar materiales nanocompuestos derivados de acrilamida rellenos de nanopartículas metálicas utilizando el método de fotopolimerización y síntesis in situ, en donde las materias primas se mezclan en solución y se exponen a luz ultravioleta dando como resultado materiales nanocompuestos que se forman de forma simultánea. Las aplicaciones de los materiales obtenidos se proyectan en áreas como la electrónica flexible y médicas, pues, ha sido posible observar que presentan una respuesta a la corriente eléctrica y que reaccionan a estímulos externos como la flexión y elongación cambiando su resistencia, así mismo, se ha podido verificar que son citocompatibles y presentan actividad antimicrobiana. En la Figura 3 se presentan algunos hidrogeles rellenos de nanopartículas de oro con distintas concentraciones de estas obtenidos durante el trabajo experimental dentro de los laboratorios de la institución.

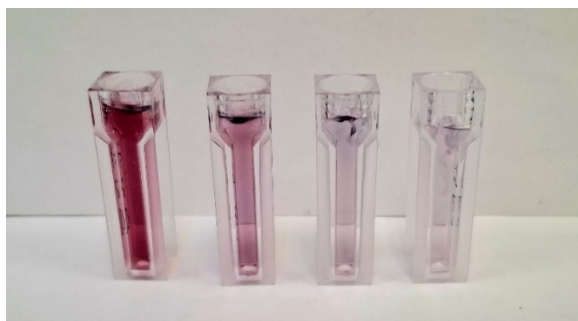


Figura 3. Hidrogeles rellenos de oro obtenidos mediante técnicas desarrolladas en la BUAP

4. RETOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesar de que estos materiales están en constante desarrollo por sus características y aplicaciones, también enfrentan algunos desafíos. Uno de los retos a superar es la mala dispersión de nanopartículas ya que la agregación de nanopartículas en la matriz limita su efectividad, por lo tanto, se requieren técnicas de funcionalización para mejorar la compatibilidad con la fase nanométrica (Tariq I., 2020), es crucial es mejorar su estabilidad coloidal y tener en cuenta su toxicidad con el fin de reducirla para que sea útil en aplicaciones biomédicas (Shi y col., 2025). También se puede considerar que la fabricación de algunos nanocompuestos a gran escala sigue siendo costosa y compleja por lo tanto los métodos de síntesis actuales aún deben optimizarse para su escalabilidad y viabilidad económica (Samantaray y col., 2024)

Un desafío que vale la pena mencionar es el que surge en la aplicación de las membranas nanocompuestas ya que en ellas se suele dar el fenómeno de lixiviación en donde los nanorrellenos se desprenden afectando la durabilidad del material y generando riesgos tóxicos para el medio ambiente y la salud. También enfrentan el ensuciamiento de la superficie, que disminuye la permeabilidad y eficiencia (Omar y col., 2024).

Igualmente es importante superar la mala dispersión de nanopartículas ya que la agregación de nanopartículas en la matriz limita su efectividad, por lo tanto, se requieren técnicas de funcionalización para mejorar la compatibilidad con la fase nanométrica (Tariq y col., 2020), es crucial es mejorar su estabilidad coloidal y tener en cuenta su toxicidad con el fin de reducirla para que sea útil en aplicaciones biomédicas (Shi y col., 2025). También se puede considerar que la fabricación de algunos nanocompuestos a gran escala sigue siendo costosa y compleja por lo tanto los métodos de síntesis actuales aún deben optimizarse para su escalabilidad y viabilidad económica (Samantaray y col., 2024)

Es necesario proponer perspectivas futuras que estén dirigidas hacia la funcionalización de nanopartículas con el fin de mejorar su compatibilidad, así mismo, es importante plantear nuevas técnicas de síntesis orientadas a la investigación para seguir innovando en el área de materiales para lograr ser capaces de desarrollar materiales compuestos que presenten alto potencial para resolver menesteres emergentes en distintas aplicaciones.

5. CONCLUSIONES

Los materiales nanocompuestos son un área de investigación prometedora debido a las oportunidades de innovación en diferentes aplicaciones e industrias. Las propiedades consideradas sinérgicas y únicas presentes en estos materiales comparadas con el material en bloque tradicional, son la razón por la cual se proponen de manera entusiasta como un medio prometedor para solucionar y satisfacer menesteres emergentes que van en aumento en algunas áreas. A medida que se vayan superando los retos relacionados con su producción e impacto ambiental, es probable que sean consideradas cada vez más en diversas, y diferentes industrias, impulsando avances tecnológicos y científicos revolucionando procesos y competencias. Por ello es relevante mencionar los esfuerzos que se han realizado en diversas instituciones nacionales incluyendo al Centro de Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla pues dedica esfuerzos a la investigación, síntesis, caracterización y aplicaciones posibles de estos materiales, que contribuye

al conocimiento del área consolidando a la BUAP como un actor activo en el panorama científico internacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado a través del proyecto VIEP-2025 (ID 00364), así como a la SECIHTI por la beca de maestría otorgada a Y.T.-S.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses al elaborar y publicar este artículo de difusión.

REFERENCIAS

Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M., Haider, J., Khan, M., Khan, Q., y Maqbool, M. (2022). Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 300, 102597, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102597>

Adnan, M. M., Dalod, A. R. M., Balci, M. H., Glaum, J., y Einarsrud, M. A. (2018). In situ synthesis of hybrid inorganic-polymer nanocomposites. *Polymers* 10(10), 1129, <https://doi.org/10.3390/polym10101129>

Ahmad, I., Yazdani, B., y Zhu, Y. (2014). Recent advances on carbon nanotubes and graphene reinforced ceramics nanocomposites. *Nanomaterials* 5(1), 90–114, <https://doi.org/10.3390/nano5010090>

Ahmed, S., y Ali, W. (2020). *Advanced Structured Materials Green Nanomaterials Processing, Properties, and Applications*. Esslingen, Alemania. Springer.

Ates, B., Koytepe, S., Ulu, A., Gurses, C., y Thakur, V. K. (2020). Chemistry, structures, and advanced applications of nanocomposites from biorenewable resources. *Chemical Reviews*. 120(17), 9304–9362 <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00553>

Basavegowda, N., y Baek, K. H. (2021). Advances in functional biopolymer-based nanocomposites for active food packaging applications. *Polymers*. 13(23), 1498, <https://doi.org/10.3390/polym13234198>

Behera, A., Swain, B., y Sahoo, D. K. (2020). *Fiber-Reinforced Nanocomposites: Fundamentals and Applications*. Amsterdam, Países Bajos, Elsevier.

Callister, W. D., y Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering an Introduction*. Hoboken, NJ, Estados Unidos de America, Wiley.

Cao, C., Killips, A., y Li, X. (2024). Advances in the Science and Engineering of Metal Matrix Nanocomposites: A Review, *Advanced Engineering Materials*. 26(20), 2400217, <https://doi.org/10.1002/adem.202400217>

Chinta, J. P. (2017). Coinage metal nanoparticles based colorimetric assays for natural amino acids: A review of recent developments. *Sensors and Actuators, B: Chemical*. 248(9), 733–752, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.028>

Depan, D., Chirdon, y Khattab, A. (2021). Morphological and chemical analysis of low-density polyethylene crystallized on carbon and clay nanofillers. *Polymers*, 13(10)1558, <https://doi.org/10.3390/polym13101558>

Folorunso, O., Hamam, Y., Sadiku, R., y Kupolati, W. (2024). Effects of Defects on the Properties of Polymer Nanocomposites: A Brief Review. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 34(7), 5667–5690 <https://doi.org/10.1007/s10904-024-03179-0>

Garmendia, N., Olalde, B., y Obieta, I. (2013). *Ceramic Nanocomposites*. Cambridge, Reino Unido. Elsevier.

Ghahremani, A., Abdullah, A., y Fallahi Arezoodar, A. (2022). Wear behavior of metal matrix nanocomposites. *Ceramics International*. 48(24), 35947–35965, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.273>

Ghosh, T., Roy, S., Khan, A., Mondal, K., Ezati, P., y Rhim, J. W. (2024). Agricultural waste-derived cellulose nanocrystals for sustainable active food packaging applications. *Food Hydrocolloids*. 154(9), 110141 <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110141>

Gobena, S. T., y Woldeyannes, A. D. (2024). A review of synthesis methods, and characterization techniques of polymer nanocomposites for diverse applications. *Discover Materials*. 4(52), <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00119-0>

Guchait, A., Saxena, A., Chattopadhyay, S., y Mondal, T. (2022). Influence of Nanofillers on Adhesion Properties of Polymeric Composites. En *ACS Omega*. 7(5), 3844–3859, <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05448>

Hussain, C. M., y Thomas, S. (2021). *Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology*. Cham, Suiza. Springer

Ibraheem, S., y Bandyopadhyay, S. (2017). *Hybrid Polymer Composite Materials: Structure and Chemistry* Duxford, Reino Unido. Elsevier.

Iordache, F., Gheorghe, I., Lazar, V., Curutiu, C., Ditu, L. M., Grumezescu, A. M., y Holban, A. M. (2016). *Food Preservation*. San Diego, CA, Estados Unidos de América. Elsevier.

Jagadeesh, P., Puttegowda, M., Mavinkere Rangappa, S., & Siengchin, S. (2021). Influence of nanofillers on biodegradable composites: A comprehensive review. *Polymer Composites*. 42(11), 5691–5711, <https://doi.org/10.1002/pc.26291>

Kesrevani, R. K., y Sharma, A. K. (2016). *Nanoarchitectonics for Smart Delivery and Drug Targeting*. Oxford, Reino Unido. Elsevier.

Khan, I., Khan, I., Saeed, K., Ali, N., Zada, N., Khan, A., Ali, F., Bilal, M., y Akhter, M. S. (2022). *Smart Polymer Nanocomposites: Design, Synthesis, Functionalization, Properties, and Applications*. Amsterdam, Países Bajos. Elsevier.

Komarneni, S. (2005). *Chemical Processing of Ceramics*. Boca Ratón, Florida Estados Unidos de América. CRC Press.

Kuang, T., Zhang, M., Chen, F., Fei, Y., Yang, J., Zhong, M., Wu, B., y Liu, T. (2023). Creating poly(lactic acid)/carbon nanotubes/carbon black nanocomposites with high electrical conductivity and good mechanical properties by constructing a segregated double network with a low content of hybrid nanofiller. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 6(1), 48, <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00622-z>

Liu, W., & Webster, T. J. (2016). *Nanocomposites for Musculoskeletal Tissue Regeneration*. Duxford, Reino Unido. Elsevier.

Lu, X., Deng, W., Wei, J., Zhu, Y., Ren, P., Wan, Y., Yan, F., Jin, L., Zhang, L., & Cheng, Z. Y. (2021). Filler size effects on the microstructure and properties of polymer-ceramic nanocomposites using a semicrystalline matrix. *Journal of Materials Science*, 56(104844), 19983–19995, <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06555-0>

Lyu, H., Gao, B., He, F., Ding, C., Tang, J., & Crittenden, J. C. (2017). Ball-Milled Carbon Nanomaterials for Energy and Environmental Applications. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 5(11), 9568–9585, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02170>

Malaki, M. (2021). *Encyclopedia of Materials: Composites*. Dublin, Irlanda. Elsevier.

Malaki, M., Xu, W., Kasar, A. K., Menezes, P. L., Dieringa, H., Varma, R. S., y Gupta, M. (2019). Advanced metal matrix nanocomposites. *Metals*, 9(3), 330, <https://doi.org/10.3390/met9030330>

Malik, R., Tomer, V. K., & Chaudhary, V. (2020). *Metal Oxide Nanocomposites: Synthesis and Applications*. Beverly, Massachusetts, Estados Unidos de America. Wiley.

Na, C., Kwac, L. K., Kim, H. G., y Chang, J. H. (2024). Effect of organoclay on the physical properties of colorless and transparent copoly(amide imide) nanocomposites. *RSC Advances*, 14(13), 9062–9071, <https://doi.org/10.1039/d3ra08605d>

Nambiar, R. B., Perumal, A. B., y Sadiku, E. R. (2024). Advances in Nanocomposites: Preparation, Characterization, Properties, and Applications. *Molecules*, 29(24), 5924, <https://doi.org/10.3390/molecules29245924>

Omanović-Miklićanin, E., Badnjević, A., Kazlagić, A., y Hajlovac, M. (2020). Nanocomposites: a brief review. *Health and Technology*, 10(6), 51–59, <https://doi.org/10.1007/s12553-019-00380-x>

Omar, N. M. A., Othman, M. H. D., Tai, Z. S., Rabuni, M. F., Amhamed, A. O. A., Puteh, M. H., Jaafar, J., Rahman, M. A., y Kurniawan, T. A. (2024). Overcoming challenges in water purification by nanocomposite ceramic membranes: A review of limitations and technical solutions. *Journal of Water Process Engineering*, 57(1), 104613, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104613>

Pirsa, S., Sani, I. K., y Mirtalebi, S. S. (2022). Nano-biocomposite based color sensors: Investigation of structure, function, and applications in intelligent food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*. 31(3), 100789, <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100789>

Reduwan Billah, S. M. (2019). *Functional Polymers*, Cham, Suiza. Springer.

Samantaray, S., Mallick, P., Hung, I. M., Moniruzzaman, M., Satpathy, S. K., y Mohanty, D. (2024). Ceramic-ceramic nanocomposite materials for energy storage applications: A review. *Journal of Energy Storage*. 99(A), 113330, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113330>

Sarode, P. U., Raul, J. G., Gaikwad, A. S., y Gawande, S. (2023). Metal Matrix Nanocomposites: A Brief Overview. *Nanoscience & Nanotechnology-Asia*, 13(2), 24-42, <https://doi.org/10.2174/2210681213666230301152349>

Schadler, L. S., Brinson, L. C., y Sawyer, W. G. (2007). Polymer nanocomposites: A small part of the story. *JOM*. 59(5), 53–60, <https://doi.org/10.1007/s11837-007-0040-5>

Sharma, M. (2018). Applications of Targeted Nano Drugs and Delivery Systems: Nanoscience and Nanotechnology in Drug Delivery. Amsterdam, Países bajos. Elsevier.

Sharma, N., Saxena, T., Alam, S. N., Ray, B. C., Biswas, K., y Jha, S. K. (2022). Ceramic-based nanocomposites: A perspective from carbonaceous nanofillers. *Materials Today Communications*. 31(6), 103764, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103764>

Shi, K., Nokhodchi, A., y Ghafourian, T. (2025). Magnetic microscale polymeric nanocomposites in drug delivery: advances and challenges. *Drug Discovery Today*. 30(1), 104276, <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2024.104276>

Smallman, R. E., y Ngan, A. H. W. (2014). Modern Physical Metallurgy. Oxford, Reino Unido. Elsevier.

Sothornvit, R. (2019). Nanostructured materials for food packaging systems: new functional properties. *Current Opinion in Food Science*. 25(2), 82–87, <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.03.001>

Sundarram, S., Kim, Y. H., y Li, W. (2015). En Manufacturing of Nanocomposites with Engineering Plastics. Cambridge, Reino Unido. Elsevier.

Tariq, A., Rehan, Z. A., Akram, S., Rashid, A., y Nawab, Y. (2020). Nanocomposite Membranes for Water and Gas Separation. Amsterdam, Países Bajos. Elsevier.

Thakur, M., Sharma, A., Chandel, M., y Pathania, D. (2021). Green Functionalized Nanomaterials for Environmental Applications. Amsterdam, Países Bajos. Elsevier.

Tran, L. C., Su, X., Nguyen, H., La, L. B. T., Adu, P., Jia, Q., Lee, I., Kuan, H.-C., Liu, X., y Ma, J. (2025). Advancing polymer nanocomposites through mechanochemical approaches. *Advanced Nanocomposites*. 2(1), 86–107, <https://doi.org/10.1016/j.adna.2025.03.002>

Viswanathan, V., Laha, T., Balani, K., Agarwal, A., y Seal, S. (2006). Challenges and advances in nanocomposite processing techniques. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 54(5), 121–285, <https://doi.org/10.1016/j.mser.2006.11.002>

Weber, F., Dötschel, V., Steinmann, P., Pfaller, S., y Ries, M. (2024). Evaluating the impact of filler size and filler content on the stiffness, strength, and toughness of polymer nanocomposites using coarse-grained molecular dynamics. *Engineering Fracture Mechanics*. 307(8), 110270, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110270>

Yadav, V., Pal, D., y Poonia, A. K. (2024). Nanofillers as a potential key for shaping the future of the industries. *Hybrid Advances*. 7(12), 100340, <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100340>

Yosri, N., Khalifa, S. A. M., Attia, N. F., Du, M., Yin, L., Abolibda, T. Z., Zhai, K., Guo, Z., y El-Seedi, H. R. (2024). Advancing sustainability in the green engineering of nanocomposites based on marine-derived polymers and their applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 274(1), 133249, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133249>

TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA QUÍMICA DE LA PRODUCCIÓN DE AMONIACO.

ENERGY TRANSITION IN THE CHEMICAL INDUSTRY OF AMMONIA PRODUCTION.

Lorena Elizabeth Ruiz-Marin*, Ángel Castro-Agüero, Enedina Flores Tililayatzí, Jhonatan Mendez Valencia.

Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Calzada Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, 90300, México.

*Email: 20254099@uatx.mx.com

Recibido: 18-Junio-2025

Aceptado: 07-Agosto-2025

RESUMEN

El presente trabajo revisa el estado del arte de tecnologías sostenibles para la producción de amoníaco, con énfasis en procesos que integran hidrógeno verde generado por energías renovables con el esquema tradicional Haber-Bosch.

La síntesis de amoníaco es responsable de un considerable porcentaje de las emisiones globales de CO₂ y del consumo energético de la industria química, lo que hace urgente la transición hacia alternativas más limpias. Se discuten avances recientes en electrólisis, tecnologías de control predictivo, y esquemas de integración energética, lo que permite dar la pauta a estudiar propuestas de simulación y control de plantas híbridas con el objetivo de reducir significativamente la huella de carbono del proceso de síntesis de amoníaco, fortaleciendo su rol en la seguridad alimentaria global y su potencial como vector energético.

Palabras Clave: amoniaco, amoniaco verde, Haber-Bosch, hidrógeno verde, sistema híbrido.

This paper reviews the state of the art of sustainable technologies for ammonia production, with emphasis on processes that integrate green hydrogen generated by renewable energies with the traditional Haber-Bosch scheme. Ammonia synthesis is responsible for a considerable percentage of the chemical industry's global CO₂ emissions and energy consumption, making the transition to cleaner alternatives urgent. Recent advances in electrolysis, predictive control technologies, and energy integration schemes are discussed, which allows to give the guideline to study proposals for simulation and control of hybrid plants with the aim of significantly reducing the carbon footprint of the ammonia synthesis process, strengthening its role in global food security and its potential as an energy vector.

