

Apósitos a base de almidón: revisión sistemática sobre métodos de caracterización fisicoquímica y su potencial en la cicatrización de heridas

Starch dressings: Systematic Review of Physicochemical Characterisation Methods and Wound Healing Potential

 Francisco Javier Bernal-Avila ^{1*}  Oscar H. Pardo Cuervo ¹
 Nidya Alexandra Segura Guerrero ¹

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.

*Autor de correspondencia: Francisco Javier Bernal-Avila. calle 39 #6-63, edificio de posgrados, Facultad de Ciencias, oficina 101, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.
francisco.bernal02@uptc.edu.co

Recibido: 16 de noviembre del 2023
Aprobado: 22 de mayo del 2024
Publicado: 18 de julio de 2024

Editor temático: Edison Osorio, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Para citar este artículo: Bernal-Avila, F. J., Pardo Cuervo, O. H., & Segura Guerrero, N. A. (2024). Apósitos a base de almidón: revisión sistemática sobre métodos de caracterización fisicoquímica y su potencial en la cicatrización de heridas. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 25(2), e3612.
https://doi.org/10.21930/rcta.vol25_num2_art:3612

Resumen: Los biopolímeros tienen un gran potencial en el campo del cuidado y la cicatrización de heridas. El almidón, como biopolímero abundante en la naturaleza, puede ser utilizado para reparar tejidos y mejorar su función natural, siempre y cuando cumpla con ciertas características específicas que se logran mediante la modificación de las propiedades fisicoquímicas del biomaterial. Por lo anterior, en este artículo se realiza una revisión sistemática del uso de biomateriales a base de almidón en el desarrollo de apósitos. Siguiendo las directrices de la metodología Prisma, se buscaron y analizaron artículos originales de los últimos siete años, donde se estudió la elaboración de biomateriales a base de almidón y su uso en la cicatrización de heridas. La selección de estos artículos incluyó criterios de inclusión y exclusión que permitieron elegir 57 estudios para cumplir con el objetivo de la revisión. Así, se describe detalladamente el tipo de apósito creado, las técnicas utilizadas para su obtención, los principales polímeros y aditivos empleados, así como los métodos de evaluación del biomaterial. Las técnicas de fabricación influyeron directamente en el tipo de apósito obtenido y las ventajas funcionales que adquirieron, donde sus modificaciones fisicoquímicas resultaron relevantes para que el biomaterial tuviera la capacidad de funcionar adecuadamente como apósito; además, los apósitos compuestos por diversos materiales y aditivos tienen mejor comportamiento mecánico que los elaborados a partir de un solo material. Se debe tener en cuenta que los métodos de caracterización permiten una evaluación precisa de los biomateriales, asegurando que estos proporcionen los beneficios esperados en la curación y el cuidado de heridas.

Palabras clave: almidón, biopolímeros, apósito, propiedades fisicoquímicas.

Abstract: Biopolymers have great potential in wound care and healing. Starch, as an abundant biopolymer in nature, can be used to repair tissues and improve their natural function, provided it meets certain specific characteristics. These characteristics are achieved by modifying the physicochemical properties of the biomaterial. Therefore, this article provides a systematic review of the use of starch-based biomaterials in the development of dressings. Following the guidelines of the Prisma methodology, original articles from the last 7 years that investigated the production of starch-based biomaterials and their use in wound healing were searched and analysed. The selection of these articles included inclusion and exclusion criteria that allowed the selection of 57 studies to meet the review's objective. The type of dressing manufactured, dressing manufacturing techniques, main polymers and additives used, and biomaterial evaluation methods are described in detail. Physicochemical modifications are relevant to the ability of the biomaterial to function adequately as a dressing. Manufacturing techniques directly influence the type of dressing obtained and the functional benefits they provide. Dressings composed of different materials and additives have better mechanical behaviour than those made of a single material. Characterisation methods allow accurate evaluation of biomaterials to ensure that they provide the expected benefits in the wound healing and care process.

Keywords: Starch, biopolymers, dressing, physicochemical properties.



Introducción

Cerca del 2 % de la población mundial experimentará una herida crónica en algún momento de su vida. Por lo general, a medida que las poblaciones envejecen, la incidencia absoluta de heridas crónicas aumenta, especialmente en pacientes con comorbilidades como la diabetes. Esta situación se ha convertido en una epidemia silenciosa que afectará a una proporción cada vez mayor de la población global (Goh et al., 2020). Los apósitos son el tratamiento utilizado con mayor frecuencia para tratar este tipo de heridas (Selvaraj et al., 2015), ya que intervienen en el estado bioquímico de las mismas y ayudan en la cicatrización. Para que el tratamiento sea efectivo, los apósitos deben proporcionar un entorno húmedo, promover la hemostasia, absorber el exceso de líquido, facilitar la migración celular, estimular la angiogénesis, proteger contra infecciones bacterianas y ser biocompatibles con el tejido celular circundante (Li et al., 2023; Baghaie et al., 2017).

Los apósitos modernos están basados en polímeros sintéticos clasificados en productos pasivos e interactivos, y en polímeros naturales o bioactivos. Los productos pasivos se dividen en no oclusivos (gasa o tul) y en apósitos interactivos semiocclusivos y oclusivos (películas, espumas, hidrogeles e hidrocoloides). Los apósitos se utilizan como una barrera contra microorganismos y agentes contaminantes presentes en el ambiente, además, los que son de tipo bioactivo atraen gran interés debido a sus características biocompatibles y biodegradables, estos se derivan generalmente de fuentes naturales como el colágeno, el ácido hialurónico, el almidón, el quitosano, el alginato y la elastina (Selvaraj et al., 2015). En este contexto, el almidón ha surgido como un biomaterial prometedor para diversas aplicaciones, incluyendo la ingeniería de tejidos y la fabricación de apósitos para heridas (Sahana & Rekha, 2018).

En la naturaleza, el almidón se presenta como uno de los biopolímeros más abundantes, almacenado en forma de gránulos en raíces, semillas, tallos y tubérculos de diferentes plantas, como maíz, papa, trigo, arroz, entre otras, resultando fácil de conseguir y extraer. Con la cantidad adecuada de agua, el almidón puede ser procesado como un termoplástico que se puede usar en diferentes aplicaciones gracias a su biodegradabilidad, disponibilidad y viabilidad económica (Torres et al., 2013). Actualmente, la forma nativa del almidón es usada en la industria para la producción de empaques, recubrimientos, textiles, aglutinantes y absorbentes; no obstante, su fragilidad en el área de empaques y el deterioro de sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas, bajo condiciones ambientales como la humedad, limita su uso a nivel industrial y biomédico. Para mejorar dichas propiedades, en los materiales se realizan modificaciones químicas del almidón, se emplean diferentes técnicas de transformación o se adicionan otros componentes durante su obtención (Medina et al., 2012). Debido a las propiedades del almidón y a las interacciones químicas que puede tener con diferentes materiales, es posible elaborar estructuras complejas que impulsan respuestas fisiológicas cada vez más dinámicas en los organismos vivos (Adeli et al., 2019).

Diversos estudios enfocan su revisión en los tipos de apósitos y vendajes utilizados para subsanar la pérdida de continuidad de la piel y otros tejidos, evitando el ingreso de patógenos y garantizando la homeostasis en el organismo (Malik et al., 2021). Otras revisiones descriptivas se centran en la utilización de biopolímeros, resaltando las propiedades que aportan a la elaboración de diferentes tipos de apósitos (de Lima Lima & Fonseca Passos, 2021; Fernandes

et al., 2022). Autores como Hu et al. (2020) revisan en detalle el uso de polisacáridos como el quitosano, el alginato, el ácido hialurónico, la celulosa, el dextrano y el almidón, y analizan las técnicas y modificaciones utilizadas para la obtención de hidrogeles; sin embargo, solo algunos artículos de revisión enfatizan en el uso de almidón como biomaterial para aplicaciones biomédicas, gracias a su alta compatibilidad con tejidos biológicos y su rápida degradación (Labelle et al., 2020).

Hasta la fecha, no se ha llevado a cabo una revisión empleando una metodología sistemática replicable, mediante la cual se haya compilado, resumido y analizado evidencia científica relacionada con este tema. Esto deja expuesta la necesidad de llevar a cabo una revisión científica más exhaustiva sobre el uso del almidón para la obtención de biomateriales en aplicaciones biomédicas. Dada esta brecha en investigación, el propósito de esta revisión consistió en resumir y analizar, de manera sistemática, investigaciones recientes relacionadas con la utilización del almidón en la obtención de biomateriales destinados a la fabricación de apósitos. Se resalta la importancia de los apósitos en el tratamiento de heridas crónicas y cómo los materiales basados en almidón pueden ser una solución prometedora en este contexto. Durante la revisión, se hizo énfasis en: a) selección de biomateriales que satisfacen los requisitos esenciales para su aplicación como apósitos, b) técnicas de producción, c) aditivos empleados para modificar las propiedades fisicoquímicas y d) métodos de evaluación de estos biomateriales.