Keywords: ammonia, green ammonia, green hydrogen, Haber-Bosch, hybrid system

1. INTRODUCCIÓN

El amoníaco ha tenido un profundo impacto global desde el descubrimiento de su síntesis a partir de hidrógeno y nitrógeno por Haber y Bosch en Alemania a principios del siglo XX (Appl., 1997; Modak., 2011). El papel clave del amoníaco hoy en día, es servir de materia prima básica para los fertilizantes inorgánicos (Rouwenhorst y col., 2021) que actualmente sustentan la producción de alimentos para aproximadamente la mitad de la población mundial (The Royal Society., 2020). Un uso emergente, pero no menos importante es como una buena fuente de almacenaje y transporte de energía o hidrógeno (Al-Zareer y col., 2019; Ghavam y col., 2021) por lo que procesos de reformación y crackeo de NH_3 a altas presiones han sido de temas de interés en desarrollo (Sayas y col., 2020; Trangwachiracha y col., 2024).

La producción mundial actual de amoníaco es de unos 176 millones de toneladas al año y se logra predominantemente mediante el reformado de metano con vapor de agua para producir el hidrógeno necesario para la síntesis de amoníaco a través del proceso Haber-Bosch. Este proceso consume una gran cantidad de energía, alrededor del 1.8% de la producción energética mundial cada año y produce como resultado unos 500 millones de toneladas de dióxido de carbono (Ruddock y Brudenell., 2003). La síntesis de amoníaco es, junto con la producción de cemento, acero y etileno, uno de los "cuatro grandes" procesos industriales que emiten más dióxido de carbono a la atmósfera. En estos procesos, en consecuencia, se debe desarrollar e implementar un plan de descarbonización para cumplir el objetivo de emisiones netas de carbono cero para 2050 (National Academy of Science., 2022) y al mismo tiempo contribuir con objetivos de desarrollo sostenible propuestos por las Naciones Unidas (NU) en su Agenda 2030 (Naciones Unidas y United Nations Climate Change).

En la industria química el amoníaco representa el 38% de las emisiones de gases invernadero y el 17% del consumo energético del mismo sector. Por tal motivo, se han considerado alternativas y mejoras en el proceso Haber-Bosch como: las tecnologías de captura y almacenamiento de CO_2 (Asgharian y col., 2024; Mersch y col., 2024) así como generación de H_2 verde utilizando energías renovables (Tsoutsos, 2010; Rouwenhorst y col., 2021) para lograr que la producción de amoníaco reduzca la generación de CO_2 .

La transición energética global requiere tecnologías escalables para la conversión de energías renovables en formas almacenables y transportables. La NU estima que la producción de alimentos global debe aumentar un 70% para 2050 y además que entre el 40-60% de la producción de alimentos depende de fertilizantes comerciales (Meers, 2016).

2. OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE PARA PRODUCCIÓN DE AMONIACO

2.1 Métodos electroquímicos y termoquímicos.

En varios estudios se ha modelado y analizado la obtención de hidrógeno verde por medio de electrólisis, gasificación de biomasa (Swami SM y Abraham MA., 2006) y reformado de biogás (Cortright y col., 2002) para determinar sus ventajas en la aplicación de la industria del amoníaco.

2.2 Electrólisis de agua.

En cuanto a la electrólisis para producción de hidrógeno, los electrolizadores que se han considerado son: electrolizadores alcalinos (AEC) (Nami y col., 2024), electrolizadores de óxido sólido (SOEC) (Bianchi y Bosio (2024) y electrolizador de membrana polimérica (PEMWE) (Mucci y col., 2023]; así como sistemas sostenibles mediante paneles fotovoltaicos flotantes (FPV) (Uygun y Dincer., 2024). Recientemente (Tang y col., 2024) han propuesto un nuevo sistema de electrólisis de semi vapor (SVE) para la generación rentable de hidrógeno, este sistema emplea la electrólisis de vapor a baja temperatura en el ánodo, manteniendo la circulación de agua líquida en el cátodo. El proceso SVE no requiere un aporte energético adicional en comparación con el proceso convencional de electrólisis de agua líquida, a la vez que permite el uso directo de una amplia gama de recursos hídricos sin pretratamiento. Y también se han planteado sistemas de optimización de energía solar para generar combustibles más eficientes (Kelly y col., 2010).

3. PRODUCCIÓN DE AMONIACO

Debido a la importancia de la producción de amoniaco se han investigado diversos métodos para su obtención con la finalidad de buscar alternativas al proceso convencional Haber-Bosch, Figura 1. En la síntesis electroquímica del amoniaco, (Cui y col., 2020) han analizado avances utilizando nitrógeno (N_2) y agua (H_2O) como materias primas con condiciones bajas de temperatura y presión.

La síntesis en sales fundidas, ciclos termoquímicos y rutas catalíticas los cuales operan a bajas presiones, aún se encuentran en desarrollo para aplicaciones a gran escala debido a que la obtención de amoniaco por estos métodos aún es reducida (Juangsa y col., 2021 y Klaas y col., 2021). Faria (2022) analiza brevemente los hallazgos científicos para la síntesis de amoniaco a baja temperatura y presión utilizando catalizadores homogéneos.

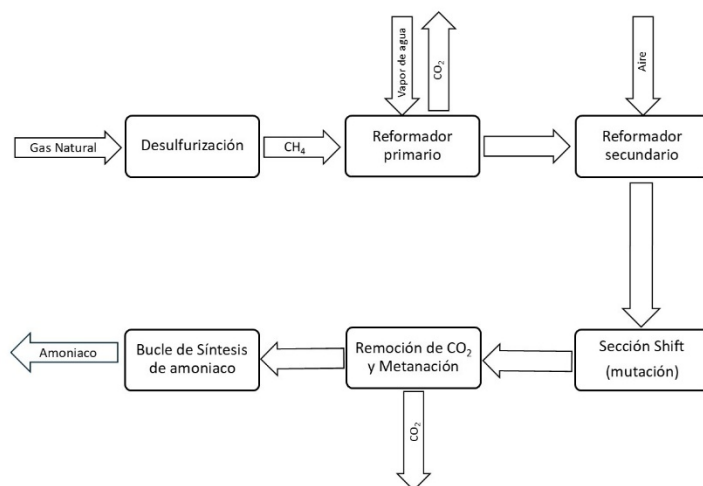


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso convencional Haber-Bosch para la síntesis de amoniaco.

Kappagantula y col. (2024) también proponen y comparan diferentes arreglos de reactores como el: Bucle químico de tres reactores (TRCL) y Bucle químico del reformador (CLR) con la finalidad de

reducir el consumo energético. Spatolisan y Pellegrini (2023) analizan la intensificación del proceso introduciendo la etapa de eliminación del amoniaco mediante absorción con una solución de fosfato aguas abajo de la etapa de reacción con el fin de reducir las emisiones de CO_2 y Jonga y col. (2009) optimizan un reformador de metano con vapor de agua, encontrando que aumentando la fracción de aire en el quemador de combustible e incrementando el grosor del aislamiento se produce alrededor de 9.5% más de hidrogeno.

Hill y col. (2020) presentan un trabajo que se centra en los aspectos tecnológicos de un proceso Haber-Bosch electrificado como el que se muestra en la Figura 2. El H_2 , proveniente del metano, lo sustituyen por un sistema de electrolizadores; y también sustituyen el N_2 del aire, que se purifica en el metanador, por un sistema de Absorción por oscilación de presión (PSA). Ishaq y col. (2021) proponen un diseño donde se implementan e integran tres tipos diferentes de reformado de gas natural para la síntesis limpia de hidrógeno, metanol y amoniaco y donde una fuente de calor solar proporciona energía a la unidad de refrigeración por absorción y también vapor a los reformadores de gas natural.

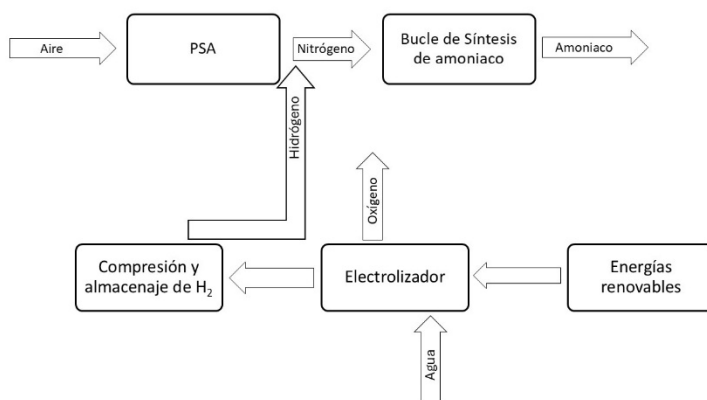


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso electrificado Haber-Bosch para la síntesis de amoniaco.

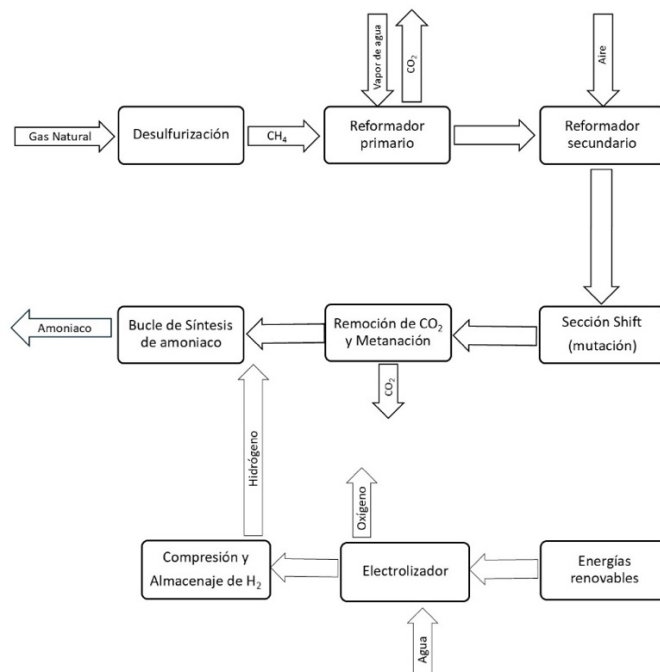


Figura 3. Diagrama de bloques del proceso híbrido Haber Bosch para la síntesis de amoníaco.

Isella y col. (2024) proponen un sistema de producción de amoníaco híbrido en el cual una corriente de hidrógeno verde se alimenta al circuito Haber-Bosh para reducir las emisiones de CO_2 utilizando la infraestructura ya existente del proceso convencional, ver Figura 3, y del cual, hasta el momento no se tiene referencia bibliográfica de algún otro trabajo al respecto.

4. CONTROL Y SIMULACIÓN DE PROCESOS DE AMONIACO.

En la transición de electrificar el proceso Haber-Bosch, algunos de los retos más grandes son el incrementar la eficiencia de la separación del agua, mejorar la eficiencia en la separación del amoníaco y el desarrollo de catalizadores; pero la factibilidad de éxito del proceso Haber-Bosch depende de acoplarlo con la energía renovable de naturaleza intermitente y aislarlo de las perturbaciones climáticas, así como tener un sistema de control ágil y que ajuste la operación a los cambios externos.

Paralelamente, Salmon y Bañares-Alcántara (2023) han utilizado modelos basados en Programación Lineal (LP); y modelos de control predictivo (MPC) en estudios de casos en diferentes entornos para acoplarse con entradas de energía oscilantes. Poe (2021) considera que el control predictivo de modelos multivariables ofrece beneficios al reducir la variabilidad en los resultados de una operación, como la calidad, los volúmenes de producción y los costos operativos, al identificar las fuentes de variabilidad y responder a estas perturbaciones. Sin embargo, la flexibilidad de los procesos de síntesis con caudales de hidrógeno variables en el tiempo aún no está clara y podría ser necesario un costoso almacenamiento de hidrógeno como reserva.

En el ámbito de la simulación y el control de sistemas de producción de amoníaco Shah (1967) y Skogestad (2004), establecieron estructuras para el diseño de control de plantas químicas. Dichos

enfoques fueron posteriormente aplicados a plantas de amoníaco (Araujo y Skogestad, 20024). Asimismo Zhang y col. (2010) propusieron una estructura de control total de planta (PWC) para el proceso de síntesis de amoníaco basada en el marco integrado de simulación y heurística (IFSH) y es comparado con el procedimiento de control auto optimizado (SOC) propuesto por Araujo y Skogestad.

También se han realizado estudios aplicando distintos tipos de controladores para un mejor funcionamiento, optimización y seguridad del sistema. Zhang y col. (2019) presentan una aplicación práctica que simula controladores predictivos multimodal en un proceso de amoníaco multi unidad integrando todas las restricciones de seguridad del proceso en su diseño.

Albalawi y col. (2018) desarrollaron y aplicaron a un proceso químico dos nuevos esquemas de control predictivo basado en modelos con enfoque de Lyapunov (LMPC). Estos esquemas permiten alcanzar regiones de operación segura asociadas a la estabilidad del sistema en tiempos aproximadamente dos veces menores que los obtenidos con el LMPC convencional. Por su parte, Fahr y col. (2025) demostraron la viabilidad de cambios rápidos de carga en una planta Haber-Bosch altamente flexible mediante el uso de controladores proporcional-integral (PI) implementando distintas estrategias de control para la regulación del proceso.

La simulación dinámica puede utilizarse para predecir los cambios dinámicos en variables críticas; Luyben (2012) presenta simulaciones dinámicas de seguridad de emergencia para dos principales fallos: pérdida de refrigerante en el reactor y pérdida de agua en el condensador del producto para un circuito de proceso de síntesis de amoníaco con reactor refrigerado y posteriormente evalúa simulaciones y control para perturbaciones en el rendimiento y la composición de la alimentación de una planta de síntesis de amoníaco (Luyben, 2018).

Deng y col. (2022) llevaron a cabo un análisis, simulación dinámica y optimización de un proceso de producción de amoníaco verde, adoptando el método catalítico térmico para transformar el proceso tradicional de Haber-Bosch utilizando hidrógeno verde como materia prima para reducir el consumo energético y las emisiones de carbono. La optimización del proceso de amoníaco verde se centró en el intercambiador de calor de salida del reactor y el intercambiador de calor de la torre de separación de amoníaco.

Fratini y col. (2016) simulan la integración de diferentes fuentes de energía renovables para la obtención de hidrógeno por medio de gasificación de biomasa, reformado de biogás y la electrólisis del agua en plantas de producción de amoníaco. Ostuni y col. (2016) patentaron un método para la regulación de una planta de amoníaco similar al proceso electrificado donde la planta de amoníaco opera a carga parcial, manteniendo el circuito de síntesis de amoníaco a una presión nominal alta y reduciendo la tasa de purga para aumentar la concentración de inertes en el circuito de síntesis de amoníaco y evitar el sobrecalentamiento del reactor.

Shaker y col. (2024) enfocan su trabajo principalmente en el uso de amoníaco verde como vehículo eficiente para el hidrógeno verde, junto con un meticuloso modelado y simulación de procesos y utilizan el Analizador de Energía Aspen para sugerir la posible integración térmica entre los intercambiadores de calor a fin de reducir la cantidad de suministro de calor y aprovechar la energía térmica interna de las corrientes. Patel y col. (2025) investigaron el comportamiento transitorio bajo un flujo de alimentación variado de la producción de amoníaco verde demostrando que, mediante

la implementación de estrategias de control eficaces, la unidad podía alcanzar un factor de carga mínimo del 10% o inferior, manteniendo la estabilidad y la eficiencia.

5. DISCUSIÓN

El análisis del estado del arte evidencia que la transición hacia esquemas de producción de amoníaco con menor huella de carbono requiere no solo innovaciones tecnológicas en la obtención de hidrógeno verde, sino también herramientas robustas de simulación y control que permitan evaluar su viabilidad operativa bajo condiciones industriales realistas. En particular, los sistemas híbridos que integran hidrógeno verde al proceso convencional Haber–Bosch emergen como una solución intermedia estratégica; sin embargo, su desempeño dinámico y su estabilidad operativa aún no han sido estudiados de manera sistemática.

La implementación de modelos dinámicos permite identificar variables críticas del proceso como presión, temperatura y relación H_2/N_2 y evaluar su sensibilidad frente a cambios transitorios en la alimentación. Esta información resulta esencial para el diseño de estrategias de control avanzadas, particularmente de control predictivo basado en modelos (MPC), el cual ha demostrado ser eficaz para manejar sistemas multivariables con restricciones operativas estrictas, como es el caso de la síntesis de amoníaco.

Desde esta perspectiva, un objetivo futuro relevante consiste en desarrollar un modelo dinámico integrado de una planta híbrida Haber–Bosch en UniSim Design, que incorpore una corriente variable de hidrógeno verde y permita evaluar diferentes escenarios de operación flexible. Sobre este modelo, la aplicación de estrategias de MPC facilitaría la anticipación de perturbaciones asociadas a la variabilidad de la energía renovable, optimizando la operación del proceso y minimizando desviaciones en variables críticas, sin comprometer la seguridad ni la eficiencia energética del sistema.

Este enfoque permitiría avanzar hacia una producción de amoníaco más flexible, resiliente y sostenible, alineada con los objetivos globales de descarbonización y con el creciente interés en el amoníaco como vector energético en la transición energética.

6. CONCLUSIONES

A pesar de investigación, simulación y propuestas de control y optimización para el proceso de producción de amoníaco, no existe suficiente evidencia bibliográfica acerca de estos temas aplicados a plantas híbridas de fabricación de amoníaco, las cuales se perfilan como una alternativa innovadora dentro de los esfuerzos globales por descarbonizar esta industria. La propuesta de integrar al proceso convencional Haber-Bosch una corriente de alimentación de hidrógeno verde de manera controlada y transitoria a través de la generación in situ de energía renovable se plantea como una solución viable para reducir de forma significativa las emisiones de CO_2 asociadas a la producción tradicional de amoníaco, contribuyendo así a mitigar el impacto ambiental que esta industria tiene sobre la atmósfera.

Además de su contribución a la sostenibilidad ambiental, el desarrollo del amoníaco verde-híbrido representa un paso clave en la transición hacia una cadena de producción de fertilizantes más amigable con el medio ambiente. Esta transformación no solo fortalece la posición del amoníaco en

la agricultura, sino que también resalta su potencial como vector energético en un contexto de transición energética global.

AGRADECIMIENTOS

Lorena Elizabeth Ruiz Marin agradece la beca económica brindada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación a través de la Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Tlaxcala.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Albalawi, F., Durand, H., Alanqar, A., & Christofides, P. D. (2018). Achieving operational process safety via model predictive control. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.11.021>

Al-Zareer, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2019). Transient thermodynamic analysis of a novel integrated ammonia production, storage and hydrogen production system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 18214–18224. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.085>

Appl, M. (1997, septiembre 25–26). *The Haber–Bosch heritage: The ammonia production technology* [Conferencia técnica]. 50th Anniversary of the International Fertilizer Association (IFA), Sevilla, España.

Araújo, A., & Skogestad, S. (2008). Control structure design for the ammonia synthesis process. *Computers & Chemical Engineering*, 32, 2920–2932. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.03.001>

Asgharian, H., Baxter, L., Iov, F., Cui, X., Araya, S. S., Nielsen, M. P., & Liso, V. (2024). Techno-economic analysis of blue ammonia synthesis using cryogenic CO₂ capture process: A Danish case investigation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 69, 608–618. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.060>

Batgi, S. U., & Dincer, B. (2024). Design and analysis of a floating photovoltaic-based integrated energy system with ammonia production. *Applied Thermal Engineering*, 252, 123676. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123676>

Bianchi, F. R., & Bosio, B. (2024). Modelling of green ammonia production based on solid oxide cells as electrolyser and oxygen separator for Haber–Bosch loop decarbonization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 95, 1183–1193. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.047>

Cortright, R. D., Davda, R. R., & Dumesic, J. A. (2002). Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water. *Nature*, 418, 964–967. <https://doi.org/10.1038/nature01009>

Cui, B., Yu, Z., Liu, S., Zhang, J., Liu, X., Liu, C., & Zhang, Z. (2020). Highly selective and efficient ammonia synthesis from N₂ and H₂O via an iron-based electrolytic-chemical cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.144>

Deng, W., Huang, C., Li, X., Zhang, H., & Dai, Y. (2022). Dynamic simulation analysis and optimization of green ammonia production process under transition state. *Processes*, 10, 2143. <https://doi.org/10.3390/pr10102143>

Fahr, S., Kender, R., Bohn, J.-P., Rehfeldt, S., Peschel, A., & Klein, H. (2025). Dynamic simulation of a highly load-flexible Haber–Bosch plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 102, 1231–1242. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.039>

Faria, J. A. (2022). Renaissance of ammonia synthesis for sustainable production of energy and fertilizers. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 29, 100466. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100466>

Frattini, D., Cinti, G., Bidini, G., Desideri, U., Cioffi, R., & Jannelli, E. (2016). A system approach in energy evaluation of different renewable energy sources integration in ammonia production plants. *Renewable Energy*, 99, 472–482. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.040>

Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I. A. G., & Styring, P. (2021). Sustainable ammonia production processes. *Frontiers in Energy Research*, 9, 580808. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.580808>

Ishaq, H., & Dincer, I. (2021). Investigation and optimization of a new hybrid natural gas reforming system for cascaded hydrogen, ammonia and methanol synthesis. *Computers & Chemical Engineering*, 148, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107234>

Isella, A., Ostuni, R., & Manca, D. (2024). Towards the decarbonization of ammonia synthesis: A techno-economic assessment of hybrid-green process alternatives. *Chemical Engineering Journal*, 486, 150132. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150132>

Jong, M. de, Reinders, A. H. M. E., Kok, J. B. W., & Westendorp, G. (2009). Optimizing a steam-methane reformer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.084>

Juangsa, F. B., Irhamna, A. R., & Aziz, M. (2021). Production of ammonia as potential hydrogen carrier: Review on thermochemical and electrochemical processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 14455–14477. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.214>

Kappagantula, R. V., Ingram, G. D., & Vuthaluru, H. B. (2024). Effectiveness of three-reactor chemical looping for ammonia production using Aspen Plus simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 61, 1340–1355. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.238>

Kelly, N. A., Gibson, T. L., Cai, M., Spearot, J. A., & Ouwerkerk, D. B. (2010). Development of a renewable hydrogen economy: Optimization of existing technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 892–899. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.062>

Klaas, L., Guban, D., Roeb, M., & Sattler, C. (2021). Recent progress towards solar energy integration into low-pressure green ammonia production technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 25121–25136. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.063>

Luyben, W. L. (2012). Use of dynamic simulation for reactor safety analysis. *Computers & Chemical Engineering*, 40, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.02.013>

Luyben, W. L. (2018). Plantwide control of a coupled reformer/ammonia process. *Chemical Engineering Research and Design*, 134, 518–527. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.04.040>

Manca, D., Ostuni, R., & Zardi, F. (2016). *Method for load regulation of an ammonia plant*. United States Patent and Trademark Office.

Meers, E. (2016). *EIP-AGRI Focus Group on nutrient recycling: Starting paper on how to improve the agronomic use of recycled nutrients (N and P) from livestock manure and other organic sources*. European Commission.

Mersch, M., Sunny, N., Dejan, R., Ku, A. Y., Wilson, G., O'Reilly, S., Soloveichik, G., Wyatt, J., & Mac Dowell, N. (2024). A comparative techno-economic assessment of blue, green, and hybrid ammonia production in the United States. *Sustainable Energy & Fuels*, 8, 1495–1508. <https://doi.org/10.1039/d3se01421e>

Modak, J. M. (2011). Haber process for ammonia synthesis. *Resonance*, 16, 1159–1167. <https://doi.org/10.1007/s12045-011-0130-0>

Mucci, S., Mitsos, A., & Bongartz, D. (2023). Power-to-X processes based on PEM water electrolyzers: A review of process integration and flexible operation. *Computers & Chemical Engineering*, 175, 108260. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108260>

Naciones Unidas. (s. f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). *New directions for chemical engineering*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26342>

Nami, H., Hendriksen, P. V., & Frandsen, H. L. (2024). Green ammonia production using current and emerging electrolysis technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114517. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114517>

Poe, W. (2021, junio). *Improving process economics of ammonia plant operations with advanced process control*. AVEVA. <https://www.aveva.com>

Rouwenhorst, K. H. R., Krzywda, P. M., Benes, N. E., Mul, G., & Lefferts, L. (2021). Ammonia production technologies. En A. Valera-Medina & R. Bañares-Alcántara (Eds.), *Techno-economic challenges of green ammonia as an energy vector* (pp. 41–83). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820560-0.00004-7>

Rouwenhorst, K. H. R., van der Ham, A. G. J., & Lefferts, L. (2021). Beyond Haber–Bosch: The renaissance of the Claude process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 21566–21579.

Salmon, N., & Bañares-Alcántara, R. (2023). Impact of process flexibility and imperfect forecasting on the operation and design of Haber–Bosch green ammonia. *RSC Sustainability*, 1, 923–937. <https://doi.org/10.1039/d3su00067b>

Sayas, S., Morlanés, N., Katikaneni, S. P., Harale, A., Solami, B., & Gascon, J. (2020). High-pressure ammonia decomposition on Ru–K/CaO catalysts. *Catalysis Science & Technology*, 10, 5027–5035. <https://doi.org/10.1039/d0cy00686f>

Shah, M. J. (1967). Control simulation in ammonia production. *Industrial & Engineering Chemistry*, 59, 72–83.

Skogestad, S. (2004). Control structure design for complete chemical plants. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.08.002>

Smith, C., Hill, A. K., & Torrente-Murciano, L. (2020). Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. *Energy & Environmental Science*, 13, 331–344. <https://doi.org/10.1039/c9ee02873k>

Spatolisano, E., & Pellegrini, L. A. (2023). Haber–Bosch process intensification: A first step towards small-scale distributed ammonia production. *Chemical Engineering Research and Design*, 195, 651–661. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.06.031>

Swami, S. M., & Abraham, M. A. (2006). Integrated catalytic process for conversion of biomass to hydrogen. *Energy & Fuels*, 20, 2616–2622. <https://doi.org/10.1021/ef060054f>

Tang, J., Guo, K., Guan, D., Hao, Y., & Shao, Z. (2024). A semi-vapor electrolysis technology for hydrogen generation from wide water resources. *Energy & Environmental Science*, 17, 7394–7402. <https://doi.org/10.1039/D4EE02722A>

The Royal Society. (2020, febrero). *Ammonia: Zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*. <https://royalsociety.org>

Tsoutsos, T. (2019). Hybrid wind–hydrogen energy systems. En J. K. Kaldellis (Ed.), *Stand-alone and hybrid wind energy systems* (pp. 254–281). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845699628.2.254>

United Nations Climate Change. (s. f.). *The Paris Agreement*. <https://unfccc.int>

Wu, T., Fan, W., Zhang, Y., & Zhang, F. (2021). Electrochemical synthesis of ammonia: Progress and challenges. *Materials Today Physics*, 16, 100310. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100310>

Zhang, C., Vasudevan, S., & Rangaiah, G. P. (2010). Plantwide control system design and performance evaluation for ammonia synthesis process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 12538–12547. <https://doi.org/10.1021/ie101135t>

Zhang, Z., Wu, Z., Rincon, D., & Christofides, P. D. (2019). Operational safety of an ammonia process network via model predictive control. *Chemical Engineering Research and Design*, 146, 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.04.004>

PROTEÍNAS INACTIVADORAS DE RIBOSOMAS (RIPs): DE AGENTES TÓXICOS A POSIBLES TERAPIAS ONCOLÓGICAS.

RIBOSOME INACTIVATING PROTEINS (RIPs): FROM TOXIC AGENTS TO POTENTIAL CANCER THERAPIES.

Enedina Flores-Tlilayatzí*, Lidia Patricia Jaramillo-Quintero, Shirley Carro-Sánchez, Dulce Yolotzin Medina-Velázquez, Lorena Elizabeth Ruiz-Marín.

Universidad Autónoma de Tlaxcala, Calzada Apizaquito, Apizaco, Tlaxcala, México.

20254834@uatx.mx

Recibido: 17 de Junio de 2025

Aceptado 7 agosto 2025

RESUMEN

Las proteínas inactivadoras de ribosomas (RIPs) se clasifican en tipo I, II y III. Las RIPs tipo I son proteínas monocatenarias, las RIPs tipo II se componen de dos cadenas polipeptídicas mientras que las RIP III tienen una estructura poco conocida. La ricina es una proteína que debido a su estructura (RIP II) presenta mayor toxicidad presentando efectos adversos en la salud, desde su descubrimiento ha sido objeto de múltiples estudios, siendo considerada en el siglo XX como posible arma biológica, siendo tema de seguridad nacional por los Estados Unidos de América (EUA). La identificación de la ricina marcó un hito importante en la bioquímica, ya que por primera vez se atribuyó una actividad biológica bien definida a una proteína vegetal. Debido a su citotoxicidad, varias RIPs han sido probadas por sus propiedades antitumorales, antivirales, antibacterianas y antifúngicas. Se han llevado a cabo ensayos clínicos, por ejemplo, con gelonina para tratar neoplasias malignas mieloides o para tratar leucemia, la proteína de momordica (MAP30) para tratar el virus de inmunodeficiencia humana (VIH). Las fascinantes actividades multimodales de las RIPs han generado desde hace mucho tiempo interés en el desarrollo de fármacos antitumorales que actúen selectivamente sobre las células tumorales.

Palabras Clave: Apoptosis, Citotóxis, Despurinización, ARNr N-glicosilasa.

ABSTRAC

Ribosome-inactivating proteins (RIPs) are classified into types I, II, and III. Type I RIPs are single-stranded proteins, type II RIPs consist of two polypeptide chains, while type III RIPs have a poorly understood structure. Ricin is a protein that, due to its structure (RIP II), exhibits greater toxicity and adverse health effects. Since its discovery, it has been the subject of numerous studies and was considered a potential biological weapon in the 20th century, becoming a national security issue for the United States. The identification of ricin marked a significant milestone in biochemistry, as it was the first time a well-defined biological activity was attributed to a plant protein. Due to its cytotoxicity, several RIPs have been tested for their antitumor, antiviral, antibacterial, and antifungal properties. Clinical trials have been conducted, for example, with gelonin to treat myeloid malignancies or leukemia, and with momordica protein (MAP30) to treat human immunodeficiency

virus (HIV). The fascinating multimodal activities of RIPs have long generated interest in the development of antitumor drugs that act selectively on tumor cells.

Key words: Apoptosis, Cytotoxic, Depurination, rRNA N-glycosylase.

1. INTRODUCCIÓN

Con más de 10 millones de casos nuevos cada año, se proyecta que las muertes relacionadas con el cáncer aumentarán aproximadamente a 13,1 millones de muertes en el futuro cercano con una estimación de la Organización Mundial de la Salud para el año 2030 [Walsh y Dood, 2013]. La resistencia a múltiples fármacos contra agentes quimioterapéuticos se ha convertido en el principal obstáculo para el éxito de la terapia contra el cáncer [Lu y Zhu, 2020]. Solo por citar una de las enfermedades con mayor tasa de mortalidad y con menor acceso a atención médica sin embargo existen muchos más padecimientos para los cuales no existe un tratamiento exclusivo y que además no sea invasivo.

Las proteínas inactivadoras de ribosomas (RIPs) son un grupo de N-glicosilasa citotóxicas, están presentes en plantas y en algunos hongos. Estas proteínas citotóxicas son de interés médico por sus propiedades antitumorales, antivirales, antibacterianas y antifúngicas. Las proteínas inactivadoras de ribosomas podrían ser una posible alternativa en el tratamiento de diversas enfermedades entre ellas el cáncer, ya que dañan o destruyen células vivas, interfiriendo en sus funciones esenciales y provocando la muerte, a pesar de que las RIPs muestran un gran potencial en aplicaciones clínicas, los efectos secundarios como el estímulo a respuestas inmunes, la vida media plasmática corta, y la falta de especificidad han restringido su uso [Polito y Bortolotti, 2016].

La investigación de los mecanismos y propiedades de las RIPs para disminuir los efectos secundarios y superar eficazmente las barreras es uno de los principales objetivos para el éxito de la terapia contra el cáncer y otras enfermedades basadas en proteínas.

El objetivo de esta revisión es abordar la clasificación de las RIPs, el mecanismo de acción y las aplicaciones en la búsqueda de alternativas en los tratamientos médicos, para informar sobre los aspectos interesantes de las RIPs y fomentar el interés por estas especies de las cuales aún falta mucho por conocer.

2. LAS RIPS COMO ARMA BIOLÓGICA

Las proteínas inactivadoras de ribosomas (RIPs) se aislaron por primera vez hace casi un siglo con el descubrimiento de la Ricina. Desde su hallazgo han generado interés en el estudio de sus propiedades en el tema de la farmacéutica como agentes patógenos en el tratamiento de enfermedades, pero también por su posible uso en la guerra biológica y el bioterrorismo.

En 1978, se reportó la muerte del activista búlgaro Georgi Markov a manos del servicio secreto búlgaro utilizando una cápsula de ricina disparada desde la punta de un paraguas. Desde entonces la ricina se ha intentado utilizar para asesinatos o intimidaciones, el último que se reportó ocurrió en abril de 2013 cuando fue enviada una carta con ricina al entonces presidente estadounidense Barack Obama [Walsh y Dood, 2013].

La identificación de la ricina marcó un hito importante en la bioquímica, ya que por primera vez se atribuyó una actividad biológica bien definida a una proteína vegetal.

La ricina es tóxica para los humanos, pero el riesgo varía según la vía y la fuente de exposición. La dosis de ricina necesaria para producir la muerte en el 50 % de ratones puede ser tan pequeña como 1–10 µg/kg, cuando se administra por inyección o inhalación; cuando se administra por vía parenteral, la ricina se distribuye rápidamente al hígado, la evidencia en modelos animales sugiere que la ricina se absorbe mal en la piel intacta, al ingerirla, la ricina erosiona la mucosa intestinal;

esto puede provocar una pérdida masiva de líquidos y un shock hipovolémico, ambos manejables con la atención médica adecuada. Dentro de las posibles formas de usar la ricina como arma biológica se habló de una posible contaminación el suministro de agua de una ciudad, pero las concentraciones letales de ricina requerirían cantidades imposibles de realizar de forma encubierta y no garantizan el éxito debido a variables como la gestión de la reticulación, la cloración, la mezcla, la degradación bacteriana y la luz ultravioleta [Schep y Temple, 2009].

La caracterización de las proteínas inactivadoras de ribosomas comenzó a partir de la década de 1970, el profesor Fiorenzo Stirpe y su equipo detectaron, aislaron y caracterizaron muchas RIPs. Stirpe es pionero en documentar las diversas funciones biológicas de las RIPs para el bienestar humano [Seenivasan y Balasubramanian, 2024].

Se ha descubierto que plantas *Cucurbitáceas* como la calabaza, la calabaza dama, el pepino, la lufa, la calabaza amarga, el melón, la cebada, el maíz, el espárrago, el ginseng, el ginseng americano y la *Gynostemma* contienen el gen RIPs. También plantas como las *Quenopodiáceas*: espinaca, remolacha, quinua, salsola y otras plantas contienen el gen RIPs. En especies de *Euphorbiaceae* como *Jatropha*, *Crotonis* y *Sapium sebiferum*, y en la especie *Amaranthaceae* como la *Celosia* cristata y *Celosia argentea* también se aislaron el gen RIPs [Yang y Wang, 2023].

3. CLASIFICACIÓN DE LA RIPs

En 1982 Stirpe introdujo por primera vez la denominación “proteína inactivadora de ribosomas” (RIPs) para designar todos los inhibidores de la síntesis proteica capaces de inactivar la subunidad 60S del ribosoma. Stirpe y Barbieri propusieron entonces la designación como tipo I de las RIPs de cadena sencilla y como tipo II de las RIPs formadas por una cadena A (activa), con propiedades enzimáticas, unida covalentemente a una cadena B (de unión), con propiedades de lectina [Bolognesi y col., 2017].

3.1 RIPs tipo I

Las proteínas inactivadoras de ribosomas (RIPs) se clasifican en tipo I, II y III. Las RIPs de tipo I se refiere a las proteínas monocatenarias con actividad enzimática (p. ej., la proteína antiviral de la hierba carmín (PAP) y la Tricosantina). Suelen ser básicas y con masas moleculares de aproximadamente 24-30 kDa [Zhang y col., 2017], éstas han sido menos estudiadas a pesar de tener mayores especies y ser menos tóxicas, debido a la ausencia de mecanismos de unión y entrada bien definido, además antes de que la toxina pueda ejercer su efecto tóxico en el huésped, el componente vegetal de la dieta se digiere (bajo pH de los jugos gástricos y enzimas proteolíticas), lo que neutraliza la toxina eficazmente. Por lo tanto, muchas plantas productoras de tipo I, como el tomate, la espinaca, etc., pueden consumirse sin experimentar efectos tóxicos [Sharma y Gupta, 2022].

3.2 RIPs tipo II

Las RIPs de tipo II se componen de dos cadenas polipeptídicas, denominadas cadenas A y B unidas por un enlace disulfuro covalente. Las cadenas B poseen propiedades similares a la de la lectina que permite a las RIPs reconocer y unirse a los residuos de G-galatosilo en las glicoproteínas celular, con ayuda de la cadena B las RIPs de tipo II pueden entrar al citoplasma y ejercer el efecto inactivador de ribosomas [Peumans y Hao, 2001].

Por ello, las RIPs de tipo II son proteínas muy tóxicas. Sin embargo, se han encontrado varias RIPs de tipo II no tóxicas en algunas especies del género *Sambucus*. Todas las RIPs tipo II de *Sambucus* muestran una citotoxicidad considerablemente menor que la ricina, por ejemplo, la ebulina f y I, nigrina b y f, y sieboldina b, muestran una toxicidad muy baja para las células HeLa. En ratones, la dosis letal 50 de las Rip tipo II heterodímeras de *Sambucus* administradas por inyección intraperitoneal es superior a 1,6 mg/kg de peso corporal, mientras que la ricina, la abrina o la

volkensina son letales en concentraciones en el rango de unos pocos microgramos/kilogramo [Ferrerías y col., 2011].