Materiales y métodos

La revisión sistemática se realizó siguiendo las directrices de la metodología Prisma, en Scopus[®], ya que actualmente es la mayor base de datos multidisciplinar con revisión por pares (Hernández-González et al., 2016). La ecuación de búsqueda que arrojó resultados concretos, fue la siguiente: (starch) AND (dressing OR bandage) AND (wound OR injury OR hurt) (figura 1). De este proceso se obtuvieron 237 resultados y, antes de proceder a la selección de artículos, se definieron los criterios de inclusión y exclusión. Para la elaboración del análisis bibliométrico se utilizaron los *software* VOSviewer[®] y Excel[®].

Criterios de inclusión

- Artículos originales de texto completo.
- Tanto en resumen como en contenido deben tratar sobre: apósitos a base de almidón, con o sin adición de otros componentes.
- Artículos originales publicados desde marzo del año 2017 a mayo del 2023 (figura 2).
- Artículos en idioma inglés.

Criterios de exclusión

- Artículos de revisión, estudios de caso único, artículos de conferencia, libros o manuales.
- Artículos duplicados o que sean estudios complementarios a los materiales empleados en algún artículo escogido.
- Artículos que estudien aplicaciones biomédicas diferentes al apósito para la cicatrización de heridas en alguna de sus fases.

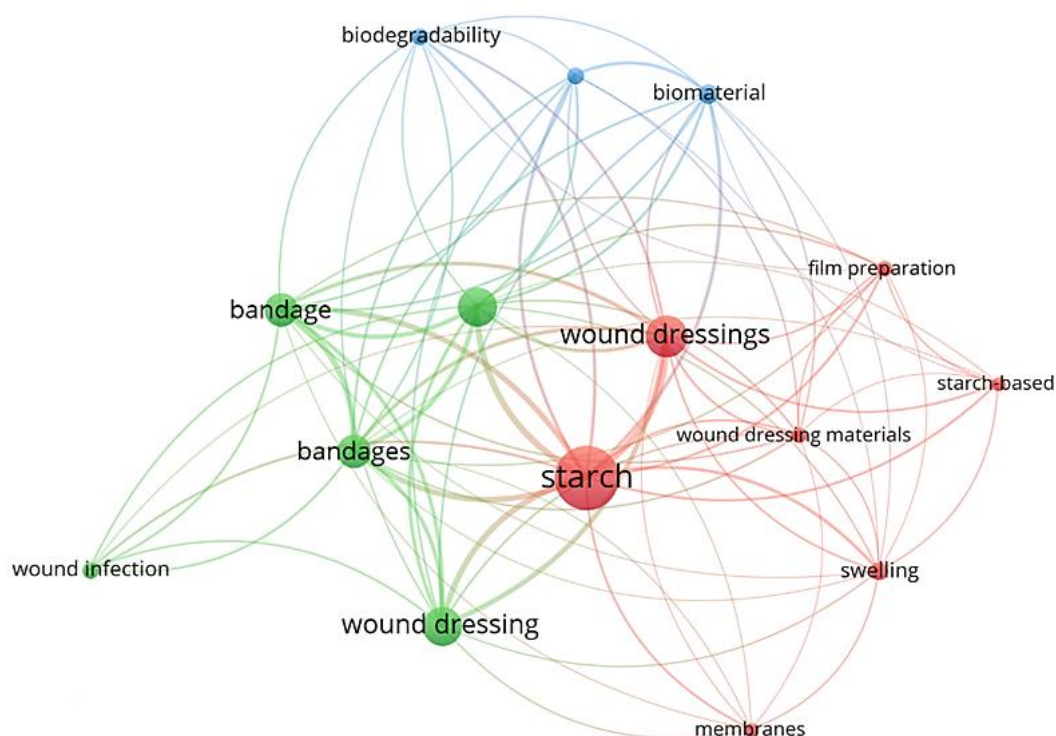


Figura 1. Mapa bibliométrico de las palabras clave

Notas aclaratorias: se relaciona el tamaño de los círculos y las líneas con la cantidad de repeticiones y la asociación entre palabras. En rojo se muestra la asociación entre el almidón (*starch*) y su utilización en vendajes (*bandages*), apósitos (*dressings*), membranas (*membranes*) y películas (*film*). En verde se destaca la relación de vendajes y apósitos en el manejo de heridas e infecciones y en azul se relaciona la biodegradabilidad (*biodegradability*) que exhiben los biomateriales (*biomaterials*) a base de almidón.

Fuente: Elaboración propia

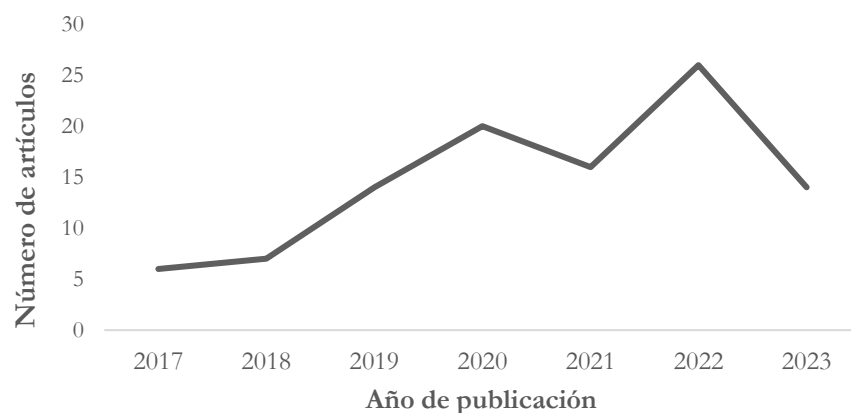


Figura 2. Distribución de frecuencia del número de artículos publicados por año

Fuente: Elaboración propia

Entre los años 2017 y 2023 se encontraron 102 artículos, de estos se escogieron 74 artículos originales mediante la lectura de título y el resumen. Después de leer estos artículos por completo, se seleccionaron 57 (anexo 1) para cumplir con el objetivo de la revisión (figura 3).

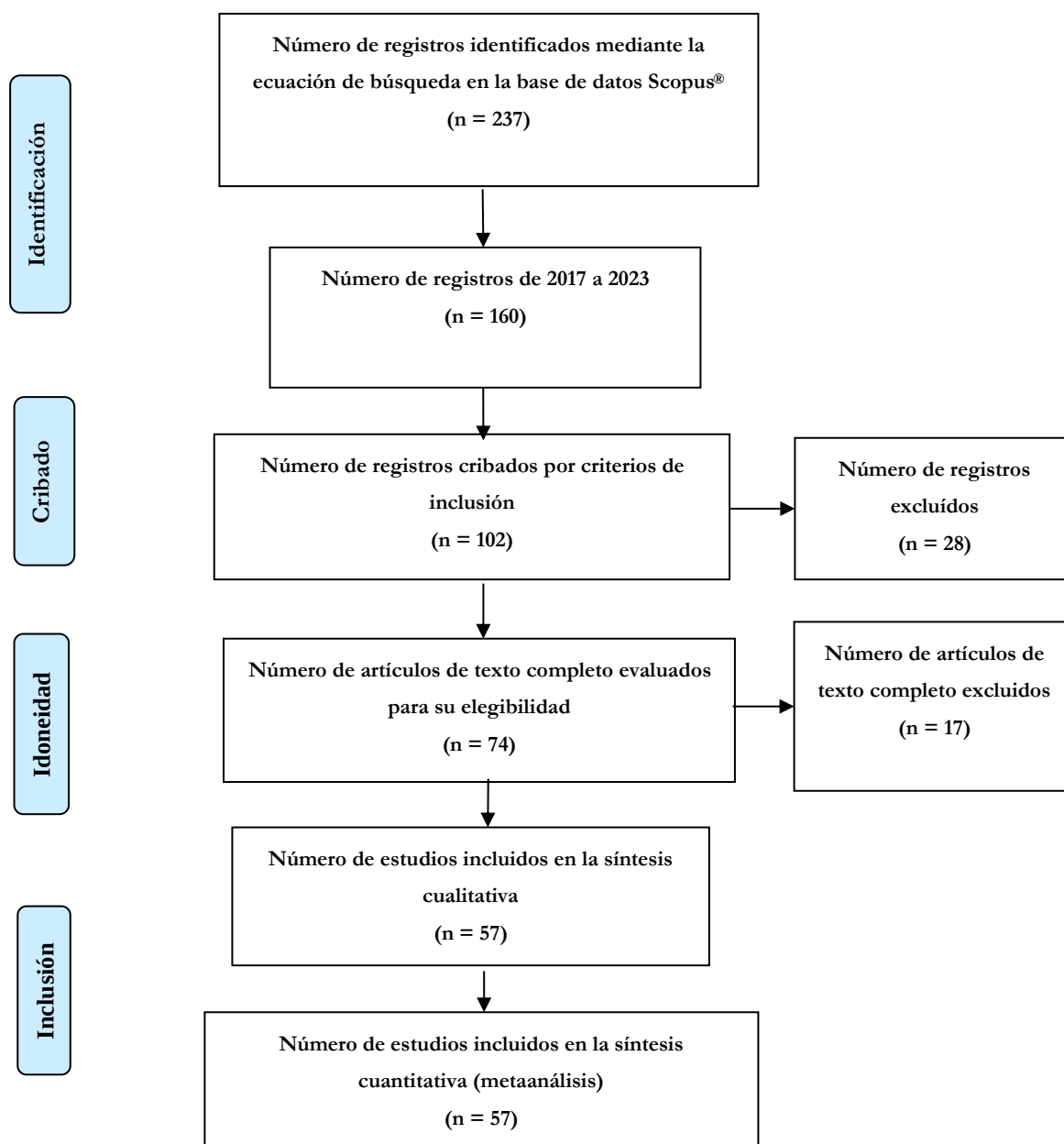


Figura 3. Diagrama de flujo basado en la declaración Prisma
Fuente: adaptado de Moher et al., 2009