3.3 RIPs tipo III

Las proteínas inactivadoras de ribosomas tipo III reúne a todas las especies que no se ajustan a las características de las anteriores, este tipo de RIPs son menos frecuentes que las tipo I y II, además tienen dominios adicionales de funcionalidad desconocida [Reyes-Alvarado, 2008]. Por lo que en esta revisión no se profundiza en las características y sus aplicaciones terapéuticas.

Las concentraciones de RIPs en las semillas varían considerablemente, desde menos de 1 hasta más de 100 mg por 100 g. Los niveles más altos se encontraron en las semillas de *Caryophyllaceae*, *Cucurbitaceae*, *Euphorbiaceae* y *Phytolaccaceae*, aunque los estudios de distribución fueron demasiado limitados para permitir una generalización [Stirpe y Barbieri, 1986].

4. MECANISMO DE LAS RIPs

Las proteínas inactivadoras de ribosomas (RIPs) son una clase de ARNr N-glicosilasas citotóxicas [Yang y Wang, 2023] esto implica que eliminan una base nitrogenada dentro de una posición específica dentro del ARN ribosomal. Las RIPs ejercen su efecto a través de la despurinización que es la capacidad enzimática para hidrolizar irreversiblemente un enlace N-glucosídico específico en el ARN ribosomal, las RIPs escinden el bucle sarcina-ricina en el ARNr, que es fundamental en el ensamblaje de ribosomas y la hidrólisis de GTP, al estar bloqueada la hidrólisis de GTP no proporciona la energía para el movimiento unidireccional del ribosoma en la etapa de elongación debido a la supresión de los factores de elongación, lo que inhibe la síntesis de proteínas y causa la muerte celular por apoptosis [Wentao y Jia, 2023] que es un proceso ordenado y vital donde una célula se autodestruye de forma controlada para eliminar células innecesarias, dañadas o viejas, manteniendo la salud del organismo.

Las RIPs probablemente desempeñan un papel en la defensa de las plantas, las RIPs tipo I participan en la defensa contra virus y, posiblemente, microorganismos mientras que las tipo II son proteínas de defensa dirigidas directamente contra organismos fitocomestibles. La actividad protectora de las RIPs de tipo I y tipo II depende sin duda de su actividad enzimática. Sin embargo, a diferencia de las RIPs de tipo II, las RIPs de tipo I actúan indirectamente mediante la activación del sistema de defensa de la planta [Peumans y Hao, 2001].

Las RIPs de tipo II en general son potentes toxinas, aunque al interactuar con los ribosomas de las células vegetales tienen una eficacia significativamente menor que cuando lo hacen con los ribosomas de las células de mamíferos. Para evitar el posible efecto tóxico de sus propias RIPs, las plantas se protegen secuestrando las RIPs lejos de los ribosomas del huésped [De Zaeytjij, 2019]. Debido a su citotoxicidad, que se refiere a la capacidad de una sustancia, célula o mecanismo inmunológico para dañar o destruir células vivas, varias RIPs han sido probadas por sus propiedades antitumorales, antivirales, antibacterianas y antifúngicas. Se han llevado a cabo ensayos clínicos, con gelonina para tratar neoplasias malignas mieloides y tratar leucemia, la proteína antiviral de tricosantina (TCS) y hierba carmín (PAP) para tratar el virus de inmunodeficiencia humana (VIH). A pesar del gran potencial de las RIPs en aplicaciones clínicas, sus efectos secundarios, como la inducción de respuestas inmunitarias, su corta vida media plasmática y su inespecificidad, han limitado su uso. A lo largo de los años, se han realizado diversos trabajos para modificar las RIPs y reducir estos problemas [Lu y Zhu, 2020].

Otro motivo para el estudio de las proteínas inactivadoras de ribosomas es la actividad antiviral que presentan, las más investigadas pertenecen a las angiospermas: RIPs monocotiledóneas tipo I (*Poaceae*), RIPs dicotiledóneas tipo I (*Euphorbiaceae*, *Caryophyllaceae*, *Phytolaccaceae*); lo que

sugiere que todas estas proteínas podrían tener, en mayor o menor medida, actividad antiviral y que su principal función biológica podría ser precisamente la defensa de la planta frente a virus. Sin embargo, los investigadores se han centrado en el estudio de proteínas obtenidas de especies de las familias *Phytolaccaceae*, *Cucurbitaceae*, *Caryophyllaceae* y *Euphorbiaceae*; y las RIPs más estudiadas son la proteína antiviral de la hierba carmín (PAP), la tricosantina (TCS) y la proteína antiviral de *Momordica* (MAP30) [Lu y Zhu, 2020].

Originalmente se pensaba que las RIPs no se encuentran de forma universal en las plantas, como lo demuestra la imposibilidad de identificarlas en dichos sistemas. Sin embargo, recientemente, se aisló y caracterizó en *N. tabacum* una proteína similar a la RIP de 26 kDa, denominada TRIP, con actividad de N-glicosidasa. Se descubrió que TRIP se expresa en niveles muy bajos en la hoja (0,01 % del material de partida total), lo que podría explicar la persistente imposibilidad de identificar una RIPs en el tabaco. Este descubrimiento planteó la posibilidad de que otras especies vegetales también posean una o más N-glicosilasas [Park y col., 2004].

5. PROTEÍNAS INACTIVADORAS DE RIBOSOMAS TIPO I

Las proteínas inactivadoras de ribosomas tipo I carecen de la cadena B y presentan menor facilidad para entrar a las células diana, tendiendo solo una cadena A que contiene actividad N-glicosilada. Respecto a la entrada en la célula diana, la primera interacción con la membrana externa varía entre las RIPs, las de tipo I interactúan de forma específica con receptores de carbohidratos, incluso algunas se unen al receptor de LDL o de quimiocinas [Reyes-Alvarado, 2008].

La tricosantina (TCS) es una proteína inactivadora de ribosomas tipo I derivada de la hierba china Tian Hua Fen, la raíz de *Trichosanthes kirilowii Maxim.* La TCS es un medicamento de prescripción en China para uso ginecológico en embarazos ectópicos, molas hidatiformes, epiteloma coriónico, abortos y aún se utiliza en clínicas chinas para inducir el aborto a mitad de embarazo [Tang y Liang, 2017; Polito y Bortolotti, 2016]. Se ha demostrado que la TCS es activa contra diversos tumores, como cáncer de cuello uterino, coriocarcinoma, leucemia/linfoma, cáncer de estómago, cáncer de colon, hepatoma, cáncer de mama y cáncer de próstata. Los mecanismos tóxicos de la TCS en las células tumorales incluyen la inhibición de la proliferación y la inducción de la apoptosis, y el mecanismo detallado varía según la célula tumoral (Tabla 1) [Sha y Niu, 2013].

La aplicación antitumoral del TCS se ve limitada por su corta vida media, debido a la rápida depuración renal relacionada con su tamaño relativamente pequeño (27 kDa), así como a su baja eficiencia de administración intracelular.

La saporina, aislada de las semillas de la *Saponaria officinalis*, pertenece a las RIPs de tipo I y se sabe que cataliza la despurinización *in vitro* de un residuo específico de adenina en ARN ribosómicos grandes. Hace algunos años se conjugó con éxito la saporina con anticuerpos específicos contra tumores para mejorar la selectividad y la citotoxicidad en células leucémicas humanas. Sin embargo, los principales problemas del uso de las RIPs de tipo I como inmunotoxinas son la baja eficiencia de translocación al citosol y la degradación en los compartimentos liposomales antes de llegar a los ribosomas [Lai y Pai, 2007].

Se ha postulado la posible aplicación de la saporina-S6 en tratamientos anticancerígenos, dependiendo del conocimiento futuro sobre su mecanismo de acción. Los inmunoconjugados saporina-S6 presentan buenas propiedades estructurales y funcionales. La saporina-S6 es altamente resistente a la proteólisis y la desnaturalización, presenta una alta eficacia catalítica y es menos tóxica para las células normales [Maqsood y col., 2021], a pesar de ello también se ha reportado que la saporina-S6 causa lesiones significativas en hígado, riñón y bazo, con valores de tan solo 4,0 mg/kg de peso corporal en ratones [Sharma y Gupta, 2022].

La proteína anti-VIH momordica (MAP30) de 30 kDa proveniente de *Momordica charantia*, α - y β -momorcharinas, son RIPs de tipo I del melón amargo que se han utilizado en la medicina popular de

diversos países. Estas RIPs se han estudiado por su amplia actividad antiviral y se consideran agentes terapéuticos potenciales en infecciones para VHS y VIH. La proteína MAP30 no es tóxica para las células normales, pero sí es activa contra la infección y la replicación tanto del VHS como del VIH. Además, MAP 30, en combinación con otros fármacos antivirales, mejora la eficacia de la terapia anti-SIDA al inhibir la replicación del VIH en células con infección aguda y crónica. Según estos hallazgos, los investigadores realizaron muchos estudios para adaptarlos para uso clínico, sin embargo, como proteínas exógenas, α -MMC y MAP30 pueden causar reacciones alérgicas graves, inmunogenicidad fuerte, efectos secundarios tóxicos y tienen períodos de vida media plasmática cortos que limitan sus aplicaciones clínicas [Polito y Bortolotti, 2016; Sun y col., 2016].

La fracción proteica no unida de las hojas de *Mirabilis jalapa* L. ha mostrado un efecto citotóxico en células cancerosas HeLa, mieloma y T47D. Esta proteína no unida se conoce también como fracción ácida o fracción proteica negativa de *Mirabilis jalapa* L., denominada RIPs MJ-C [Miranda e Ismail, 2023]. La muerte celular causada por la proteína MJ-30 en la línea celular se debe a la inducción de apoptosis, como lo indica su capacidad para inducir la fragmentación del ADN. La terapia con proteína MJ-C logró reducir la incidencia de cáncer de piel (CCE) en un 75,5 % y la regresión de los nódulos tumorales (aproximadamente un 35,3 %) a las 10 semanas de tratamiento [Ikawati y Widyarini, 2014].

Una sustancia extraída y purificada de *Bougainvillea* fue identificada como una RIPs tipo I mediante una prueba de actividad enzimática. La proteína alcalina fue nombrada bouganina, con un peso molecular de 26,2 kDa. Estudios previos indicaron que la bouganina posee ARNr N-glicosilasa, polinucleótido: adenosina glicosidasa (PAG) y actividad antiviral, reprimiendo la síntesis de proteínas. Dos RIPs aisladas de *Bougainvillea spectabilis* inhibieron significativamente el virus del mosaico del tabaco (TMV); estas RIPs se denominan isoforma Q8 en este estudio. Mientras tanto, las RIPs de *Bougainvillea* mostraron una relación de actividad más alta que otras RIP tipo I, menor toxicidad en un sistema libre de células y menor actividad en células completas, lo que implica un gran potencial de aplicación [Lin y Xu, 2021].

La curcina es tóxica para los animales e inhibe la biosíntesis de proteínas en un sistema acelular, se ha reportado su toxicidad letal en ovejas, cabras, ratones, pollos, terneros y seres humanos, especialmente en niños [Srivastava y Gupta, 2011]. Felke [1914] aisló e identificó el principio tóxico de la curcina, una toxoalbúmina, de las semillas de la planta. Se descubrió que la curcina no es tóxica para las células Hela ni para las células normales, pero sí muestra efectos inhibidores sobre el crecimiento de la línea celular tumoral SGC-7901, Sp2/0 y hepatoma humano [Jia y Wang, 2017; Bolognesi y col., 2017]. Las curcinas de *J. Curcas* pertenecen a las RIPs de tipo I, comunes entre los miembros de la familia Euphobiaceae. La curcina es análoga a la ricina, una RIPs de tipo II, de *Ricinus communis*. Sin embargo, su toxicidad es significativamente menor que la de la ricina [Gu y col., 2015].

Atriplex hortensis L., RIPs de tipo I (denominadas hortensinas) a partir de semillas de espinaca roja de montaña también conocida como armuelle, es una especie perteneciente a la familia Amaranthaceae. Las semillas y hojas de *A. hortensis* son comestibles y se han consumido desde la antigüedad (buena fuente de proteína cruda de calidad y vitaminas). Además, los extractos de *A. hortensis* se utilizan en la medicina tradicional como tónico para la salud y diurético; además, son eficaces en el tratamiento de la gota y los tumores.

Las semillas de la espinaca roja comestible contienen cuatro RIPs de tipo I, denominadas hortensinas 1, 2, 4 y 5, las isoformas principales (hortensinas 4 y 5) son citotóxicas contra las células de glioblastoma U87MG, lo que provoca la muerte celular por apoptosis. Además, la inhibición del crecimiento de células de glioblastoma después del tratamiento con hortensinas 4 y 5 implica que las Rip podrían representar un posible adyuvante en combinación con el fármaco normalmente utilizado, temozolomida [Ragucci, 2024].

Las RIPs no están asociadas con un tejido en particular, sino que se encuentran en prácticamente todas las partes de la planta (por ejemplo, semillas, raíces, hojas, bulbos, frutos y corteza). Aunque se han reportado múltiples secuencias Rip dentro de una especie, usualmente la mayoría de estas secuencias pertenecen a la misma clase de proteínas Rip. Se han reportado varias isoformas de RIPs tipo I en *Phytolacca americana*, conocidas como proteína antiviral de la hierba carmín o PAP. Diferentes isoformas pueden ocurrir dentro del mismo tejido y con expresión diferencial durante el desarrollo. Por ejemplo, PAP-I, PAP-II y PAP-III se aíslan de hojas de primavera, principios de verano y finales de verano de *Phytolacca* [Shang y col., 2016].

Tabla 1. Aplicaciones terapéuticas de proteínas inactivadoras de ribosomas tipo I.

RIPs encontradas	Especies de plantas	Aplicación	Referencia
Tricosantina (TCS)	<i>Trichosanthes kirilowii Maxim</i>	Tratamiento en: embarazos ectópicos, molas hidatiformes, epiteloma coriónico.	[Sha y Niu, 2013]
Saporina	<i>Saponaria officinalis</i>	Estudios terapéuticos para tratar: leucemia, alzheimer y epilepsia.	[Lai y Pai, 2007] [Ancheta y Shramm, 2022]
MAP30	<i>Momordica charantia</i>	Tratamiento: virus del herpes simple (VHS), y virus de inmunodeficiencia humana (VIH)	[Polito y Bortoloti, 2016] [Sun y col., 2016]
MJ-C	<i>Mirabilis jalapa L.</i>	Estudios terapéuticos en: cáncer de piel.	[Ikawati y Widyarini, 2014]
Curcina	<i>Jatropha Curcas L.</i>	Uso en tratamientos para: cáncer de estómago, mieloma murino, carcinoma hepatocelular.	[Gu y col., 2015]

6. PROTEÍNAS INACTIVADORAS DE RIBOSOMAS TIPO II

Las RIPs de tipo II, son heterodímeros compuestos por dos cadenas polipeptídicas conectadas por enlaces disulfuro. La cadena A, que contiene la actividad catalítica, está unida a la cadena B, que tiene actividad de lectina, a través de enlaces disulfuro [Yang y Wang, 2023].

La cinamomina (bicatenaria) y la alcanforina (monocatenaria), dos nuevas proteínas inactivadoras de ribosomas (RIPs), purificadas a partir de semillas de *Cinnamomum camphora*, produjeron efectos inhibidores en células de carcinoma cultivadas. La CI50 de la cinamomina en la línea celular de hepatocarcinoma humano 7721 y la línea celular de melanoma M21 fue de 18,8 nmol y 11,7 nmol, respectivamente. La CI50 de la alcanforina en la línea celular de hepatocarcinoma humano 7721 fue de 59 nmol, mientras que la línea celular de melanoma M21 no fue susceptible a la alcanforina. Además, la cinamomina mostró un notable efecto inhibidor sobre el crecimiento del melanoma sólido en la piel del ratón desnudo [Ling y Liut, 1995].

La ricina es un componente proteico abundante de las semillas de *Ricinus communis* (semillas de ricino) que resulta extremadamente tóxico para las células de mamíferos. Consiste en un polipéptido enzimático que cataliza la escisión N-glucosídica de un residuo de adenina específico del

ARN ribosómico 28S, unido por un simple enlace disulfuro a una lectina que se une a la galactosa (célula). La actividad enzimática incapacita a los ribosomas que contienen ARN 28S depurinado para la síntesis de proteínas. La estructura molecular bipartita de la ricina le permite unirse a la superficie celular de los mamíferos, entrar por captación endocítica y transportar el polipéptido catalíticamente activo al citosol celular, donde inhibe irreversiblemente la síntesis de proteínas, causando la muerte celular [Lord y Roberts, 1994].

La abrina, obtenida de la planta *Abrus precatorius*, es una toxina glicoproteica que detiene la síntesis de proteínas mediante la inactivación irreversible de los ribosomas. Es un heterodímero compuesto por la cadena A catalíticamente activa y una cadena B similar a la lectina, por lo que se clasifica como miembro de las proteínas inactivadoras de ribosomas (RIPs) de tipo II. Las toxinas heterodímeras como la abrina, su conocida toxina hermana, la ricina, y la toxina Shiga de origen bacteriano también se conocen como toxinas A/B, ya que están compuestas por dos cadenas, A (activa) y B (de unión), unidas por un único enlace disulfuro. La abrina es 75 veces más potente que la ricina, una toxina ampliamente estudiada, y su posible uso en la guerra biológica es motivo de gran preocupación, la toxina es mortal por ingestión, inhalación o inyección, y la dosis letal varía según la vía de administración. La dosis letal estimada de abrina en humanos es de 0,1 a 1 µg/kg, y la ingestión de una o dos semillas trituradas es suficiente para causar la muerte. Se han reportado decenas de antitoxinas contra la ricina, pero apenas existen informes sobre contramedidas contra la intoxicación por abrina [Bagaria y Karande, 2014].

Si bien las RIPs tienen actividad inmunosupresora, es importante señalar que las RIPs de origen vegetal también pueden estimular el sistema inmunitario y potencialmente causar reacciones alérgicas en los pacientes. A pesar de esto, las RIPs se han utilizado en ensayos clínicos como parte de inmunotoxinas para tratar tumores malignos [Yang y Wang, 2023].

Las fascinantes actividades multimodales de las RIPs han generado desde hace mucho tiempo interés en el desarrollo de fármacos antitumorales que actúen selectivamente sobre las células tumorales. Una firme apuesta en este sentido, especialmente en el caso de las RIPs de tipo I, son las inmunotoxinas, RIPs conjugadas con anticuerpos específicos, que pueden representar opciones prometedoras para el tratamiento de diversas enfermedades y, curiosamente, contra las células infectadas por el VIH [Mohamed y col., 2014]. Las inmunotoxinas conjugadas con RIPs han mostrado una inhibición tumoral prometedora para uso clínico. Por ejemplo, las inmunotoxinas SO6 y RTA pueden matar eficazmente a los linfocitos en enfermedades relacionadas con aloinjertos [Shi y col., 2016].

Las RIPs, especialmente la PAP y la cadena A de la ricina, se han utilizado para fabricar inmunotoxinas (IT) con fines terapéuticos. Las inmunotoxinas (IT) son proteínas quiméricas que consisten en RIPs o fragmentos de RIPs y una fracción para su direccionamiento. La fracción para su direccionamiento incluye anticuerpos, citocinas, factores de crecimiento, hormonas y lectinas. Las inmunotoxinas (IT) se diseñaron inicialmente con la RIPs completa unida a un anticuerpo monoclonal (mAb) de longitud completa mediante un enlace disulfuro [Orio y Weng, 2014].

Tabla 2. Aplicaciones terapéuticas de proteínas inactivadoras de ribosomas tipo II.

RIPS encontradas	Especies de plantas	de Aplicación	Referencia
Cinamomina	<i>Cinnamomum camphora</i>	Aplicaciones en estudios de hepatocarcinoma humano, melanoma,	[Ling y Liut, 1995]
Ricina	<i>Ricinus communis</i>	Uso en estudios como antihelmíntico, antibacteriano, afrodisíaco, catártico y laxante.	[Yang y Wang, 2023]

Abrina	<i>brus precatorius</i>	Usos en el tratamiento de artritis reumatoide, osteoartritis, entre otras enfermedades de inflamación crónica.	[Vijayany Margesanm 2025]
--------	-------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------

Stirpe imaginó que las RIPs de tipo I podrían ser moléculas tóxicas ideales para ser administradas selectivamente para eliminar poblaciones celulares no deseadas y, en 1980, conjugó la gelonina con concanavalina A. Si bien la gelonina por sí sola no era tóxica para los linfocitos humanos, el complejo resultante podría intoxicarlos, ya que la conjugación le otorgaba a la gelonina la capacidad de entrar en la célula. Como transportador para facilitar la entrada de RIP tipo I a la célula, Stirpe también utilizó envolturas del virus Sendai asociadas a gelonina, inhibidor de Momordica charantia o proteína antiviral de hierba carmín, y obtuvo un nuevo tipo de agente citotóxico contra células eritroleucémicas [Shi y col., 2016].

Recientemente, un número significativo de proteínas inactivadoras de ribosomas (RIPs) reportadas poseían actividades antitumorales o antivirus ideales. Las RIPs extraídas de productos naturales, tienen la capacidad de inhibir las respuestas traduccionales hiperactivadas en las células tumorales y, por lo tanto, frenar el crecimiento tumoral [Jia y Wang, 2017].

La quimioterapia tradicional se basa principalmente en fármacos de moléculas pequeñas y suele estar acompañada de efectos secundarios graves debido a la falta de selectividad hacia los tejidos cancerosos y a su distribución indeseable en los tejidos normales.

7. ESTRATEGIAS DE ADMINISTRACIÓN DE LAS RIPs

Si bien las proteínas en general presentan ventajas destacadas sobre los fármacos de moléculas pequeñas, como una potencia inigualable, una alta especificidad para sus dianas intracelulares y una baja toxicidad, su aplicación clínica se ha visto perjudicada por varias características intrínsecas desfavorables, como su gran tamaño, hidrofobicidad, impermeabilidad de la membrana y susceptibilidad a la degradación enzimática [Ding y Zhu, 2022].

La ciencia de los materiales ha proporcionado una amplia gama de nanomateriales que se pueden utilizar como excelentes vehículos para la administración de toxinas, ya que se caracterizan por una mejor estabilidad, solubilidad y farmacocinética in vivo.

Por lo tanto, es importante desarrollar nuevos sistemas de administración de proteínas inactivadoras de ribosomas que hagan frente a los desafíos antes mencionados.

La gelonina es una toxina proteica de origen vegetal que presenta un potente efecto antitumoral mediante la inactivación de los ribosomas y la inhibición de la síntesis de proteínas, pero su baja capacidad de internalización en las células tumorales ha comprometido su potencial terapéutico. Ding y col. [2022] desarrollaron un sistema de administración intracelular de proteínas sensible a la acidez tumoral basado en gelonina funcional von tiorredoxina (Trx) y un péptido de inserción de pH bajo (pHLIP) al que denominaron (Trx-pHLIP-Gelonina, TpG), este sistema pudo entrar eficazmente en las células tumorales en condiciones ácidas y detener la proliferación mediante la activación de la apoptosis celular y la inhibición de la síntesis de las proteínas.

Jaramillo-Quintero y Contis [2015], desarrollaron una inmunotoxina de curcina conjugada con el anticuerpo Her2, evaluaron la toxicidad *in vitro* de esta inmunotoxina contra la curcina sola en líneas celulares de cáncer de mama SK-BR-3 (Her2+) y MDA-MB-231 (Her2-), y los resultados arrojaron que la inmunotoxina fue más tóxica para SK-BR-3 que la curcina pero menos tóxica para MDA-MB-231, por que la inmunotoxina podría funcionar como un posible candidato terapéutico con el cáncer SK-BR-3 (Her2+).

A pesar de esto, las RIP se han utilizado en ensayos clínicos como parte de inmunotoxinas para tratar tumores malignos. Sin embargo, cabe destacar que pueden presentarse efectos secundarios como

fiebre, náuseas, vómitos, diarrea, mialgia, aunque de forma leve o moderada, la mayoría de los TT que se han investigado clínicamente se han basado en la ricina de las semillas de la planta de ricino [Yang y Wang, 2023; Flavell y Flavell, 2022].

Sin embargo, la inmunogenicidad fuerte en las proteínas o un período de vida media corto a menudo limitan su aplicación clínica. El polietilenglicol (PEG), como modificador químico no tóxico y soluble en agua, se puede utilizar para enmascarar los sitios antigénicos para prevenir la unión de anticuerpos y reducir la antigenicidad [Sun y col., 2016]. El PEG se utiliza para modificar diversas proteínas. Las proteínas injertadas con PEG presentan mayor estabilidad, menor inmunogenicidad y mayor vida circulante. Además, los conjugados de PEG son más resistentes a la proteólisis, y la actividad *in vivo* en ocasiones puede aumentar a pesar de una reducción en la actividad *in vitro* [Arpicco y Dosio, 2002; Wang y col., 2004].

Li et al., 2009, purificó Rip de las semillas de melón amargo y luego lo modificó con PEG. La PEGilación de RIPs (RIPs-PEG) no afectó significativamente su actividad antitumoral, medida mediante el ensayo de caspasa-3, la fragmentación del ADN y el análisis morfológico. Es más, el análisis de inmunogenicidad *in vivo* indicó que el Rip-PEG desencadenó una respuesta inmunitaria mucho más débil, como lo indica una disminución del 70 % en los niveles séricos de IgG específica para el antígeno [Lin y Xu, 2021].

La PEGilación de liposomas mejora no solo la estabilidad y el tiempo de circulación, sino también la capacidad de focalización pasiva en los tejidos tumorales, mediante un proceso conocido como efecto de retención de permeación mejorada, capaz de mejorar los efectos terapéuticos y reducir la toxicidad del fármaco encapsulado [Hatakeyama y Akita, 2013].

Los miembros de RIPs se han fusionado o conjugado químicamente con diferentes transportadores adecuados, como ligandos de unión a células, inhibidores de proteasa, hormonas, etc., para crear agentes citotóxicos bifuncionales específicos. Los conjugados artificiales consistentes en RIPs (p. ej., saponina-S6, ricina, etc.) conjugados con transferrina revelaron, aunque mediante diferentes mecanismos de enrutamiento intracelular, una citotoxicidad selectiva en diversas líneas celulares cancerosas o malignas [Zheng y co., 2013].

La curcina puede inhibir la proliferación de células tumorales y promover la apoptosis de células tumorales, pero su citotoxicidad no es selectiva para tumores ni células normales. Para potenciar la capacidad antitumoral de la curcina, se fusionó con ella un péptido de unión al receptor de transferrina (TfR). La proteína de fusión curcina-TfRBP9 tuvo efectos inhibidores significativos de la proliferación en las células HepG2 [Zheng y col., 2013].

En los últimos años, se han realizado considerables investigaciones en el campo de los biomateriales, proporcionando un número cada vez mayor de plataformas para el desarrollo de una amplia gama de materiales inteligentes para controlar la administración y liberación de fármacos específicos.

Las nanopartículas de oro (NP de Au) han recibido cada vez más atención en el área de los nanofármacos, ya que una variedad de fármacos, proteínas, anticuerpos, péptidos, etc., pueden conjugarse con ellas. Además de su facilidad de síntesis, control sobre la forma/tamaño y los modos relativamente fáciles de modificaciones de la superficie, las NP de Au han sido ampliamente aclamadas por sus características térmicas, que podrían aprovecharse eficientemente para aplicaciones de ablación fototérmica [Mohamed y col., 2014].

Recientemente, se ha informado de la posibilidad emergente de producir nanocápsulas como un sistema eficiente de administración de fármacos *in vivo*. En este sistema, también las RIPs han demostrado ser un tema óptimo para esta novedosa nanotecnología, como en la encapsulación de MAP 30 en matrices sintetizadas químicamente de fosfatidilcolinas de huevo de zirconio (EPC) y soja (SPC). Estas matrices se obtuvieron mezclando lípidos (EPC) o (SPC) en solución acuosa de ZrCl y exhibieron agregados laminares y granulares con diámetros de aproximadamente 70 nm. La

encapsulación posterior de MAP30 produjo nanopartículas tóxicas y antimicrobianas fuertes y una liberación de Rip dependiente de la actividad de la fosfolipasa A (PLA) endógena [Qiaoy Jian, 2008]. Otra sistema de administración de fármacos son los liposomas, la mayoría son pequeños, sin carga y formados a partir de la unión de lípidos saturados largos en combinación con lípidos insaturados. La encapsulación de muérdago (ML) una RIP II en nanocápsulas liposomales generadas a partir de extrusión, fue estudiada variando la composición lipídica para registrar el efecto en las propiedades físicas: atrapamiento, tamaño medio, morfología y estabilidad, con el fin de determinar las presiones mínimas requeridas, generando liposomas de tamaño medio entre 120 y 200 nm de diámetro, a partir de las presiones mínimas se determinaron las tensiones de lisis de la capa que ayuda en conocer la resistencia mecánica de las liposomas [Manojlovic y Winkler, 2008]

Una biblioteca de materiales catiónicos similares a lípidos (denominados "lipíoides") fue diseñada y empleada para formar nanocomplejos con proteínas para administración intracelular. La saponina y la ARNasa A se utilizaron como proteínas efectoras citotóxicas representativas, que cuando se complejaron con estos lipíoides mostraron una internalización celular eficiente. Un lipíodoide representativo EC16-1 fue seleccionado para el ensayo de administración de proteínas y, cuando se administró a varias células cancerosas, se demostró que la saponina era mucho más activa en todas las líneas celulares probadas. Las nanopartículas que contienen saponina inhibieron la proliferación celular *in vitro* y suprimieron el crecimiento tumoral en un modelo murino de cáncer de mama [Fabbrini, 2017].

8. CONCLUSIONES

La proteína más representativa de las RIPs es la ricina catalogada como arma biológica, sin embargo aún hay muchas especies que no se han investigado a profundidad dejando una brecha amplia por resolver en el campo de las proteínas inactivadoras de ribosomas. El fascinante mecanismo de acción de las RIPs sobre la inhibición de la síntesis de células las coloca como una posible alternativa en el tratamiento de diversas enfermedades como por ejemplo la tricosantina (RIPs tipo I) utilizada para tratamientos en embarazos ectópicos, la MAP30 (RIPs tipo I) que ha sido objeto de estudio para tratar VIH o bien la abrina (RIP tipo II) utilizada para tratar artritis reumatoide. Las RIPs por sí solas no cuentan con una forma para determinar qué tipo de células deben atacar para desactivar los ribosomas e inhibir la síntesis proteica, esto provoca un daño general tanto a órganos sanos como a órganos enfermos. Por lo tanto, desarrollar estrategias para superar eficazmente las barreras biológicas es una tarea necesaria para el éxito de terapias basadas en proteínas contra enfermedades como el cáncer. Las barreras que regularmente protegen nuestro cuerpo podrían de algún modo contribuir en las limitaciones para que posibles fármacos anticancerígenos, como las RIPs, lleguen con éxito al sitio objetivo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo económico mediante la Beca de estudiante otorgada a E. Flores por parte de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) para el desarrollo de este proyecto.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores manifiestan que no existe conflicto de intereses.

9. REFERENCIAS

Ancheta, L., Shramm, P. (2022) Saporin as a Commercial Reagent: Its Uses and Unexpected Impacts in the Biological Sciences—Tools from the Plant Kingdom. *Toxins*, 14(3),184, DOI: 10.3390/toxins14030184

- Arpicco, S., Dosio, F. (2002). Novel Poly(ethylene glycol) Derivatives for Preparation of Ribosome-Inactivating Protein Conjugates. *Bioconjugate Chem*, 13, 757-765. Bioconjugate Chem. 2002, 13, 757–765 757 10.1021/bc015578s
- Bagaria, S., Karande, A. A. (2014). Abrin and Immunoneutralization: A Review. *Toxinology*, 9, 1-21. 10.1007/978-94-007-6645-7_9-1
- Bolognesi, A., Bortolotti, M. B., Battelli, M. G. (2017). Hyperuricaemia, Xanthine Oxidoreductase and Ribosome-Inactivating Proteins from Plants: The Contributions of Fiorenzo Stirpe to Frontline Research. *Molecules*, 22(2), 206. 10.3390/molecules22020206
- De Zaeytijd, J., Rougé, P., Smagghe, G. (2019). Structure and Activity of a Cytosolic Ribosome-Inactivating Protein from Rice. *Toxins*, 11(6), 325. 10.3390/toxins11060325
- Ding, G.-B., Zhu, C. (2022). Molecularly engineered tumor acidity-responsive plant toxin gelonin for safe and efficient cancer therapy. *Bioactive Materials*, 18, 42-55. 10.1016/j.bioactmat.2022.02.001
- Fabbrini, M. S. (2017). Proteínas inactivadoras de ribosomas vegetales: avances, desafíos y aplicaciones biotecnológicas (y algunas digresiones). *Toxins*, 9(10). 10.3390/toxins9100314
- Ferreras, J. M., Citores, L., Iglesias, R. (2011). Use of Ribosome-Inactivating Proteins from Sambucus for the Construction of Immunotoxins and Conjugates for Cancer Therapy. *Toxins*, 3(5), 420-441. 10.3390/toxins3050420
- Flavell, D. J., Flavell, S. U. (2022). Plant-Derived Type I Ribosome Inactivating Protein-Based Targeted Toxins: A Review of the Clinical Experience. *Toxins*, 14(8), 563. 10.3390/toxins14080563
- Gu, K., Tian, D., Mao, H. (2015). Development of marker-free transgenic *Jatropha curcas* producing curcumin-deficient seeds through endosperm-specific RNAi-mediated gene silencing. *BMC Plant Biology*, 15(242). 10.1186/s12870-015-0625-z
- Hatakeyama, H. H., Akita, H. (2013). The Polyethyleneglycol Dilemma: Advantage and Disadvantage of PEGylation of Liposomes for Systemic Genes and Nucleic Acids Delivery to Tumors. *Biol. Pharm. Bull.*, 36(6), 892–899.
- Ikawati, Z., Widyarini, S. (2014). Therapeutic effect of a ribosome-inactivating protein from *mirabilis jalapa* l. Against mouse skin cancer induced by co-carcinogen dimethylbenzanthracene and uvb radiation. *Journal of Pharmaceutical Research V*, 13(4), 111-115.
- Jaramillo-Quintero, L. P., Contis Montes de Oca, A. (2014). Cytotoxic effect of the immunotoxin constructed of the ribosome-inactivating protein curcumin and the monoclonal antibody against Her2 receptor on tumor cells. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 79(6), 896–906. 10.1080/09168451.2015.1006572
- Jia, C., Wang, S. (2017). Improving Soluble Expression of Curcumin- Transferrin Receptor-binding Peptide Fusion Protein with Glutathione Transferase- Small Ubiquitin-related Modifier System. *J Pharm Biomed Sci*, 7(2), 23-28. 10.20936/JPBMS/170202
- Jia, C., Wang, S. (2017). Improving Soluble Expression of Curcumin- Transferrin Receptor-binding Peptide Fusion Protein with Glutathione Transferase- Small Ubiquitin-related Modifier System. *J Pharm Biomed Sci*, 7(2), 23-28. 10.20936/JPBMS/170202

- Lai, P.-S., Pai, C.-L. (2007). Enhanced cytotoxicity of saporin by polyamidoamine dendrimer conjugation and photochemical internalization. *Wiley Periodicals*. 10.1002/jbm.a.31760
- Lin, Y., Xu, L. (2021). Ribosome-Inactivating Proteins of *Bougainvillea glabra* Uncovered Polymorphism and Active Site Divergence. *Toxins*, 13(5). 10.3390/toxins13050331
- Ling, J., Liut, W. (1995). Cytotoxicity of Two New Ribosome-Inactivating Proteins, Cinnamomin and Camphorin, to Carcinoma Cells. *CELL BIOCHEMISTRY AND FUNCTION*, 14, 157-167
- Lord, J. M., Roberts, L. M. (1994). Ricin: structure, mode of action, and some current applications. *FASEB Journal*, 8. Recuperado de www.fasebj.org
- Lu, J.-Q., Zhu, Z. N. (2020). Engineering of Ribosome-inactivating Proteins for Improving Pharmacological Properties. *Toxins*, 12(3), 167. 10.3390/toxins12030167
- Manojlovic, V., Winkler, K. (2008). Membrane interactions of ternary phospholipid/cholesterol bilayers and encapsulation efficiencies of a RIP II protein. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 64(15), 284-296. 10.1016/j.colsurfb.2008.02.001
- Maqsood, Q., Sumrin, A., Mahnoor, M. (2021). Potential use of Ribosome Inactivating Proteins (RIPS) as Cancer Therapeutic and its Indigenous Sources. *Medical and Health Sciences Research*, 11, 20-28
- Miranda, A., Ismail, H. (2023). Double-Coated Nanoparticle of Ribosome Inactivating Protein (RIP) from *Mirabilis jalapa* L. prepared from Chitosan-Sodium Tripolyphosphate and Alginate-Calcium Chloride: The New Strategy for Protein Drug in Oral Delivery. *BIO Web of Conferences*, 75(04001), 7. DOI:0.1051/bioconf/20237504001.
- Mohamed, M. S., Veerananarayanan, S., Minegishi, H. (2014). Cytological and Subcellular Response of Cells Exposed to the Type-1 RIP Curcin and its Hemocompatibility Analysis. *SCIENTIFIC REPORTS*, 4(5747). 10.1038/srep05747
- Orio, R. G., Weng, A. (2014). Immunotoxins Constructed with Ribosome-Inactivating Proteins and their Enhancers: A Lethal Cocktail with Tumor Specific Efficacy. *Current Pharmaceutical Design*, 20(20), 6584-6643. 10.2174/1381612820666140826153913
- Park, S.-W., Vepachedu, R., Sharma, N. (2004). Ribosome-inactivating proteins in plant biology. *Planta*, 219, 1093–1096. 10.1007/s00425-004-1357-8
- Peumans, W. J., Hao, Q. H. (2001). Ribosome-inactivating proteins from plants: more than RNA N-glycosidases *The FASEB Journal*, 15, 1493-1506. 0892-6638/01/0015-1493
- Polito, L., Bortolotti, M. (2016). Plants Producing Ribosome-Inactivating Proteins in Traditional Medicine. *Molecules*, 21(11), 1560. 10.3390/molecules21111560
- Qiao, Y., Jian, F. (2008). Bioconjugación de monofosfato de uridina de circonio: aplicación a la electroquímica directa de la mioglobina. *Biosensores y Bioelectrónica*, 23(8), 1244-1249. 10.1016/j.bios.2007.11.008
- Ragucci, S., Russo, V., Clemente, A. (2024). Hortensins, Type 1 Ribosome-Inactivating Proteins from Seeds of Red Mountain Spinach: Isolation, Characterization, and Their Effect on Glioblastoma Cells. *Toxins*, 16(3), 135. 10.3390/toxins16030135