Resultados y discusión

Tipos de apósitos a base de almidón

Dentro de los tipos de apósitos que utilizan almidón para su obtención, se encuentran las membranas biológicas o biomembranas, estudiadas en la mayoría de los artículos revisados; en segundo lugar se encuentran las esponjas y en menor porcentaje el hidrogel inyectable (figura 4). Las biomembranas permiten la incorporación fácil, rápida y segura de diversos polímeros y aditivos. Estas membranas se adaptan bien a las superficies de las heridas y proporcionan una protección efectiva. Además, su elaboración es económica, lo que las convierte en el tipo de apósito de mayor interés para los investigadores (Adeli et al., 2019; Aktürk et al., 2019; Altaf et al., 2021; El-Hefnawy et al., 2022; Gong et al., 2023; Iqbal et al., 2019). Otro tipo lo constituyen las esponjas, que debido a su morfología son biopolímeros con una alta capacidad de absorción de líquidos (Jungprasertchai et al., 2022; Long et al., 2022; Meng et al., 2023; Punyanitya et al., 2020; Su et al., 2019; Wu et al., 2019; Yang et al., 2019). Estas esponjas son especialmente útiles en heridas con sangrado profuso, gracias a que las porosidades del biomaterial le permiten mantener su forma después de estar expuestas a exudados y al mismo tiempo facilitan la adhesión plaquetaria, un proceso importante en la coagulación y la hemostasia de los vasos sanguíneos involucrados (Li et al., 2023; Long et al., 2022; Yeniy et al., 2018). Un tercer tipo de apósito es el hidrogel inyectable, el cual se utiliza para abordar de manera inmediata la pérdida de continuidad del tejido vivo y también como vehículo para la administración de otros compuestos en heridas de mayor profundidad (Mao et al., 2020b).

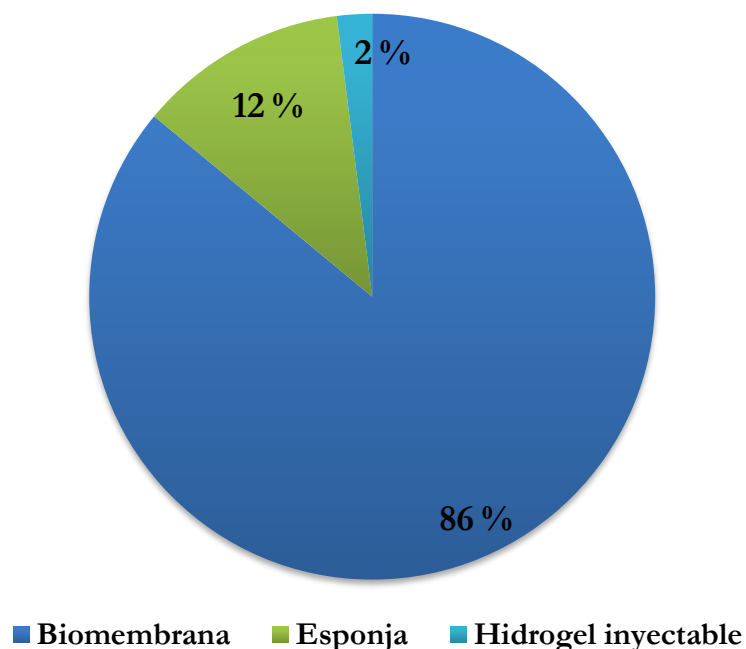


Figura 4. Porcentajes de tipos de apósito que utilizan almidón para su obtención en los artículos revisados

Fuente: Elaboración propia

Técnica de fabricación

Las técnicas de fabricación influyen directamente en la estructura y funcionalidad de los apósitos, los biomateriales empleados en la elaboración se comportan de diversas maneras según la técnica de fabricación empleada. La solubilización homogénea de los componentes es el primer paso para fabricar el biomaterial, la diferencia entre técnicas radica en los procesos realizados posteriormente, donde se busca deshidratar total o parcialmente la solución y obtener un biomaterial consolidado, que exprese las capacidades físicas y químicas de los componentes empleados.

En la figura 5 se muestran las técnicas de fabricación de apósitos, encontradas durante la presente revisión. La técnica más utilizada por los investigadores para integrar nanopartículas y otros materiales en la matriz polimérica es la fundición de soluciones (TFS). En este proceso se obtiene la forma deseada, utilizando un molde para contener la solución (Costa et al., 2020). La deshidratación de la fase acuosa se puede llevar a cabo a temperatura ambiente, generalmente entre 17 °C y 25 °C, durante un periodo máximo de 48 horas. Alternativamente, se pueden emplear hornos de secado para controlar de manera más precisa el proceso. Cuando se utilizan temperaturas entre 30 °C y 50 °C, el tiempo de exposición es más prolongado, generalmente de 12, 24 o 48 horas. En el caso de exposiciones a temperaturas entre 60 °C y 70 °C, el tiempo de exposición es menor, de 1 a 8 horas, evitando así alcanzar el punto de cristalización del almidón y la desnaturalización de los grupos funcionales presentes en algunos de los componentes empleados (Costa et al., 2020; da Silva et al., 2021; Elbassyoni et al., 2020; Eskandarinia et al., 2019; Joorabloo et al., 2020; Kuchaiyaphum et al., 2020; Mao et al., 2020a).

La técnica de electrohilado permite construir redes poliméricas a partir de los componentes presentes en la solución homogénea, donde las fibras obtenidas varían en forma, tamaño y conductividad, de acuerdo con el material empleado en su elaboración, soluciones con mayor contenido de almidón o gelatina aumentan la viscosidad, la densidad y la conductividad eléctrica de la membrana, produciendo fibras poco uniformes y con menor capacidad de estiramiento (Ansarizadeh et al., 2020; Komur et al., 2017). Productos como el caolín y el alcohol polivinílico (PVA, según sus siglas en inglés) facilitan la uniformidad del electrohilado y mejoran la conductividad eléctrica al ser menos viscosos (Adeli et al., 2019; Azarian et al., 2019). El electrohilado puede crear nanofibras con una alta relación superficie-volumen, lo que puede mejorar la bioactividad del apósito, constituyendo un método con gran capacidad para crear biomembranas con potencial para mejorar los resultados de cicatrización de heridas.

El liofilizado es una técnica que consiste en el secado por enfriamiento de una solución homogénea inicial, normalmente a temperaturas sobre los -20 °C, este proceso permite formar grandes porosidades interconectadas entre sí dentro del biomaterial, dando como resultado una esponja con gran capacidad de absorción y retención de líquido, útil en el tratamiento de heridas que requieren el mantenimiento de la hemostasia (Jungprasertchai et al., 2022; Long et al., 2022; Poonguzhali et al., 2018).

Una de las técnicas menos empleadas es la impresión 3D, la cual es considerada innovadora en la elaboración de estructuras biocompatibles utilizadas como apósitos. El desarrollo de estructuras con gran capacidad de intercambio gaseoso, buena capacidad de retención de líquido, control, ajuste de la geometría y capacidad de liberación controlada de fármacos, son algunas de

las ventajas que aporta la impresión 3D. El principal desafío para su utilización es la disolución de los componentes empleados. Factores como el solvente utilizado y la temperatura, a menudo afectan las propiedades de los polímeros e inactivan la capacidad antibacterial de los aditivos que se quieren utilizar. Emplear el agua como solvente biocompatible, asociada a biopolímeros con gran capacidad hidrofílica como el almidón y la carboximetilcelulosa (CMC) que, además son fácilmente imprimibles, puede ser la base para desarrollar la técnica a gran escala (Naseri et al., 2021; Neres Santos et al., 2019).

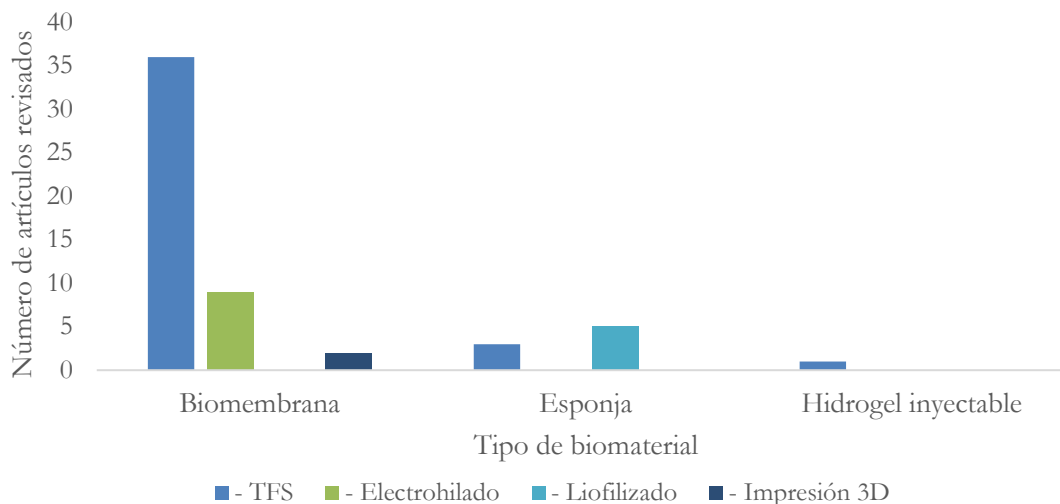


Figura 5. Proporción de técnicas de fabricación de apósitos usadas según el tipo de biomaterial
Fuente: Elaboración propia

Almidones, polímeros y aditivos utilizados

Los almidones más utilizados por los investigadores para elaborar apósitos son los de maíz, papa, arroz y yuca. Estos almidones suelen ser adquiridos en casas comerciales y su elección está influenciada por la disponibilidad del producto y la fuente de extracción en el área donde se realiza el estudio (Leon-Bejarano et al., 2023; Yang et al., 2019). El grado de gelificación y retrogradación del almidón son características que afectan directa o indirectamente el comportamiento del biomaterial. La gelificación de la amilosa tiende a ocurrir de manera más rápida, un mayor contenido de amilosa aumenta la viscosidad del almidón, lo cual no es deseable en técnicas de fabricación como el electrohilado y la impresión 3D (Naseri et al., 2021). Por otro lado, los almidones con una menor proporción de amilosa, como el almidón de arroz, tienden a formar membranas más gruesas y rugosas (Yang et al., 2019).

La fabricación de un apósito requiere de materiales que cumplan con características específicas, las cuales se logran mediante la modificación de la composición fisicoquímica de biopolímeros como el almidón o la incorporación de materiales que interactúen sinérgicamente en la matriz. El mapa bibliométrico muestra la asociación entre el almidón, los polímeros y aditivos utilizados y las propiedades del apósito, logradas a través de su interacción (figura 6). Algunos estudios han

realizado diferentes procesos de oxidación para reemplazar parcialmente grupos hidroxilo del almidón por grupos aldehído, con el objetivo de mejorar la viscosidad, la capacidad de estiramiento y la estabilidad en un medio acuoso (Luan et al., 2021; Meng et al., 2023). Estas propiedades también pueden mejorarse mediante la adición de glicerol o de otros biopolímeros como celulosa, quitosano, látex, y en menor medida, utilizando polímeros sintéticos como *PV4* o poliuretano (Movahedi et al., 2020). Otros estudios han utilizado fórmulas comerciales de almidón modificado, como el almidón hidroxipropilado (El-Hefnawy et al., 2022), para probar la sinergia de otros aditivos en la cicatrización de heridas, mejorar la capacidad hidrofílica, el tratamiento antimicrobiano y la regeneración celular. Algunos de los aditivos más utilizados son los extractos de hierbas y frutas, péptidos, gelatina, aceites, propóleos, nanopartículas de plata, zinc, sodio, ácido poliláctico, fármacos y antibióticos (Aliabadi et al., 2020; Altaf et al., 2021; Costa et al., 2020; El-Hefnawy et al., 2022; Hadisi et al., 2018; Salehi et al., 2017).

Los apósitos se fabrican utilizando aceites, extractos de hierbas, frutos y propóleo, debido a sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas, que previenen infecciones y favorecen la curación. La pectina cítrica y la gelatina se emplean como aditivos para mejorar la resistencia mecánica y la biocompatibilidad de los hidrogeles. Las nanopartículas de plata presentan propiedades antimicrobianas en ensayos *in vitro* e *in vivo*, siendo utilizadas comúnmente para reducir el riesgo de infección en heridas. Así, el nitrato de estroncio, un metal divalente, estimula los osteoblastos y tiene afinidad por el tejido óseo; el zinc, un nutriente esencial para el crecimiento y la división celular, promueve la cicatrización de heridas cuando se incorpora a los hidrogeles; y el sodio se utiliza para ajustar las propiedades del hidrogel, como el pH y la viscosidad (da Silva et al., 2021; Delavari & Stiharu, 2022; Komur et al., 2017; Mao et al., 2020b; Wu et al., 2019).

Las fibras de seda aumentan la capacidad de absorción de líquidos y la resistencia a temperaturas superiores a 120 °C, en las membranas de hidrogel a base de almidón (Kuchaiyaphum et al., 2020). Los hidrogeles incorporan fármacos y antibióticos para lograr una liberación localizada y sostenida del medicamento, lo cual ayuda a tratar infecciones y promover la cicatrización de heridas (Altaf et al., 2021).

El péptido agonista del receptor de trombina (TRAP-Cys-COOH) muestra una buena capacidad hemostática *in vivo* y se ha demostrado su eficacia en el control del sangrado en modelos animales con lesiones en el hígado y el bazo, lo que sugiere que podría ser un agente terapéutico prometedor para el tratamiento de hemorragias internas, cuando se une a una esponja que permite su liberación (Yeniay et al., 2018).

Métodos de caracterización de los biomateriales

Dentro de los métodos para evaluar las características funcionales de los biomateriales están: espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (*FTIR*, por sus siglas en inglés), difracción de rayos X (*XRD*, por sus siglas en inglés), microscopía electrónica de barrido (*SEM*, por sus siglas en inglés), análisis termogravimétrico (*TGA*, por sus siglas en inglés), calorimetría diferencial de barrido (*DSC*, por sus siglas en inglés), microscopía de fuerza atómica (*AFM*, por sus siglas en inglés), dispersión de luz dinámica (*DLS*, por sus siglas en inglés), tasa de transmisión de vapor de agua (*WVTR*, por sus siglas en inglés), espectroscopía de rayos X (*EDX*, por sus siglas en inglés), microscopía electrónica de transmisión (*TEM*, por sus siglas en inglés), redes neuronales artificiales (*ANN*, por sus siglas en inglés), espectrometría de masas (*MS*, por

sus siglas en inglés), equilibrio del radio de absorción (*ESR*, por sus siglas en inglés), espectroscopía ultravioleta visible (*UV-vis* equilibrio del radio de absorción), pruebas de absorción, pruebas de liberación farmacológica, pruebas reológicas y ensayos *in vitro* e *in vivo* de biocompatibilidad, proliferación celular y capacidad antimicrobiana (Rožanc & Maver, 2023).

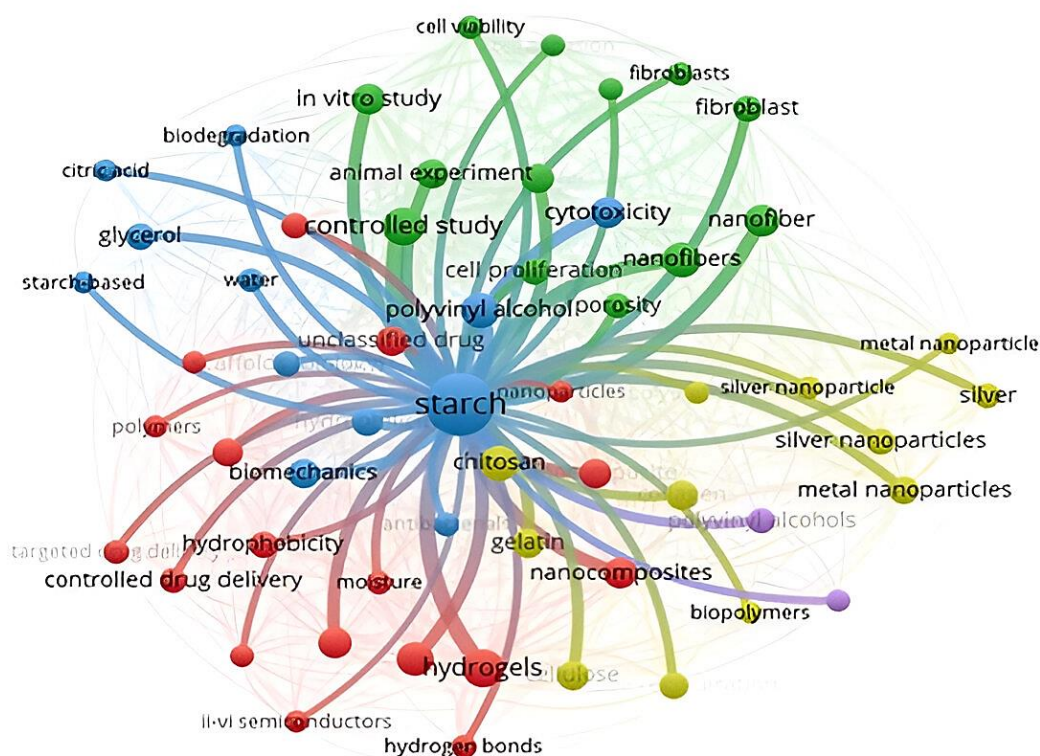


Figura 6. Mapa bibliométrico de la asociación entre almidón, aditivos y otros biopolímeros y las propiedades obtenidas