- Reyes-Alvarado. (2008). "Proteína Inactivadora de los Ribosomas de *Streptomyces coelicolor*". [Tesis de grado no publicada]. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Schep, L. J., Temple, W. A. (2009). Ricin as a weapon of mass terror — Separating fact from fiction. *Environment International*, 35(8), 1267-1271. 10.1016/j.envint.2009.08.004
- Seenivasan, P., Balasubramanian, R. B. (2024). Ribosome Inactivating Proteins (RIPs) in Countering Snake Venom: A Novel Therapeutic Opportunity and Challenges. *Preprints*. 10.20944/preprints202409.2315.v1
- Sha, O., & Niu, J. (2013). Anti-tumor action of trichosanthin, a type 1 ribosome-inactivating protein, employed in traditional Chinese medicine: a mini review. *Cancer Chemother Pharmacol*, 71, 1387–1393. 10.1007/s00280-013-2096-y
- Shang, C. J., Rougé, P., Van Damme, L. J. (2016). Ribosome Inactivating Proteins from Rosaceae. *Molecules*, 21(8), 1105. 10.3390/molecules21081105
- Sharma, A., Gupta, S. (2022). Expanding role of ribosome-inactivating proteins: From toxins to therapeutics. *International Union of Biochemistry and Molecular Biology.*, (75), 82-96. 10.1002/iub.2675
- Shi, W.-W., Sze Mak, A. N.-S. M., Wong, K.-B. (2016). Structures and Ribosomal Interaction of Ribosome-Inactivating Proteins. *Molecules*, 21(11), 1588. 10.3390/molecules21111588
- Srivastava, M., Gupta, S. K. (2011). Structure prediction and binding sites analysis of Curcin protein of *Jatropha curcas* using computational approaches. *J Mol Model*, 18, 2971–2979. 10.1007/s00894-011-1320-0
- Stirpe, F., Barbieri, L. (1986). Ribosome-inactivating proteins up to date. *FEBS*, 195(1), 2.
- Sun, Y., Sun, F., Li, J. (2016). Mono-PEGylation of Alpha-MMC and MAP30 from *Momordica charantia* L.: Production, Identification and Anti-Tumor Activity. *Molecules*, 21(11), 1457. DOI:10.3390/molecules21111457
- Sun, Y., Sun, F., Li, J. (2016). Mono-PEGylation of Alpha-MMC and MAP30 from *Momordica charantia* L.: Production, Identification and Anti-Tumor Activity. *Molecules*, 21(11), 1457. DOI:10.3390/molecules21111457
- Tang, Y., Liang, J. (2017). Co-Delivery of Trichosanthin and Albendazole by Nano-Self- Assembly for Overcoming Tumor Multidrug-Resistance and Metastasis. *Applied materials & interfaces*, 9, 26648–26664. 10.1021/acsami.7b05292
- Vijayan, S., Margesan, T. (2025). The potential of *Abrus precatorius* leaves in arthritis alleviation computational approaches through IC-MS analysis. *National Library of Medicine*. 11(1):2483131, DOI: 10.1080/20565623.2025.2483131
- Walsh, M. J., E Dodd, (2013). Ribosome-inactivating proteins, Potent poisons and molecular tools. *Virulence*, 4, 774-784. 10.4161/viru.26399
- Wang, J.-H., Tam, S.-C., Huang, H. (2004). Site-directed PEGylation of trichosanthin retained its anti-HIV activity with reduced potency in vitro. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 317, 965–971. 10.1016/j.bbrc.2004.03.139

Wentao Jia, W., Jia, W. J. (2023). The role of dysregulated mRNA translation machinery in cancer pathogenesis and therapeutic value of ribosome-inactivating proteins. *Reviews on Cancer*, 1878. 10.1016/j.bbcan.2023.189018

Yang, Y., Wang, X. (2023). Opportunities and challenges for ribosome-inactivating proteins in traditional Chinese medicine plants. *Toxicon*, 234(107278). 10.1016/j.toxicon.2023.107278

Zhang, Y., Yang, Q., Li, C. L. (2017). Curcin C, a novel type I ribosome-inactivating protein from the post-germinating cotyledons of *Jatropha curcas*. *Amino Acids*. 10.1007/s00726-017-2456-8

Zheng, Q., Xiong, Y.-L., Zhang, Q.-H. (2013). Expression of curcin–transferrin receptor binding peptide fusion protein and its anti-tumor activity. *Protein Expression and Purification*, 89, 181-188. 10.1016/j.pep.2013.03.009

PROPUESTA DE MÓDULO DIDÁCTICO PARA CURSOS BÁSICOS DE ELECTRICIDAD USANDO IMPRESIÓN 3D.

PROPOSAL FOR A DIDACTIC MODULE FOR BASIC ELECTRICAL COURSES USING 3D PRINTING.

Emmanuel López-Muñoz, Brian Manuel González-Contreras*.

Universidad Autónoma de Tlaxcala, Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Ingeniería Mecánica.

*Email: brianmanuel.gonzalez@uatx.mx.

Recibido: 24-Noviembre-2025

Aceptado: 19-Diciembre-2025

RESUMEN

Esta propuesta presenta el diseño y manufactura de un módulo didáctico para apoyar la enseñanza por medio de prácticas de laboratorio del área de circuitos eléctricos usando impresión 3D del tipo Fabricación por Filamento Fundido. El módulo está inspirado en uno comercial pero obsoleto, pues se busca proporcionar alternativas de reemplazo del equipo dentro del laboratorio de ingeniería mecánica, en el área eléctrica. Se presenta el diseño del módulo haciendo uso de las metodologías de diseño de ingeniería mecánica y considerando prototipado rápido. El módulo se diseñó usando AutoCAD 2025 versión estudiantil, se laminó en Creality Print y se manufacturó usando la impresora ENDER-3 V3 SE con filamento termoplástico de ácido poliláctico. Se muestran las especificaciones finales del módulo diseñado, así como los valores de impresión que permitieron lograr un módulo funcional.

Palabras Clave: circuitos eléctricos, diseño, impresión 3D, manufactura aditiva, módulo didáctico.

ABSTRACT

This proposal presents the design and manufacture of a didactic module to support teaching through laboratory practices in the area of electrical circuits using 3D printing by Fused Filament Manufacturing, within the approach of Science, Technology, Engineering and Mathematics. The development of the module is presented making use of engineering design methodologies considering rapid prototyping. The module was designed using AutoCAD 2026 student version, laminated in Creality Print and manufactured using ENDER-3 V3 SE printer with polylactic acid thermoplastic filament. The final specifications of the designed module are shown, as well as the print values that allowed to achieve a functional module.

Keywords: additive manufacturing, design, didactic module, electrical circuits, 3D printing.

1. INTRODUCCIÓN

La industria 4.0 es un tema de gran relevancia actualmente, pero debe generar un mayor interés en el ingeniero Mecánico, ya que representa la cuarta revolución industrial (Rana y Rathore, 2023). Esta evolución, por periodo de años, se muestra en la Figura 1.

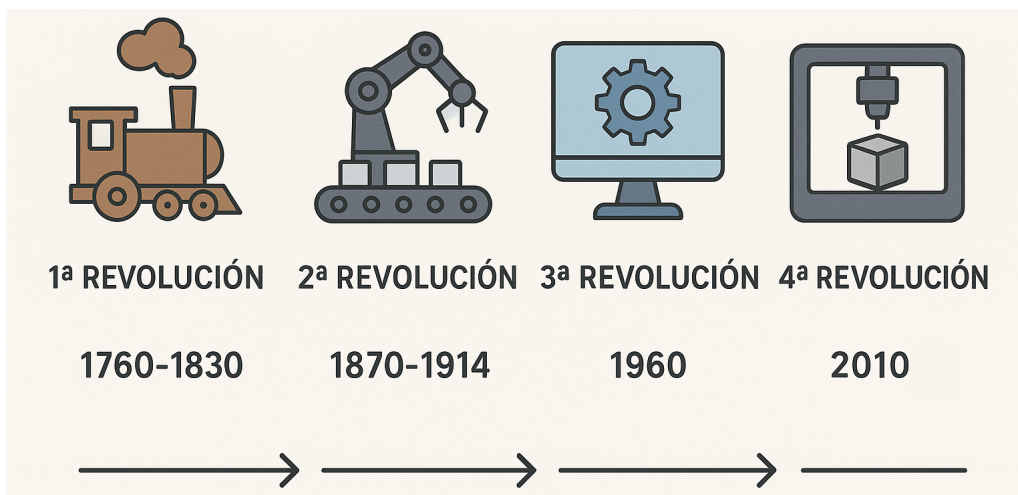


Figura 1. Esquema representativo de la evolución de las revoluciones industriales.

Está caracterizada por la integración de tecnologías avanzadas en los procesos de fabricación y de producción, combinando los sistemas físicos y digitales para la automatización a partir de los datos recabados. El gobierno alemán introdujo por primera vez el término Industria 4.0 (I4.0) en la Feria de Hannover de 2011. Se define como la integración vertical y horizontal de activos físicos en un ecosistema digital (Rana y Rathore, 2023). Se centra en la automatización avanzada, la robótica y el aumento de la conectividad entre máquinas (espacio ciberfísico) y personas, el uso del análisis de datos, el aprendizaje automático, la inteligencia artificial, los sistemas virtuales y las tecnologías de sensores. Se trata de una perspectiva integradora que utiliza la digitalización y el espacio ciberfísico para mejorar la toma de decisiones y el rendimiento (Gibson y col., 2015; Rana y Rathore, 2023). La I4.0 se compone de nueve tecnologías que son los motores clave de la automatización y la digitalización industrial (Rana y Rathore, 2023):

- Internet de las cosas. Conexión de máquinas, dispositivos y sistemas para recopilar y compartir datos en tiempo real, mejorando la eficiencia y la toma de decisiones.
- Datos masivos (*Big Data*) y su análisis. Uso de grandes volúmenes de datos generados en tiempo real para optimizar operaciones, predecir fallos y personalizar productos.
- Inteligencia Artificial (IA) y aprendizaje máquina (*machine learning*). Implementación de algoritmos que permiten a las máquinas aprender y adaptarse, automatizando procesos complejos.
- Robótica avanzada. Uso de robots autónomos y colaborativos (cobots) que trabajan junto a humanos para realizar tareas con precisión y seguridad.
- Impresión 3D (manufactura aditiva). Creación de prototipos y productos personalizados de manera eficiente, reduciendo costos y tiempo.
- Ciberseguridad. Protección de sistemas conectados contra amenazas digitales para garantizar la integridad de los datos y operaciones.

- Realidad Aumentada. Uso de tecnologías visuales para mejorar la capacitación, la supervisión de procesos y el mantenimiento de equipos.
- Computación en la nube y computación periférica. Gestión y procesamiento de datos mediante plataformas en la nube y tecnologías de procesamiento locales para una respuesta rápida.

Tomando en cuenta el listado previo, el uso de la impresión 3D tiene relevancia actual no solo para mejorar diseños y llevarlos a una realidad útil, sino que permite mejorar y actualizar material de apoyo didáctico. Tomando en cuenta la falta de renovación de los equipos para pruebas eléctricas en el laboratorio de mecánica, se plantea el rediseño estratégico del equipo “módulo eléctrico didáctico” de la mano de las actuales tecnologías, como la impresión 3D.

1.1 Impresión 3D por FDM

La impresión 3D por FDM® (Modelado por Deposición Fundida) es una de las tecnologías más comunes en la manufactura aditiva (FDM, 2021). Como la anterior se trata de una marca registrada, en ocasiones se prefiere el uso de la descripción de Fabricación por Filamento Fundido (FFF) y describe igualmente el tipo de impresión 3D por extrusión (Camburn y col., 2017). Utiliza un filamento termoplástico que se funde y deposita capa por capa para construir un objeto tridimensional a partir de un diseño digital (Gibson y col., 2015).

En cuanto a los materiales utilizados, se consideran los filamentos termoplásticos como PLA (Ácido Poliláctico), ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), PETG (Tereftalato de Polietileno Glicol), TPU (poliuretano termoplástico) y materiales compuestos con madera (resinas), metal o fibra de carbono (Alfattni, 2022; Garcia-Dominguez y col., 2020). Los filamentos vienen en carretes y se funden mediante un extrusor a temperaturas controladas. El filamento fundido se extruye a través de una boquilla caliente, depositando material en un patrón definido capa por capa hasta formar el objeto. El funcionamiento descrito se apoya en la Figura 2.

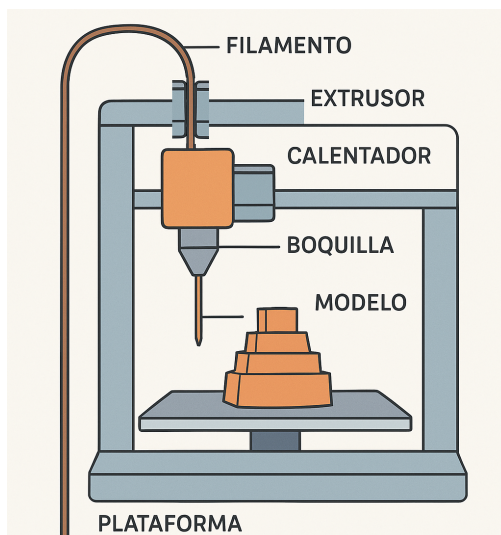


Figura 2. Representación gráfica simple de los componentes básicos de una impresora 3D genérica.

El proceso de impresión sigue la secuencia genérica de toda manufactura aditiva, la cual se muestra en la Figura 3. El diseño del objeto se crea en software CAD, se exporta a formato *STL* (estereolitografía o Lenguaje triangular estándar) y se convierte a formato *G-code* mediante un software de laminado (Saleh y col., 2021).

Existen diferentes características dentro del uso de este tipo de manufactura (Camburn y col., 2017; García-Domínguez y col., 2020; Gibson y col., 2015). Entre las ventajas, limitaciones y aplicaciones pueden destacarse las siguientes.

Ventajas:

- Accesibilidad: es la tecnología de impresión 3D más económica y ampliamente utilizada.
- Versatilidad: amplia variedad de materiales disponibles.
- Personalización: ideal para prototipos y modelos únicos.
- Sostenibilidad: menos desperdicio de material comparado con técnicas sustractivas.

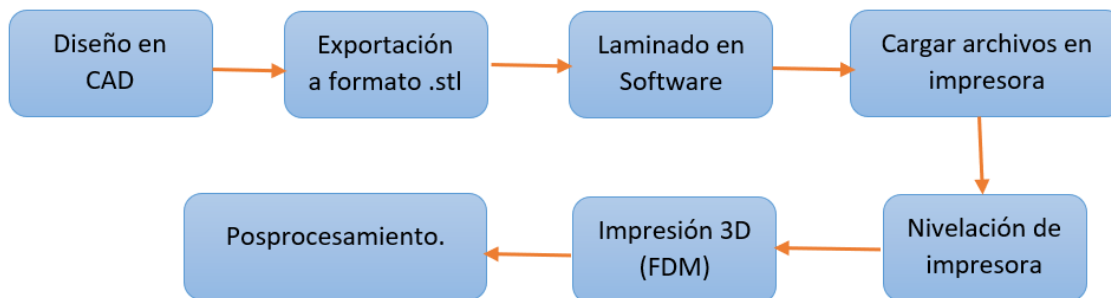


Figura 3. Etapas generales del proceso de impresión 3D.

Limitaciones:

- Resolución limitada: las capas pueden ser visibles, lo que afecta el acabado superficial.
- Propiedades anisotrópicas: la resistencia del objeto puede variar dependiendo de la orientación de las capas.
- Velocidad: puede ser más lento que otros métodos para piezas complejas o grandes.
- Requerimientos de soporte: los diseños con voladizos extremos necesitan estructuras de soporte adicionales que deben removerse y post-procesarse.

Aplicaciones:

- Prototipado rápido: ideal para validar diseños y conceptos.
- Educación: herramienta clave en proyectos que integran la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas (STEM, por sus siglas en inglés) para enseñar manufactura y diseño.
- Producción de piezas finales: en casos donde la personalización o cantidades pequeñas sean claves.
- Modelado arquitectónico y artístico: creación de maquetas y piezas decorativas.

1.2 La importancia de los equipos de laboratorio

Ante la problemática de la infraestructura y el equipamiento que enfrentan varias instituciones de educación media superior y superior, se buscan estrategias de enseñanza bajo una serie de impactos y de recomendaciones dadas por la UNESCO y dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Moran, 2025), con el objetivo 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos. Igualmente, dentro de los objetivos de los Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces, 2025), donde el Programa Nacional Estratégico Educación busca desarrollar metodologías educativas y materiales didácticos que

propicien la inclusión social de las personas. En este sentido, resulta relevante utilizar tecnologías de vanguardia que promuevan y permitan desarrollar módulos de bajo costo para ir reemplazando o sustituyendo el equipo que se encuentra obsoleto dentro de los laboratorios de nuestro entorno. Esto promueve, al mismo tiempo, la integración y el desarrollo de materias científicas y técnicas en un único marco interdisciplinar. La integración anterior se conoce como la educación *STEM* (*Science, Technology, Engineering and Mathematics* - Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), que es una pedagogía de aprendizaje en la que la aplicación de conocimientos y habilidades se integra a través de proyectos o problemas contextualizados (Kelley y Knowles, 2016).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se inicia el diseño de los módulos considerando como base los dispositivos comerciales de la marca LabVolt de Festo (Festo Didactics, 2025), que son comunes en los sistemas de educación medio superior y superior de México. Enseguida se consideran los elementos y la metodología que se describen a continuación.

2.1. Manufactura por impresión 3D

Para el desarrollo de este proyecto, se utilizó una impresora 3D de la marca Creality (ENDER-3 V3 SE), mientras que el filamento de polímero termoplástico empleado es el PLA, ampliamente utilizado y recomendado para la manufactura de prototipos (Saleh y col., 2021). Las características de la impresora y del material PLA empleados en este proyecto se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características y valores para la impresora Creality y el material PLA.