Notas aclaratorias: en azul se muestran los aditivos que se emplean con mayor frecuencia junto al almidón; en amarillo aparecen otros biopolímeros y minerales asociados al almidón; en verde están los ensayos que se le han realizado a este tipo de asociaciones y en rojo las propiedades obtenidas gracias a la sinergia de los materiales.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 7 se muestra un mapa bibliométrico de los métodos de caracterización de biomateriales utilizados en los estudios revisados. Los análisis de *FTIR* muestran el reemplazo total o parcial de los grupos hidroxilo y carboxilo, característicos de biopolímeros como el almidón, por otros grupos funcionales. Algunos investigadores muestran la aparición de picos correspondientes a polifenoles y anillos aromáticos provenientes del extracto de plantas, utilizados como aditivo (Aliabadi et al., 2020; Hadisi et al., 2018). Grupos de aldehídos, acetal y hemiacetal, asociados a las esferas de almidón carboximetil oxidado, fueron descritos en uno de los estudios revisados (Luan et al., 2021). La vibración de enlaces carbono-nitrato, junto a picos de intensidad variable correspondientes a grupos hidroxilo, pueden encontrarse en la espectroscopía de hidrogel inyectable mezclado con nitrato de estroncio (Mao et al., 2020a). Los trabajos de algunos investigadores muestran grupos de amino que aparecen en el biomaterial

con la adición de gelatina y péptidos como TRAP-Cys-COOH. La intensidad de vibración de grupos de hidroxilos y carboxilos, asociados al almidón, también pueden aumentar con la incorporación de nitrato de plata y biopolímeros como la celulosa y el quitosano o los polímeros sintéticos como el *PVA*, utilizados para formar hidrogeles compuestos, donde estos han mostrado una mayor capacidad de resistencia mecánica, biocompatibilidad y liberación controlada de fármacos (Dodda et al., 2022; Mao et al., 2020b; Salehi et al., 2017; Yeniyay et al., 2018).

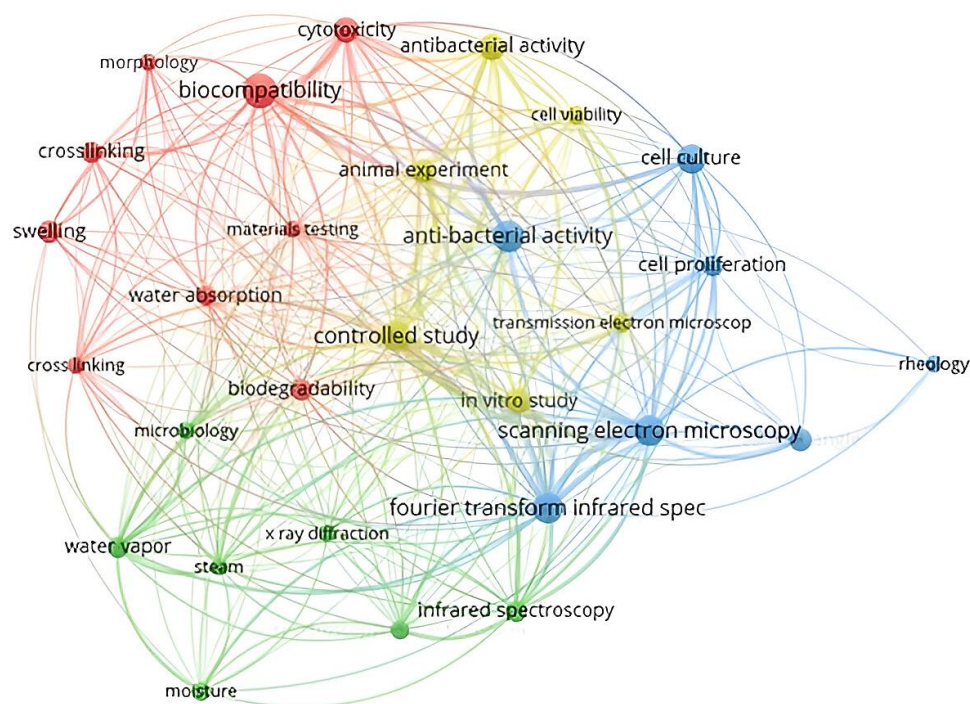


Figura 7. Mapa bibliométrico de los métodos de caracterización de biomateriales utilizados en los estudios revisados

Notas aclaratorias: en rojo se muestra la asociación entre los métodos de caracterización y propiedades del biomaterial como reticulación (*crosslinking*), la capacidad de absorción de agua (*swelling*), la biocompatibilidad (*biocompatibility*) y la citotoxicidad (*cytotoxicity*); en amarillo se pueden observar los estudios *in vitro* e *in vivo* realizados; en verde se aprecian los métodos de caracterización fisicoquímica, y en azul la asociación entre estos últimos y los ensayos *in vitro* e *in vivo*.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, métodos analíticos como *XRD*, *MS* y *EDX* son empleados para determinar la composición química de los biomateriales obtenidos y la cristalinidad asociada a la amilopectina presente en el almidón. Algunos estudios muestran que la cristalinidad observada en *XRD* puede ser asociada a la interacción del almidón con otros materiales como gelatina, *PVA* y ácido acrílico (Ahmed et al., 2020a; Das et al., 2020). Otros estudios emplean *EDX* y *MS* para corroborar la composición química de la arcilla atapulgita y el propóleo, garantizando la concentración mínima de los minerales permitidos para el uso farmacológico (Elbassyoni et al., 2020; Eskandarinia et al., 2019) o para establecer si existe interacción química entre el nitrato de plata y los grupos

funcionales de un biopolímero (Salehi et al., 2017). Otras técnicas son empleadas para garantizar la formación de nanopartículas a partir de una reacción química empleada, es el caso de la *UV-vis* utilizada por uno de los investigadores (Batoool et al., 2019).

Las técnicas de microscopía son empleadas en la caracterización morfológica de biomateriales que interactúan con la estructura del apósito. *SEM*, *TEM* y *AFM* son algunas de las técnicas utilizadas por los autores. La estructura del apósito está determinada por los materiales que se emplean para su obtención y la técnica de elaboración empleada; mientras que los cambios estructurales están directamente relacionados con las capacidades funcionales del biomaterial investigado (Li et al., 2023).

Mediante *SEM*, se pudo apreciar que la superficie de la matriz polimérica a base de almidón tiende a ser densa, rugosa y porosa; esta última característica disminuye con la incorporación de nanopartículas de plata y zinc o la incorporación de propóleo, *PVA*, quitosano, poliuretano y almidón carboximetil (Aktürk et al., 2019; Baghaie et al., 2017). Por el contrario, las porosidades tienden a aumentar cuando se emplea gelatina y ácido poliláctico como aditivos en la biomembrana (Su et al., 2019; Yeniay et al., 2018), característica que también aumenta con la implementación del liofilizado de la solución. El secado por enfriamiento es utilizado para modificar la estructura de la solución polimérica, aumentando el número, el tamaño y la interconexión de poros que naturalmente presenta el almidón, además, la presencia de porosidades en el apósito está directamente relacionada con la capacidad de absorción y retención de líquido.

Otros estudios utilizaron *AFM*, *TEM* y *DLS* para determinar tamaño y forma de nanopartículas de extractos vegetales utilizados, observar su distribución en la matriz polimérica y evaluar la densidad de la biomembrana o la esponja elaborada (Das et al., 2020; Mojally et al., 2022; Su et al., 2019), por ejemplo, la concentración de aceites en el apósito forma una capa densa y rugosa que puede facilitar la adherencia de células involucradas con la cicatrización del tejido afectado (Altaf et al., 2021).

La temperatura a la cual se expone el biomaterial determina la estabilidad de sus componentes, su capacidad de acción y la duración de su efecto; por lo que la estabilidad térmica de los biomateriales es evaluada mediante *TGA* y *DSC*, encontrando que el aumento en la concentración de almidón mejora la resistencia de la biomembrana a temperaturas mayores a 120 °C (Kuchaiyaphum et al., 2020), además, los aditivos empleados para mejorar las características fisicoquímicas de los apósitos también modifican la resistencia térmica. Extractos vegetales adicionados a la matriz polimérica evitan la degradación de las biomembranas a temperaturas cercanas a los 226,3 °C (Sabando et al., 2020) y la interacción entre gelatina y almidón hace que la matriz polimérica tolere temperaturas sobre los 240 °C (Su et al., 2019). Por su parte, la estabilidad térmica de la esponja liofilizada es evaluada en uno de los estudios, donde se asocia el proceso de degradación con la pérdida de peso del biomaterial, a medida que se expone a una temperatura mayor y encontrando que la mayor tasa de degradabilidad ocurre entre los 261 °C y los 284 °C (Long et al., 2022).