Características de la impresora ENDER-3 V3 SE		Características del filamento PLA (ácido poliláctico)	
Característica	Valores o especificación	Parámetro	Valor o especificación
Volumen de impresión	220 × 220 × 250 mm	Temperatura de impresión	190 – 230 °C
Diámetro de boquilla	0.4 mm	Punto de fusión	150 °C
Altura de capa	0.1 – 0.35 mm	Temperatura de cama	40 – 50 °C
Exactitud de impresión	±0.1 mm	Resistencia a la tracción	≥ 60 MPa
Consumo de potencia	350 W	Módulo de flexión	≥ 60 MPa
Fuerza de extrusión	80 N	Diámetro	1.75 mm
Extrusión	Directa	Agrietamiento	≥ 30%
Engranaje	Doble	Temperatura de deflexión	≥ 60 °C
Materiales	PLA, PETG, TPU	Temp. de transición vítrea	≥ 50 °C

En cuanto al software de diseño y dibujo asistido por computadora (CAD) se emplea AutoCAD 2025, en versión estudiantil, que permite crear y editar dibujos y modelos 2D y 3D de forma precisa. Para impresión se usó una impresora 3D de la marca Creality, que contiene el software de laminado Creality Print que se basa en el OrcaSlicer.

2.2. Metodología de diseño en prototipado rápido

La secuencia seguida para desarrollar el módulo propuesto considera dos aspectos: el proceso de diseño de ingeniería (Wickert y Lewis, 2013) y el de prototipado rápido (Gibson y col., 2015). El primero inicia con un diseño preliminar que irá mejorándose hasta lograr una validación del producto. Esto se ilustra en la Figura 4.



Figura 4. Etapas generales del proceso de impresión 3D.

El prototipado rápido (Gibson y col., 2015) se orienta en dimensionar y dar forma a productos antes de ser fabricados, con el fin principal de cumplir requisitos mecánicos y satisfacer las necesidades para las que han sido concebidos, de esta forma se cumple el diseño de ensamblajes y de planos; se apoya principalmente en el software CAD. El proceso se ilustra en la Figura 5.

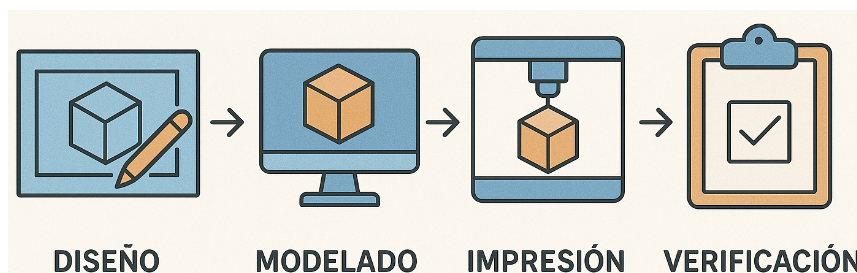


Figura 5. Etapas generales del proceso de prototipado rápido.

El proceso de diseño 3D en AutoCAD se describe brevemente enseguida (Camburn y col., 2017):

- Se comienza configurando el espacio de trabajo a "Modelado 3D", dibujando la base en 2D o creando primitivas 3D (caja, cilindro, etc.) y luego utilizando herramientas como EXTRUIR para darles altura.
- Para manipular y visualizar el objeto, se emplean comandos de visualización como 3DORBITA y el cubo de visualización para cambiar el ángulo y estilo visual.
- Pueden ajustarse estilos visuales para ver el modelo de diferentes maneras. Asimismo, poder refinar y finalizar piezas. Se utilizan operaciones de sólido para combinar o sustraer volúmenes y crear formas más complejas. Igualmente, para añadir detalles más finos tales como bisels (empalmes), chaflanes, o extrusiones de planos, se usan comandos especiales.
- El renderizado genera una imagen estática o animación de alta calidad del modelo final. Mientras que el exportado permite guardar el modelo en el formato de archivo adecuado para su uso posterior, ya sea para planos arquitectónicos, fabricación u otras aplicaciones.

El programa de laminado, también conocido como *slicer*, es un software esencial en el proceso de impresión 3D. Su función principal es convertir un modelo 3D digital (el archivo STL) en instrucciones

que la impresora 3D pueda entender y ejecutar para crear físicamente el objeto, capa por capa. Las etapas de este proceso son (Camburn y col., 2017; Garcia-Dominguez y col., 2020):

- División en capas. Divide el modelo 3D en capas horizontales o rebanadas para que la impresora pueda imprimirlo capa por capa.
- Generación de trayectorias de impresión. Calcula la trayectoria exacta que seguirá la boquilla de impresión para depositar el material de manera precisa en cada capa.
- Configuración de parámetros. Permite a los usuarios configurar una serie de parámetros clave, como la altura de capa, la densidad de relleno, la velocidad de impresión y la temperatura del extrusor y la cama caliente. Estos ajustes afectan la calidad y el tiempo de impresión.
- Generación de soportes. Puede generar estructuras de soporte para partes que se imprimen en el aire para evitar que se caigan durante la impresión.
- Vista previa y simulación. Algunos laminadores ofrecen una vista previa o simulación de la impresión para que los usuarios puedan ver cómo se imprimirá el modelo y detectar posibles problemas antes de imprimir físicamente.
- Generación de Código G. Convierte todas las instrucciones en un archivo de código (programación) geométrico conocido como Código G, que es un conjunto de comandos que la impresora 3D puede entender y ejecutar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño inicial incluye considerar como base el módulo que ya existe en el laboratorio, pero se consideran aspectos de facilidad de conexión y ensamblaje, debido a que se trata de material plástico. Para la cara frontal, aquella en donde el usuario aprendiz observa de qué se trata el módulo y en donde se encuentran los terminales de conexión, se realizó la propuesta que se muestra en la imagen izquierda de la Figura 6. Se ilustra el símbolo del resistor y el interruptor asociado a cada uno. Los diseños finales elaborados en AutoCAD se muestran en la parte derecha de la Figura 6. Se presentan las vistas acotadas en donde se incluyeron cejas y pestañas que permitan un ensamblaje adecuado y con consideración del material plástico que se emplearía en la impresión final.

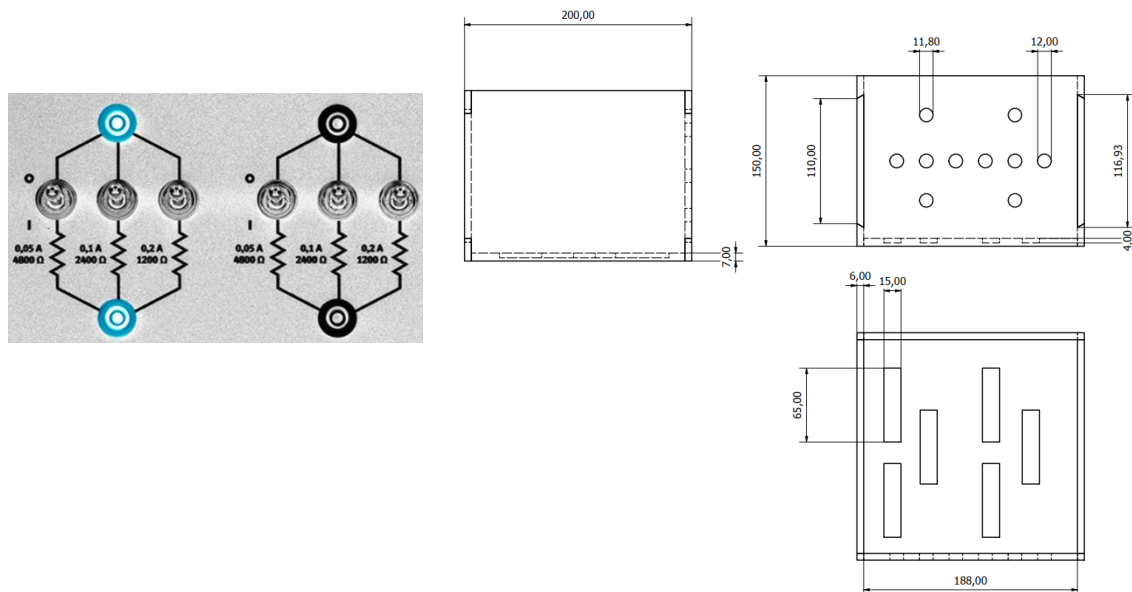


Figura 6. Módulo de resistencias: a la izquierda se muestra la descripción gráfica de lo que se desarrolla, a la derecha se muestran las vistas acotadas del diseño propuesto, con cotas y dimensiones.

Siguiendo las etapas del proceso de impresión 3D, el laminado requiere definir los parámetros de dos aspectos principales: propiedades de temperatura relacionadas con el filamento y ajustes de impresión por capas. En esta etapa se definen valores finales después de pruebas heurísticas, porque el filamento es susceptible a las temperaturas del entorno y porque cada fabricante presenta en sus filamentos ligeras diferencias en cuanto a los puntos de fusión y de impresión. Por ejemplo, la Figura 7 muestra algunas de las pruebas que tuvieron que hacerse antes de establecer los parámetros finales para lograr la manufactura adecuada de piezas, no solo en material, si no en acabado y dimensionamiento, tal como lo establecen las secuencias mostradas en las Figuras 4 y 5.



Figura 7. Pruebas de impresión para determinar los parámetros adecuados de laminación del filamento.

La imagen de la izquierda de la Figura 7 muestra el fenómeno de deformación (*warping*) debido a temperaturas bajas en la cama de impresión lo que provoca poca adherencia a la misma; mientras que la imagen derecha de la misma Figura 7 muestra la impresión con parámetros adecuados. Los parámetros finamente usados para imprimir las partes del módulo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de impresión finalmente usados.

Parámetros del filamento		Parámetros de impresión	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Diámetro de la boquilla	4 mm	Altura de capa	0.28 mm
Temperatura extrusor	215 °C	Relleno	15 %
Grosor del filamento	1.75 mm	Patrón de relleno	Panal
Temperatura cama	175 °C	Grosor de paredes	3 mm

Finalmente, el diseño que considera los elementos eléctricos que se deben montar en la cara frontal del módulo y las caras que lo constituyen, se muestra a la izquierda de la Figura 8, en donde se señalan las caras del ensamble: 1-cara posterior, 2-cara lateral (izquierda y derecha), 3-cara posterior, 4-base. Por otro lado, la imagen derecha de la Figura 8 muestra el módulo finalmente manufacturado y con los elementos eléctricos conectados, la misma figura muestra el uso de este para verificar su funcionalidad.

Como puede verse en la imagen izquierda de la Figura 8, el módulo fue diseñado de forma que al estar impreso, se realice el conexionado de los elementos de manera sencilla, pues las caras se imprimen por separado para después ensamblarse siguiendo las etapas del proceso de impresión 3D y empleando geometría básica pero que incorpora refuerzos estructurales y tornillo de cabeza plana, con lo cual no solo cumple con las especificaciones eléctricas y de seguridad, sino que se convierte en un ejemplo tangible de diseño electromecánico integrado.

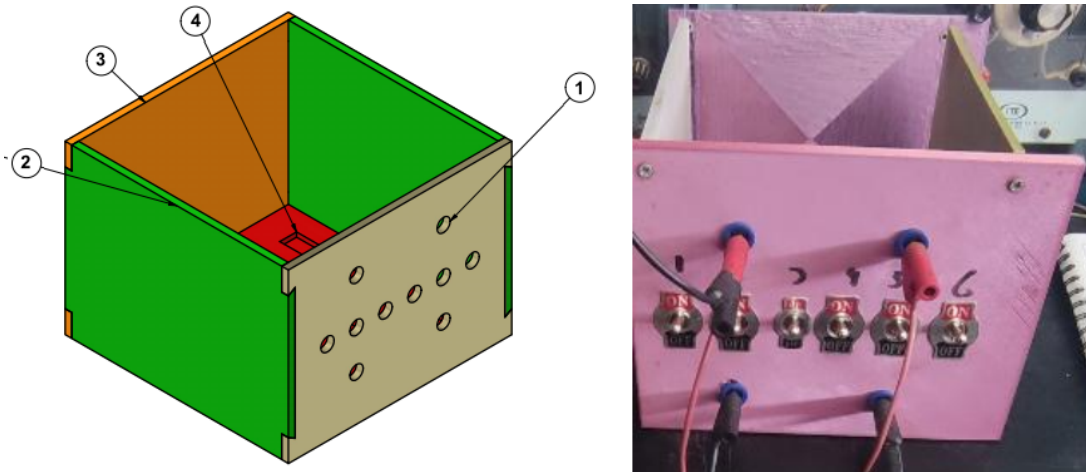


Figura 8. Vista en perspectiva del ensamble del módulo diseñado dentro del entorno de AutoCAD (izq.). Vista real del módulo impreso, ensamblado y conectado con los componentes eléctricos (der.).

4. CONCLUSIONES

Se diseñó y manufacturó un módulo didáctico para apoyar las prácticas de laboratorio del área eléctrica, en específico, un conjunto de resistencias eléctricas, el cual es muy utilizado en prácticas con circuitos básicos tanto de corriente directa como de alterna en baja tensión. El proyecto concluye con la exitosa creación y validación funcional del módulo didáctico de bajo costo, demostrando que la impresión 3D es una solución viable y eficaz para desarrollar infraestructura de laboratorio. El módulo representa un ejemplo tangible de diseño electromecánico integrado, permitiendo a los estudiantes consolidar conocimientos teóricos de una manera práctica. Demuestra cómo se pueden resolver problemas complejos (térmicos, mecánicos, eléctricos) mediante un diseño ingenieril pertinente y utilizando técnicas de fabricación modernas y accesibles.

4.1. Trabajos futuros

Como trabajos futuros destaca la expansión del diseño hacia diferentes módulos que ya están obsoletos y aquellos que se requieren para elaborar diferentes tipos de prácticas, pues se trata de un paso lógico aplicando la misma metodología para diseñarlos y fabricarlos, dando prioridad a los módulos básicos indispensables para los cursos de circuitos eléctricos. Igualmente se considera el análisis por Simulación, donde se planea utilizar Solid Works para realizar análisis de resistencia y esfuerzo, lo que permitirá validar y optimizar los diseños con mayor fundamento y explorar el uso de otros materiales poliméricos. Asimismo, la mejora continua, en donde se buscará mejorar los diseños actuales, así como su funcionamiento basándose en la retroalimentación continua.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa CINCSA (<https://www.cincsa.com.mx/>) por su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Alfattni, R. (2022). Comprehensive study on materials used in different types of additive manufacturing and their applications. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 7(1), 92-114. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2022.7.1.007>

Camburn, B., Viswanathan, V., Linsey, J., Anderson, D., Jensen, D., Crawford, R., Otto, K., Wood, K. (2017). Design prototyping methods: State of the art in strategies, techniques, and guidelines. *Design Science*, 3, e13. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.10>

Garcia-Dominguez, A., Claver, J., Camacho, A. M., Sebastian, M. A. (2020). Analysis of general and specific standardization developments in additive manufacturing from a materials and technological approach. *IEEE Access*, 8, 125056-125075. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3005021>

Kelley, T. R., Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, 3(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>

Rana, B., Rathore, S. S. (2023). Industry 4.0 – Applications, challenges and opportunities in industries and academia: A review. *Materials Today: Proceedings*, 79, 389–394. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.162>

Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., Dutta, N. K. (2021). Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. *Polymers*, 13(5), 753. <https://doi.org/10.3390/polym13050753>

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. 2015. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*; New York, NY. Springer.

M. Moran, «Educación», Desarrollo Sostenible, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education>, (noviembre, 2025).

Programas Nacionales Estratégicos, SECIHTI, <https://secihtl.mx/pronaces>, (noviembre, 2025).

Wickert, J. A., Lewis, K. E. (2013). An introduction to mechanical engineering (3rd ed.). Cengage Learning.

FDM - Modelado por deposición fundida, <https://www.3ds.com/es/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling>, (diciembre, 2021).

Festo Didactics, https://labvolt.festo.com/Website/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8353-00_transformer, (septiembre, 2025).

SÍNTESIS DE HIDROGELES DE ACRILAMIDA - MUCILAGO DE NOPAL MEDIANTE POLIMERIZACIÓN POR RADICALES LIBRES

SYNTHESIS OF ACRYLAMIDE - NOPAL MUCILAGE HYDROGELS FROM THE FREE-RADICAL POLYMERIZATION

Verónica Romero-Montiel^{1*}, Shirley Carro-Sánchez², Alejandro Rodríguez-Juárez¹, María Ariadna Ramírez-Martínez¹

¹Tecnológico Nacional de México, campus Tlaxco, Tlaxco Tlaxcala, México, ²Universidad Autónoma de Tlaxcala, Apizaco, Tlaxcala, México.

*veronica.rm@tlaxco.tecnm.mx

Recibido: 30-Noviembre-2025

Aceptado: 28-Diciembre-2025

RESUMEN

Este trabajo propone la viabilidad de producir hidrogeles a partir de la polimerización de radicales libres en solución acuosa de acrilamida con mucílago de nopal. Se vario la concentración de Acrilamida de 60-100 (Ac60/Mu40, Ac70/Mu30, Ac80/Mu20 y Ac100). Al caracterizar los hidrogeles se encontró que, la relación acrilamida/mucilago tiene efecto directo en la cinética de hinchado ya que, a mayor cantidad de acrilamida, aumentó la cantidad de agente entrecruzante y por lo tanto menor solubilidad del gel formado. Además, se analizó la cinética de hinchado, encontrando que los hidrogeles que contienen mucilago se ajustan a un modelo de pseudo-segundo-orden y el de Ac100 se ajustó al pseudo-primer-orden.

Palabras Clave: Catalizador, Cinética, Hidrogel, Mucilago, Polimerización.

ABSTRACT

This work proposes the viability of producing hydrogels from the free-radical polymerization in an aqueous solution of acrylamide with nopal mucilage. The acrylamide concentration was varied from 60 to 100 (Ac60/Mu40, Ac70/Mu30, Ac80/Mu20 and Ac100). Characterization of the hydrogels revealed that the acrylamide/mucilage ratio has a direct effect on swelling kinetics. Higher acrylamide concentrations increased the amount of crosslinking agent and, consequently, reduced the solubility of the resulting gel. Furthermore, the swelling kinetics were analyzed, finding that the hydrogels containing mucilage conformed to a pseudo-second-order model, while those containing Ac100 conformed to a pseudo-first-order model.