El comportamiento de absorción es un criterio principal y significativo para evaluar cómo se comportará el apósito con la herida. La capacidad de absorción de los apósitos elaborados se establece a partir de la diferencia entre el peso del apósito antes (*W_d*) y después (*W_s*) de ser

expuesto a una solución determinada, donde el resultado de esta operación se expresa en porcentaje y se conoce como grado o índice de absorción (ecuación 1) (Poonguzhali et al., 2018). Para obtener el W_s , el apósito es expuesto a soluciones *buffer* de fosfato (PBS), cloruro de sodio (NaCl) a 0,9 % de concentración, cloruro de magnesio ($MgCl_2$) también a 0,9 % y sangre, controlando tiempo, temperatura y pH, de acuerdo con las variables fisiológicas que se pueden encontrar en un tejido vivo.

$$\% \text{ de absorción} = (W_s - W_d) / W_d \times 100 \text{ (ecuación 1)}$$

Altos índices de absorción son asociados con una mayor cantidad de grupos de hidroxilo y carboxilo en el almidón. La incorporación de aditivos como la arcilla atapulgita y la cúrcuma mejoran la capacidad de absorción por su alta cantidad de grupos de hidroxilos y carboxilos (Elbassyoni et al., 2020; Hassan et al., 2018); mientras que componentes como la harina de cáscara de plátano (*BPP*, por sus siglas en inglés), terpenos, diacetil almidón (*DAS*, por sus siglas en inglés) y ácidos grasos, hacen que el material sea más hidrofóbico mediante la modificación química de los biopolímeros utilizados (Costa et al., 2020; Kuchaiyaphum et al., 2020; Mistry et al., 2021).

Cambios morfológicos relacionados con el número y el tamaño de las porosidades presentes en el biomaterial también se asocian con el índice de absorción. La esponja es el tipo de apósito que muestra una mayor capacidad de absorción de líquido, debido a que tiene gran cantidad de porosidades interconectadas entre sí, sin embargo, una parte del almidón y el glicerol utilizado en su elaboración puede solubilizarse, limitando el tiempo de retención del líquido (Jungprasertchai et al., 2022; Long et al., 2022). Otros estudios mostraron que algunos aditivos como las nanopartículas de plata pueden mejorar el índice de absorción de la biomembrana, generando una expansión de sus porosidades (Ng et al., 2023).

La tasa de transmisión de vapor de agua ($WVTR$) proporciona información sobre las propiedades de la barrera del material. Apósitos con $WVTR$ muy altas pueden provocar la deshidratación de la herida, mientras que aquellos con $WVTR$ muy bajas pueden generar la maceración del tejido cicatrizal por acumulación de exudados; una $WVTR$ de $2028,3 \pm 237,8$ g/m² al día brinda la humedad óptima para promover la correcta cicatrización en heridas de piel en animales vivos (Xu et al., 2016).

La norma ASTM E96/E96M-05 (Kumaran, 1998) es el método de referencia para la evaluación de $WVTR$ en diferentes materiales, esto permite comparar la tasa de transmisión de vapor entre los distintos apósitos expuestos a las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa. Algunos estudios mostraron una estrecha relación entre la presencia de grupos de hidroxilos, enlaces carbono-hidrógeno y las porosidades del biomaterial con $WVTR$ alta, sin embargo, estas propiedades disminuyeron considerablemente la capacidad de estiramiento de las biomembranas y las esponjas (Joorabloo et al., 2022; Luan et al., 2021; Ounkaew et al., 2020; Sethi et al., 2022).

El glicerol es un compuesto altamente hidrofílico que puede mejorar la $WVTR$, al retener moléculas de agua en un ambiente húmedo, sin afectar negativamente la capacidad de estiramiento. Por otro lado, almidones con mayor contenido de amilopectina tienen una gran cantidad de grupos de hidroxilo, que le otorgan mayor resistencia mecánica al biomaterial que conforma, sin disminuir la $WVTR$ (Moradi et al., 2023; Yang et al., 2019).

Por otra parte, cantidades bajas de *WVTR* son asociadas al empleo de aditivos como ácido esteárico, nitrato de carbón grafito y nanopartículas de ZnO que generan la modificación química y física del biomaterial, con el remplazo parcial de grupos de hidroxilos o la disminución en número y tamaño de porosidades de los biopolímeros elaborados (Adeli et al., 2019; Ahmed et al., 2020b; Tavakoli, 2017).

Las pruebas de resistencia a la tensión y la capacidad de estiramiento permiten analizar la capacidad reológica de los biomateriales empleados como apósitos. Durante su uso, los apósitos deben mantener el equilibrio entre la elasticidad, la flexibilidad y la adaptación a la tensión, al igual que lo hacen los tejidos vivos (Lopes et al., 2023). La resistencia de la piel a pruebas de tensión puede variar entre 1 y 32 MPa, mientras que la capacidad de estiramiento está entre el 17 % y el 207 %, donde los apósitos que obtuvieron valores similares resultaron ser apropiados para el tratamiento de heridas (Leon-Bejarano et al., 2023).

El almidón en su estado natural exhibe poca resistencia mecánica, debido a la estructura ramificada de la amilopectina, y a medida que aumenta la concentración de almidón, la resistencia a la tensión tiende a disminuir (Komur et al., 2017). Al reemplazar los grupos de hidroxilos pertenecientes a las moléculas de glucosa de la amilopectina por grupos de carboximetil, aumenta la densidad de reticulación de su estructura, mejorando las capacidades mecánicas del biopolímero (Luan et al., 2021; Mistry et al., 2021).

La incorporación de otros materiales y aditivos también afecta el comportamiento mecánico de la matriz polimérica del almidón, donde el quitosano aumenta la porosidad de las biomembranas y, en consecuencia, disminuye la reticulación de la estructura polimérica y la capacidad de estiramiento (Naseri et al., 2021; Baghaie et al., 2017). La adición de sulfonato de poliestireno sódico (PEDOT:PSS) promueve la formación de enlaces de hidrógeno entre los grupos de hidroxilos del almidón y los grupos de aminos del quitosano, mejorando el comportamiento mecánico de este último (Dodda et al., 2022). La celulosa y la arcilla orgánica generan una matriz compacta, viscosa y menos porosa, que muestra un mayor porcentaje de flexibilidad en biomembranas e hidrogeles (Dodda et al., 2022; Elbassioni et al., 2020; Azarian et al., 2019).

Paralelamente, para evaluar la capacidad antibacterial y la biocompatibilidad, los apósitos se han expuesto a ensayos *in vitro* e *in vivo*. Asimismo, los ensayos de viabilidad celular por reducción del compuesto (MTT) han mostrado que los apósitos elaborados a partir de biopolímeros permiten una mayor viabilidad celular que los polímeros sintéticos (Aliabadi et al., 2020), por otro lado, la compatibilidad de biomembranas con las células animales se asocia a su capacidad hidrofílica, la cual mejora la adsorción proteica y facilita la adhesión celular (Joorabloo et al., 2022). Dicha biocompatibilidad puede aumentar gracias a la adición de materiales que afectan positivamente la capacidad hidrofílica de los apósitos, como por ejemplo, el almidón y la pectina cítrica. Además, esta última, gracias a su pH ácido, tiene un efecto antibacterial (Ruksanti et al., 2021). En las esponjas, la adhesión celular está relacionada con la cantidad y el tamaño de porosidades, permitiendo la liberación controlada de aditivos y la biodegradación del biomaterial a los cinco días posexposición (Es-haghi et al., 2017; Yeniy et al., 2018).

La mayoría de los aditivos utilizados en los apósitos se emplean con la finalidad de potenciar el efecto antibacterial en los biopolímeros. Las nanopartículas de zinc y la heparina muestran sinergismo en la capacidad antibacterial de biomembranas, en ensayos *in vivo* con animales, donde

promueven la síntesis de colágeno y facilitan la cicatrización de las heridas, logrando la recuperación total del tejido en menor tiempo (Baghaie et al., 2017; Joorabloo et al., 2022). En el hidrogel inyectable, el estroncio promueve la angiogénesis, acelerando el proceso de cicatrización y reduciendo el crecimiento bacteriano atribuido a la reducción del nitrato (Mao et al., 2020a).

Los extractos vegetales, los aceites, las partículas de *BPP* y las nanopartículas del extracto de *Diospyrus lotus*, *Lignosus rhinocerotis* y sulfadiazina de plata, muestran una buena capacidad antibacterial (Alborzi et al., 2021; Batool et al., 2019; Faris Taufeq et al., 2023; Yeniyay et al., 2018), además, su eficacia antibacterial puede estar relacionada con la presencia de compuestos polifenólicos hidrosolubles y antocianinas y taninos hidrolizables en el extracto, ya que estos son capaces de degradar la pared celular, romper la membrana citoplasmática, dañar las proteínas de la membrana del microorganismo e interferir con las enzimas integradas en la membrana, causando la muerte celular (Costa et al., 2020; Hasan Shahriari et al., 2023; Lopes et al., 2023).

Los ensayos *in vivo* comparan el tiempo y la calidad de cicatrización de heridas tratadas con apósitos o sin tratar, encontrando una menor inflamación y una mejor cicatrización entre 10 y 21 días después de iniciado el tratamiento de las lesiones tratadas con bioapósitos (Adeli et al., 2019; Li et al., 2023; Mao et al., 2020b; Ounkaew et al., 2020). El único ensayo *in vivo* realizado en humanos mostró que la cicatrización total de la herida ocurrió entre los 14 y los 21 días, utilizando membranas de hidrogel a base de almidón, cargados con nanopartículas de zeolita y *Matricaria chamomilla* (Salehi et al., 2017).

Conclusiones

Las revisiones sistemáticas pueden dar respuesta a preguntas que no resuelven artículos individuales, la metodología Prisma permite construir revisiones rigurosas fundamentadas en la evidencia científica, gracias a un conjunto de pautas que facilitan su replicabilidad y la comparación e interpretación de los resultados; sin embargo, dicha metodología no aborda la formulación de las preguntas de investigación ni garantiza la calidad de los estudios incluidos en la revisión.

Para la elaboración de membranas biológicas, esponjas e hidrogeles, se utiliza almidón, ya que este permite la interacción de los diversos componentes de la matriz, lo cual otorga características esenciales para elaborar apósitos. Cada uno de estos apósitos presentan algunas ventajas sobre los otros; así, por ejemplo, las membranas biológicas son económicas, se adaptan bien a la superficie de heridas y proporcionan una protección efectiva, mientras que las esponjas tienen una alta capacidad de absorción de líquidos y son útiles en heridas con sangrado profuso. Por su parte, los hidrogeles a base de almidón se utilizan para abordar la pérdida de tejido vivo y también como vehículo para administrar compuestos en heridas más profundas.

Vale destacar que la incorporación de aditivos a la matriz polimérica permite modificar las propiedades fisicoquímicas, estructurales y funcionales de los apósitos a base de almidón. Además, las técnicas de obtención de apósitos también influyen en las propiedades del apósito, donde dentro de las técnicas de obtención, la fundición de soluciones es común para integrar nanopartículas y otros materiales en la matriz polimérica.

Por otro lado, el electrohilado permite construir redes poliméricas y crear nanofibras con alta relación superficie-volumen, lo que mejora la bioactividad del apósito; mientras que el liofilizado crea esponjas con gran capacidad de absorción y retención de líquido, y la impresión 3D es una técnica innovadora que permite fabricar estructuras biocompatibles con ventajas en el intercambio gaseoso, retención de líquidos y liberación controlada de fármacos.

Los métodos de caracterización proporcionan información crucial sobre las propiedades fisicoquímicas, estructurales y funcionales de los biomateriales, permiten evaluar los cambios generados por las modificaciones químicas del almidón y la incorporación de aditivos a la matriz polimérica, lo que ayuda en el diseño y el desarrollo de nuevos materiales con aplicaciones biomédicas. Los estudios futuros estarán encaminados en mejorar las técnicas de elaboración de apósitos, buscando el aprovechamiento de diferentes recursos naturales de manera económica y que permitan la replicabilidad de los apósitos a gran escala.

Agradecimientos

Al programa de Maestría en Ciencias Biológicas, a la Facultad de Ciencias de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), al Grupo de Investigación en Ciencias Biomédicas UPTC (GICBUPTC) y al Grupo de Investigación Catálisis UPTC.

Contribución de los autores

Francisco Bernal: conceptualización, análisis formal, adquisición de datos, investigación, metodología, redacción del borrador original; Oscar Pardo: supervisión, validación, redacción, revisión y edición; Alexandra Segura: supervisión, validación, redacción, revisión y edición.

Implicaciones éticas

El presente artículo de revisión sistemática se realizó siguiendo las directrices de la metodología Prisma, respetando todos los derechos de autor y el manejo de la información de los artículos revisados.

Conflicto de interés

Los autores manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Financiación

Los autores declaran que no recibieron financiación para la realización de este estudio.

Referencias

- Adeli, H., Khorasani, M. T., & Parvazinia, M. (2019). Wound dressing based on electrospun PVA/chitosan/starch nanofibrous mats: Fabrication, antibacterial and cytocompatibility evaluation and in vitro healing assay. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122, 238-254. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.115>
- Ahmed, A., Khan Niazi, M. B., Jahan, Z., Ahmad, T., Hussain, A., Pervaiz, E., Janjua, H. A., & Hussain, Z. (2020a). In-vitro and in-vivo study of superabsorbent PVA/Starch/g-C₃N₄/Ag@TiO₂ NPs hydrogel membranes for wound dressing. *European Polymer Journal*, 130(109650), 109650. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109650>
- Ahmed, A., Khan Niazi, M. B., Jahan, Z., Samin, G., Pervaiz, E., Hussain, A., & Mehran, M. T. (2020b). Enhancing the thermal, mechanical and swelling properties of PVA/starch nanocomposite membranes incorporating g-C₃N₄. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(1), 100-115. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01592-y>
- Aktürk, A., Erol Taygun, M., Karbancıoğlu Güler, F., Goller, G., & Küçükbayrak, S. (2019). Fabrication of antibacterial polyvinylalcohol nanocomposite mats with soluble starch coated silver nanoparticles. *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 562, 255-262. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.11.034>
- Alborzi, Z., Izadi-Vasafi, H., & Ghayoumi, F. (2021). Wound dressings based on chitosan and gelatin containing starch, sesame oil and banana peel powder for the treatment of skin burn wounds. *Journal of Polymer Research*, 28(2). <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02427-y>
- Aliabadi, M., Shin Chee, B., Matos, M., Cortese, Y. J., Nugent, M. J. D., de Lima, T. A. M., Magalhães, W. L. E., & Goetten de Lima, G. (2020). Yerba mate extract in microfibrillated cellulose and corn starch films as a potential wound healing bandage. *Polymers*, 12(12), 2807. <https://doi.org/10.3390/polym12122807>
- Altaf, F., Khan Niazi, M. B., Jahan, Z., Ahmad, T., Akram, M. A., Safdar, A., Shoaib Butt, M., Noor, T., & Sher, F. (2021). Synthesis and characterization of PVA/starch hydrogel membranes incorporating essential oils aimed to be used in wound dressing applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(1), 156-174. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01866-w>
- Ansarizadeh, M., Haddadi, S. A., Amini, M., Hasany, M., & Ramazani SaadatAbadi, A. (2020). Sustained release of CIP from TiO₂-PVDF/starch nanocomposite mats with potential application in wound dressing. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(30), 48916. <https://doi.org/10.1002/app.48916>
- Baghaie, S., Khorasani, M. T., Zarrabi, A., & Moshtaghian, J. (2017). Wound healing properties of PVA/starch/chitosan hydrogel membranes with nano Zinc oxide as antibacterial wound dressing material. *Journal of Biomaterials Science. Polymer Edition*, 28(18), 2220-2241. <https://doi.org/10.1080/09205063.2017.1390383>

- Batool, S., Hussain, Z., Khan Niazi, M. B., Liaqat, U., & Afzal, M. (2019). Biogenic synthesis of silver nanoparticles and evaluation of physical and antimicrobial properties of Ag/PVA/starch nanocomposites hydrogel membranes for wound dressing application. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 52, 403-414. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.05.016>
- Costa, N. N., de Faria Lopes, L., Freitas Ferreira, D., López de Prado, E. M., Severi, J. A., Alves Resende, J., de Paula Careta, F., Pimentel Ferreira, M. C., Gasparelli Carreira, L., Lamas de Souza, S. O., Pinto Cotrim, M. A., Boeing, T., Faloni de Andrade, S., Lambert Oréfice, R., & Oliveira Villanova, J. C. (2020). Polymeric films containing pomegranate peel extract based on PVA/starch/PAA blends for use as wound dressing: In vitro analysis and physicochemical evaluation. *Materials Science & Engineering: C*, 109, 110643. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110643>
- da Silva, G. L. P., de Assunção Moraes, L. C., Bonametti Olivato, J., Marini, J., & Colerato Ferrari, P. (2021). Antimicrobial dressing of silver sulfadiazine-loaded halloysite/cassava starch-based (bio)nanocomposites. *Journal of Biomaterials Applications*, 35(9), 1096-1108. <https://doi.org/10.1177/0885328221995920>
- Das, A., Bhattacharyya, S., Uppaluri, R., & Das, C. (2020). Optimality of poly-vinyl alcohol/starch/glycerol/citric acid in wound dressing applicable composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 260-272. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.185>
- de Lima Lima, T. de P., & Fonseca Passos, M. (2021). Skin wounds, the healing process, and hydrogel-based wound dressings: a short review. *Journal of Biomaterials Science. Polymer Edition*, 32(14), 1910-1925. <https://doi.org/10.1080/09205063.2021.1946461>
- Delavari, M. M., & Stiharu, I. (2022). Preparing and characterizing novel biodegradable starch/PVA-based films with nano-sized zinc-oxide particles for wound-dressing applications. *Applied Sciences*, 12(8), 4001. <https://doi.org/10.3390/app12084001>
- Dodda, J. M., Ghafouri Azar, M., Bělský, P., Šlouf, M., Brož, A., Bačáková, L., Kadlec, J., & Remiš, T. (2022). Biocompatible hydrogels based on chitosan, cellulose/starch, PVA and PEDOT:PSS with high flexibility and high mechanical strength. *Cellulose*, 29(12), 6697-6717. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04686-4>
- Elbassiyoni, S., Kamoun, E. A., Taha, T. H., Rashed, M. A., & ElNozahi, F. A. (2020). Effect of Egyptian attapulgit clay on the properties of PVA-HES-clay nanocomposite hydrogel membranes for wound dressing applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(6), 4737-4749. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04501-x>
- El-Hefnawy, M. E., Alhayyani, S., El-Sherbiny, M. M., Sakran, M. I., & El-Newehy, M. H. (2022). Fabrication of nanofibers based on hydroxypropyl starch/polyurethane loaded with the biosynthesized silver nanoparticles for the treatment of pathogenic microbes in wounds. *Polymers*, 14(2), 318. <https://doi.org/10.3390/polym14020318>