Keywords: Catalyst, Hydrogel, Kinetics, Mucilage, Polymerization

1. INTRODUCCIÓN

Los hidrogeles o polímeros super absorbentes (SAPs), son redes poliméricas entrecruzadas, insolubles en agua, que pueden absorber y retener una gran cantidad de disolución acuosa o de

fluidos biológicos [Ortiz-García y Col., 2021], debido a su carácter hidrófilo causado por la presencia de grupos compatibles con el agua, tales como hidroxilo (-OH), carboxilo (-COOH), amida (-CONH₂) y sulfónico (-SO₃H) (García Sánchez y Cortés Ortega, 2014). La relevancia de los hidrogeles radica en su versatilidad sintética y en la posibilidad de modular propiedades como la porosidad, la capacidad de hinchamiento, la biodegradabilidad y la biocompatibilidad mediante la selección de copolímeros, agentes entrecruzante y condiciones de reacción [Hoare y Kohane, 2008]

Los hidrogeles de poliacrilamida han recibido especial atención en los últimos años, debido a sus atractivas propiedades, por ejemplo, capacidad de hinchamiento, biocompatibilidad y biodegradabilidad, esto ha permitido su uso en tratamiento de agua, agricultura, liberación de fármacos, industria alimenticia, bioingeniería, medicina, entre otros [Felix Rodríguez, 2006]. El entrecruzamiento es esencial para formar la red tridimensional, se logra mediante agentes como N,N'-metilen-bis-acrilamida, que conecta las cadenas del monómero. Recientemente, la introducción de nanocristales de celulosa, nanopartículas inorgánicas u otros refuerzos ha permitido desarrollar hidrogeles nanocompuestos con propiedades mecánicas mejoradas, como la alta tenacidad y capacidad de autor reparación [Schexnailder, P. y Schmidt, G., 2009]

Es por ello que el presente trabajo pretende la elaboración de hidrogeles a base de acrilamida y Mucilago proveniente del nopal (*Opuntia ficus-indica*), con el objetivo de encontrar la concentración óptima de acrilamida y mucilago para lograr la mayor capacidad de hinchamiento y absorción de agua. Para el uso futuro en el tratamiento de aguas residuales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Acrilamida (Ac), N, N'- metilen-bis-acrilamida (NMBA), persulfato de potasio (KPS) Tetrametiletilendiamina (TEMED) de Sigma-Aldrich®, agua destilada, alcohol etílico al 96%, acetona, de marca Meyer. Balanza analítica marca Velab, estufa de secado H-33D marca Riossa, parrilla de calentamiento Cimarec, columna de destilación EDF-10000 marca Prendo, Digestor modelo HB-1 de la marca WEALTEC Co.

2.1 Extracción de mucilago de nopal

Los cladodios (pencas) se limpiaron, lavaron, cortaron y maceraron (en agua destilada) por 24 horas a temperatura ambiente, la mezcla formada se molió y puso en contacto con etanol en una relación 1:3, con respecto al volumen de la mezcla licuada, al estar en contacto los dos materiales, se formó una fibra blanquizca, la cual se recuperó por filtración y que, posteriormente se secó (a 40°C), trituró y tamizó (200µm). El polvo (mucilago) obtenido se almacenó a temperatura ambiente para su posterior uso.

2.2 Síntesis de hidrogeles de Acrilamida- mucilago de nopal

El entrecruzamiento de los copolímeros se realizó mediante una polimerización de radicales libres en solución acuosa, de los monómeros de acrilamida (Ac) y mucilago de nopal (Mu), adicionando persulfato de potasio (KPS) como iniciador, agente entrecruzante N, N'- metilen-bis-acrilamida (NMBA) y tetrametiletilendiamina (TEMED) como acelerador de la reacción.

En la síntesis de los hidrogeles, se varió la relación en peso de Acrilamida a Mucilago (desde 60 a 100%) y analizo como ésta influye en las propiedades del hidrogel, tales como capacidad de hinchado, adsorción y solubilidad. Los hidrogeles se denominaron Ac60/Mu40, Ac70/Mu30, Ac80/Mu20 y Ac100, donde los números corresponden al porcentaje de los monómeros (en

gramos), en todas las síntesis, se consideró el 1% de NMBA, 2% de KPS y 2% de TEMED, respecto a la masa de la Ac usada.

2.3 Caracterización de los hidrogeles

Mediante el porcentaje de hinchamiento se conoce el aumento en tamaño que tiene el hidrogel al momento que empieza a absorber agua. Se pesó una cantidad de xerogel, denotada como w_s , se sumergió en agua destilada a cierto tiempo, se pesó, registrando su valor como w_H . El porcentaje de hinchado (%H), así como el porcentaje de agua absorbida por gramo de hidrogel seco (%A) se calcularon mediante las siguientes ecuaciones [Ortiz-García y Col.2021; Chimal-Cabrera, 2018]:

$$\% H = \frac{w_H - w_s}{w_H} \times 100 \quad (1)$$

$$\% A = \frac{w_H - w_s}{w_s} \times 100 \quad (2)$$

donde w_H es el peso del hidrogel hinchado a un tiempo determinado, w_s peso del hidrogel seco (peso inicial).

Mediante los datos anteriores, se determinó la cinética de hinchamiento con el fin de calcular la constante de velocidad y analizar el proceso de adsorción de agua. Se usó el modelo de pseudo-primer-orden (Ecuación 3) y pseudo-segundo-orden (Ecuación 4)

$$\ln(q_{eq} - q) = \ln q_{eq} - k_1 t \quad (3)$$

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}} t \quad (4)$$

donde q representa la relación de hinchamiento en peso, está dado mediante $\frac{w_H}{w_s}$, t es el tiempo en horas, k_1, k_2 son las constantes de velocidad de hinchamiento y q_{eq} denota la relación de hinchamiento en equilibrio [Corona-Rivera y col., 2017]. Se graficaron las ecuaciones 3 y 4 por separado, se ajustaron los datos a una regresión lineal, para obtener los parámetros desconocidos.

Además, se determinó el porcentaje de solubilidad con el fin de saber la cantidad de hidrogel que fue insoluble en solución acuosa, el procedimiento consistió en pesar el xerogel w_s , colocarlo en exceso de agua destilada, agitarlo por 24 horas, secarlo a 40°C y registrar peso final w_f . El cálculo se realizó mediante la ecuación 5

$$\% Sol = \frac{w_s - w_f}{w_s} \times 100 \quad (5)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Síntesis de hidrogeles de Ac-Mucilago

Se logró la gelificación de los hidrogeles de acrilamida con mucilago de nopal y los de acrilamida, mediante el procedimiento y condiciones descritas. Se realizaron varias pruebas a diferente temperatura, determinándose que a 36°C se logró efectuar la polimerización y el entrecruzamiento de las cadenas, posiblemente debido a la adición del TEMED que actuó como acelerador de la reacción. La formación del gel fue apreciable a los 30 minutos para el caso de Ac100 y el tiempo fue

aumentando conforme la cantidad de mucilago aumentó, observando que a las 4 horas ya se contaba con gel (en todas las pruebas), sin embargo, se dejaron por dos horas más para asegurar una completa polimerización. En la Figura 1, se muestran los xerogeles, observándose que presentan menos rigidez Ac60/Mu40 y Ac70/Mu30, por tanto, más elasticidad en estado hidratado (Figura 2), en cambio, Ac80/Mu20 y Ac100 fueron más frágiles en forma de xerogel, esto se debió a que la cantidad del agente entrecruzante (NMBA) está en función de la Ac usada y que dio mayor rigidez al polímero pues se incrementaron los puentes entre las cadenas, tal como lo establece Corona-Rivera y col. [2017].

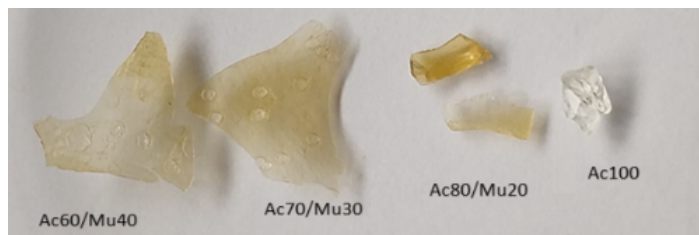


Figura 1. Xerogeles de Acrilamida con Mucilago de nopal

3.2 Caracterización de los hidrogeles

Se estudiaron los geles sintetizados (Ac60/Mu40, Ac70/Mu30, Ac80/Mu20 y Ac100), mediante su caracterización, para tal caso, se determinó el porcentaje de hinchado, adsorción de agua, solubilidad y cinética de hinchado, analizando como influyen las cantidades de monómeros considerados en los resultados obtenidos.

En primer lugar, se estudió el hinchado de los hidrogeles. Se pesaron los geles en estado seco (xerogel), Figura 1, y en cierto tiempo en estado hidratado (Figura 2), hasta alcanzar el equilibrio. con los pesajes y el uso de la Ecuación 1, se calculó el porcentaje de hinchado (Figura 3).

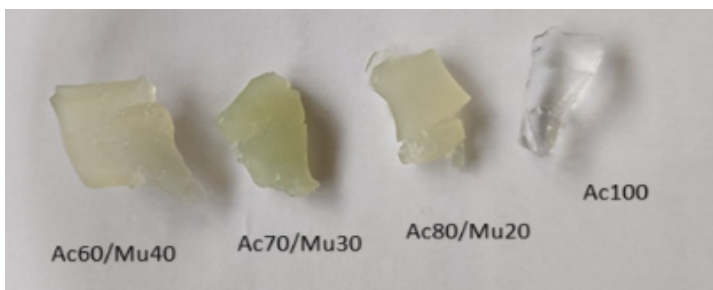


Figura 2. Hidrogeles de Acrilamida con Mucilago de nopal, en equilibrio.

En la Figura 3 se observa que el hidrogel Ac60/Mu40 alcanza mayor porcentaje de hinchado con valor de 93.13% debido a que presenta menor cantidad de agente entrecruzante, en comparación con Ac70/Mu30 que alcanza el 91.03%, Ac80/Mu20 de 90.67% y el de Ac que solo presenta el 73.44 por ciento, comprobándose lo establecido por Ortiz-García y col. [2021] quienes establecieron que el grado de entrecruzamiento tiene un efecto directo sobre la capacidad de hinchado del polímero y la fortaleza de la cadena, es decir, el incremento de la densidad de entrecruzamiento da lugar a que decrezca la capacidad de hinchamiento y aumente la fortaleza del gel.

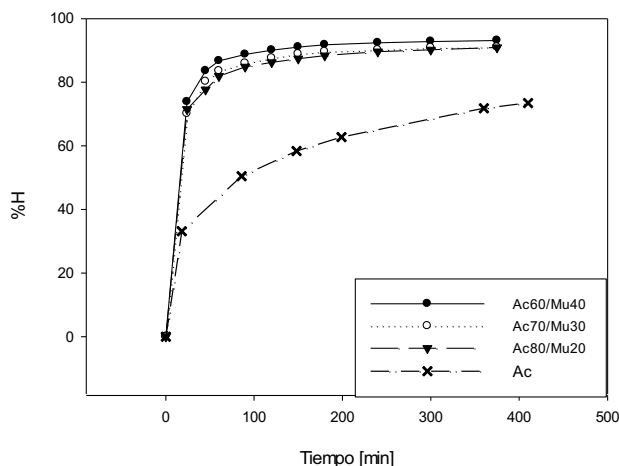


Figura 3. Porcentaje de hinchado

El estudio del porcentaje de agua absorbida (%A) proporciona la cantidad de líquido que puede almacenar el hidrogel en su red polimérica en función del tiempo, además, es una manera cualitativa de inferir en la densidad de entrecruzamiento de la red [Chimal Cabrera, 2018], mismo que se puede apreciar en la Figura 4, se nota que el hidrogel de Ac60/Mu40 alcanza máximo valor de agua adsorbida, con una cantidad de 1354%, Ac70/Mu30 almacena 1245%, en Ac80/Mu20 el porcentaje fue de 1008% y los hidrogeles de Ac sólo 660%, esta cantidad fue medida a las 30 horas de estar en contacto el hidrogel con agua destilada, mediante estos valores podemos concluir que el hidrogel Ac60/Mu40 presenta menor grado de entrecruzamiento y mayor espacio para incorporar moléculas de agua en comparación con el de acrilamida siendo este último un polímero más rígido debido a un incremento de puentes en la cadena, lo que comprueba la descripción presentada en el porcentaje de hinchamiento, del apartado anterior.

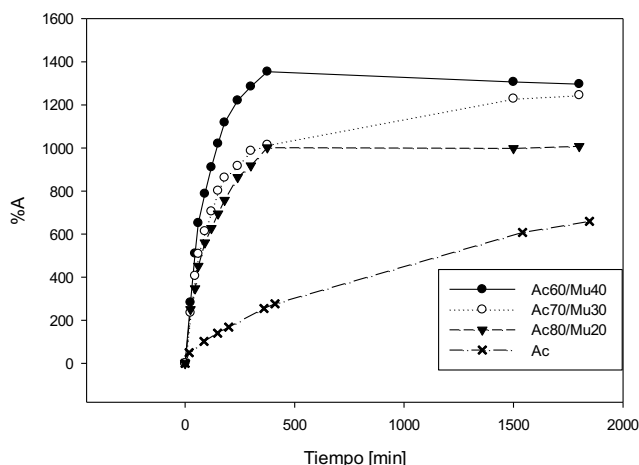


Figura 4. Porcentaje de absorción

Se analizó la cinética de hinchado mediante las ecuaciones 3 y 4, cabe resaltar, que los hidrogeles Ac60/Mu40, Ac70/Mu30 y Ac80/Mu20, siguieron la cinética de segundo orden, el cual es comúnmente usado en cinética de hinchado [Cortés Ortega, 2013] y los hidrogeles de Ac se ajustaron

al modelo de primer orden, tal ajuste se muestra en la Figura 5 y Figura 6 junto con la regresión lineal y los parámetros del modelo matemático se presentan en la Tabla 1.

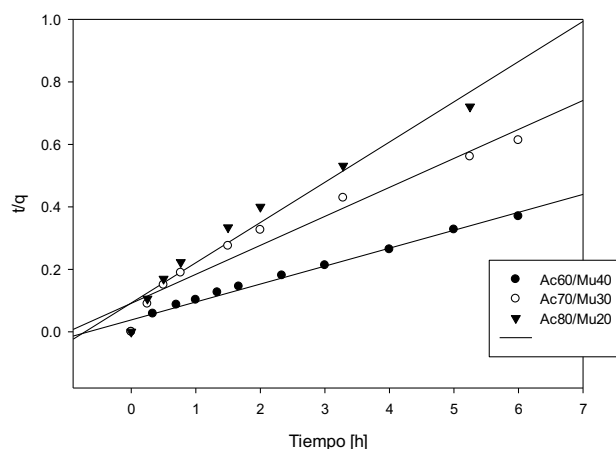


Figura 5. Ajuste de cinética de hinchado para modelo de pseudo-segundo-orden

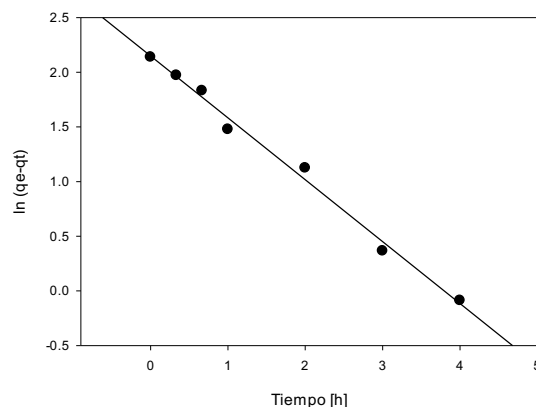


Figura 6. Ajuste de cinética de hinchado para modelo de pseudo-primer-orden de hidrogeles de acrilamida

El estudio de los parámetros de cinética de hinchado, muestran un incremento en la capacidad de absorber conforme se aumentó la cantidad de mucilago en el hidrogel, originado por menor reticulación. De igual manera, la constante de equilibrio se puede relacionar con las cargas del grupo funcional del hidrogel, tal como lo establece Corona-Rivera [2017], al aumentar el porcentaje de NMBA, aumentan los grupos NH en la cadena, resultando en mayor valor de la constante de equilibrio.

Tabla 1. Parámetros de la cinética de hinchado

	Velocidad de hinchado inicial, r_0	k_2 , modelo pseudo-segundo-orden	Máxima relación de hinchado en peso	Coefficiente de regresión r^2	k_1 , modelo pseudo-primer-orden
Ac60/Mu40	30.9597	0.1365	15.0602	0.9838	
Ac70/Mu30	10.9649	0.0944	10.7758	0.9522	
Ac80/Mu20	9.9800	0.1470	8.2372	0.9657	
Ac100	0.4653	-----	8.5788	0.992	0.5661

La solubilidad permite conocer que tanto se disuelve el hidrogel en agua, en el caso de Ac60/Mu40, se obtuvo la mayor solubilidad (28%), este dato indica que el porcentaje de gel formado corresponde al 72%. Analizando los valores de porcentaje de gel, estos fueron aumentando conforme se aumentó la cantidad de Ac, los porcentajes obtenidos fueron 75, 84 y 95% para Ac70/Mu30, Ac80/Mu20 y Ac100, respectivamente.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se encontró que es posible la síntesis de hidrogeles de Ac con Mucilago de nopal, obteniendo geles homogéneos, con buena capacidad de hinchado y de absorción de agua. Los resultados arrojaron que el hidrogel Ac60/Mu40 alcanza mayor porcentaje de hinchado (93.13%) mayor valor de agua adsorbida, 1354%, en contraparte con la Ac que sólo absorbió 660%. En los

estudios de la cantidad de solubilidad, se encontró que los hidrogeles de acrilamida presentaron menor valor. Con esta caracterización se concluyendo que la relación de Ac/Mu, tiene un efecto directo en la capacidad que tiene el hidrogel de hincharse, de absorber agua y de cantidad de gel formado, ya que al aumentar la cantidad de Acrilamida aumentó el grado de entrecruzamiento de la red polimérica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México y al Gobierno del Estado de Tlaxcala por el financiamiento a este trabajo, bajo la clave 22358.25-PD.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Chimal Cabrera, K. (2018). *Síntesis de hidrogeles mediante emulsion doble*. Aplizaco, Tlaxcala México : Universidad Autónoma de Tlaxcala, Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y tecnología .

Corona-Rivera, M., Ovando-Medina, V., Bernal-Jacome, L., Cervantes-González, E., Antonio-Carmona, I., Dávila-Guzmán, N. (2017). Remazol red dye removal using poly(acrylamide-co-acrylic acid) hydrogels and water absorbency studies. *Springer Colloid Polym Sci.* , 295(1), 227-236. <https://doi.org/10.1007/s00396-016-3996-2>

Cortés Ortega , J. (2013). Hidrogeles microestructurados de Acrilamida y determinación de su capacidad de absorber agua y etanol. *Química Nova*, 36(6), 757-761.

Felix Rodríguez , D. (2006). Síntesis Y Caracterización De Hidrogeles De Redes Semi-interpenetradas Basadas En Poli(acrilamida) Y Poli(ácido-y-glutámico). México: Centro de Investigación en Química Aplicada.

García Sánchez, L., Cortés Ortega, J. (2014). Síntesis de Hidrogeles de Acrilamida en Soluciones Acuosas de Etanol. *Polímeros: Ciência e Tecnologia [en línea]*, 24(6), 752-756. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1663>

Hoare , T., Kohane, D. (2008). Hidrogeles en la administración de fármacos: avances y desafíos. *ScienceDirect, ELSEVIER*, 1993-2007. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.01.027>

Ortiz-García, T., Rapado-Paneque, M., Peniche-Covas, C. (2021). Hidrogeles superabsorbentes basados en poli(acrilamida) para aplicación agrícola: estudio de hinchamiento. *Rev. Cubana Quím.*, 33(2), 46-68.

Schexnailder, P., Schmidt, G. (2009). Nanocomposite polymer hydrogels. *Colloid and Polymer Science*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00396-008-1>