- Es-haghi, A., Mashreghi, M., Rezazade Bazaz, M., Homayouni-Tabrizi, M., & Darroudi, M. (2017). Fabrication of biopolymer based nanocomposite wound dressing: evaluation of wound healing properties and wound microbial load. *IET Nanobiotechnology*, 11(5), 517-522. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2016.0160>
- Eskandarinia, A., Kefayat, A., Rafienia, M., Agheb, M., Navid, S., & Ebrahimpour, K. (2019). Cornstarch-based wound dressing incorporated with hyaluronic acid and propolis: In vitro and in vivo studies. *Carbohydrate Polymers*, 216, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.091>
- Faris Taufeq, F. Y., Habideen, N. H., Nagaswa Rao, L., Kumar Podder, P., & Katas, H. (2023). Potential hemostatic and wound healing effects of thermoresponsive wound dressing gel loaded with Lignosus rhinocerotis and Punica granatum extracts. *Gels*, 9(1), 48. <https://doi.org/10.3390/gels9010048>
- Fernandes, M., Padrão, J., Ribeiro, A. I., Fernandes, R. D. V., Melro, L., Nicolau, T., Mehravani, B., Alves, C., Rodrigues, R., & Zille, A. (2022). Polysaccharides and metal nanoparticles for functional textiles: A review. *Nanomaterials*, 12(6), 1006. <https://doi.org/10.3390/nano12061006>
- Goh, O. Q., Ganesan, G., Graves, N., Ng, Y. Z., Harding, K., & Tan, K. B. (2020). Incidence of chronic wounds in Singapore, a multiethnic Asian country, between 2000 and 2017: A retrospective cohort study using a nationwide claims database. *BMJ Open*, 10(9), e039411. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-039411>
- Gong, F., Yang, N., Xu, J., Yang, X., Wei, K., Hou, L., Liu, B., Zhao, H., Liu, Z., & Cheng, L. (2023). Calcium hydride-based dressing to promote wound healing. *Advanced Healthcare Materials*, 12(2). <https://doi.org/10.1002/adhm.202201771>
- Hadisi, Z., Nourmohammadi, J., & Nassiri, S. M. (2018). The antibacterial and anti-inflammatory investigation of Lawsonia Inermis-gelatin-starch nano-fibrous dressing in burn wound. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 2008-2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.061>
- Hassan, A., Khan Niazi, M. B., Hussain, A., Farrukh, S., & Ahmad, T. (2018). Development of anti-bacterial PVA/starch based hydrogel membrane for wound dressing. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(1), 235-243. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-0944-2>
- Hasan Shahriari, M., Abdouss, M., & Hadjizadeh, A. (2023). Synthesis of dual physical self-healing starch-based hydrogels for repairing tissue defects. *Polymer Engineering & Science*, 63(3), 798-810. <https://doi.org/10.1002/pen.26245>
- Hernández-González, V., Sans-Rosell, N., Jové-Deltell, M. C., & Reverter-Masia, J. (2016). Comparación entre Web of Science y Scopus, estudio bibliométrico de las revistas de anatomía y morfología. *Revista Internacional de Morfología*, 34(4), 1369-1377. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022016000400032>

- Hossein Azarian, M., Boochathum, P., & Kongsema, M. (2019). Biocompatibility and biodegradability of filler encapsulated chloroacetated natural rubber/polyvinyl alcohol nanofiber for wound dressing. *Materials Science & Engineering: C*, 103, 109829. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.109829>
- Hu, H., & Xu, F. J. (2020). Rational design and latest advances of polysaccharide-based hydrogels for wound healing. *Biomaterials Science*, 8(8), 2084-2101. <https://doi.org/10.1039/d0bm00055h>
- Iqbal, H., Farrukh, S., Hussain, A., Hassan, A., & Hailegiorgis, S. M. (2019). Pursuance of *Piper nigrum* and *Cinnamomum verum* on poly vinyl alcohol-starch hydrogel membrane. *Journal of the Chemical Society of Pakistan. Chemical Society of Pakistan*, 41(3), 489. <https://doi.org/10.52568/000761/jcsp/41.03.2019>
- Joorabloo, A., Khorasani, M. T., Adeli, H., Brouki Milan, P., & Amoupour, M. (2022). Using artificial neural network for design and development of PVA/chitosan/starch/heparinized nZnO hydrogels for enhanced wound healing. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 108, 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.12.027>
- Jungprasertchai, N., Chuysinuan, P., Ekabutr, P., Niamlang, P., & Supaphol, P. (2022). Freeze-dried carboxymethyl chitosan/starch foam for use as a haemostatic wound dressing. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(3), 1106-1117. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02260-w>
- Komur, B., Bayrak, F., Ekren, N., Eroglu, M. S., Oktar, F. N., Sinirlioglu, Z. A., Yucel, S., Guler, O., & Gunduz, O. (2017). Starch/PCL composite nanofibers by co-axial electrospinning technique for biomedical applications. *Biomedical Engineering Online*, 16(1), 40. <https://doi.org/10.1186/s12938-017-0334-y>
- Kuchaiyaphum, P., Chotichayapong, C., Butwong, N., & Bua-ngern, W. (2020). Silk fibroin/poly (vinyl alcohol) hydrogel cross-linked with dialdehyde starch for wound dressing applications. *Macromolecular Research*, 28(9), 844-850. <https://doi.org/10.1007/s13233-020-8110-4>
- Kumaran, M. K. (1998). Interlaboratory comparison of the ASTM standard test methods for water vapor transmission of materials (E 96-95). *Journal of Testing and Evaluation*, 26(2), 83-88. <https://doi.org/10.1520/jte11977j>
- Labelle, M. A., Ispas-Szabo, P., & Mateescu, M. A. (2020). Structure-functions relationship of modified starches for pharmaceutical and biomedical applications. *Die Starke*, 72(7-8). <https://doi.org/10.1002/star.202000002>
- Leon-Bejarano, M., Santos-Sauceda, I., Dórame-Miranda, R. F., Medina-Juárez, L. Á., Gámez-Meza, N., García-Galaz, A., Simsek, S., & Ovando-Martínez, M. (2023). Characterization of OSA starch-based films with nut-byproducts extracts for potential application as natural wound dressing. *Polymer Bulletin*, 80, 13199-13215. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04707-7>

- Li, Q., Hu, E., Yu, K., Xie, R., Lu, F., Lu, B., Bao, R., Dai, F., & Lan, G. (2023). Gemini dressing with both super-hydrophilicity and -hydrophobicity pursuing isolation of blood cells for hemostasis and wound healing. *Advanced Fiber Materials*, 5(4), 1447-1466. <https://doi.org/10.1007/s42765-023-00280-w>
- Long, L. Y., Hu, C., Liu, W., Wu, C., Lu, L., Yang, L., & Wang, Y. B. (2022). Microfibrillated cellulose-enhanced carboxymethyl chitosan/oxidized starch sponge for chronic diabetic wound repair. *Biomaterials Advances*, 135, 112669. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2022.112669>
- Lopes, P., Joaquineto, A. S. M., Ribeiro, A., Moura, N. M. M., Gomes, A. T. P., Guerreiro, S. G., Faustino, M. A. F., Almeida, A., Ferreira, P., Coimbra, M. A., Neves, M. G., & Gonçalves, I. (2023). Starch-based films doped with porphyrinoid photosensitizers for active skin wound healing. *Carbohydrate Polymers*, 313, 120894. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120894>
- Luan, Z., Zhang, H., Hu, J., Zhang, J., & Liu, Y. (2021). Crosslinked carboxymethyl starch nanofiber mats: Preparation, water resistance and exudates control ability. *European Polymer Journal*, 154, 110568. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110568>
- Malik, A., Rehman, F. U., Shah, K. U., Naz, S. S., & Qaisar, S. (2021). Hemostatic strategies for uncontrolled bleeding: A comprehensive update. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials*, 109(10), 1465-1477. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34806>
- Mao, Q., Hoffmann, O., Yu, K., Lu, F., Lan, G., Dai, F., Shang, S., & Xie, R. (2020b). Self-contracting oxidized starch/gelatin hydrogel for noninvasive wound closure and wound healing. *Materials & Design*, 194, 108916. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108916>
- Mao, Y., Pan, M., Yang, H., Lin, X., & Yang, L. (2020a). Injectable hydrogel wound dressing based on strontium ion cross-linked starch. *Frontiers of Materials Science*, 14(2), 232-241. <https://doi.org/10.1007/s11706-020-0508-6>
- Medina, O. J., Pardo, O. H., & Ortiz M, C. A. (2012). Modified arracacha starch films characterization and its potential utilization as food packaging. *Vitae*, 19(2), 186-196. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.10004>
- Meng, Q., Zhou, L., Zhong, S., Wang, J., Wang, J., Gao, Y., & Cui, X. (2023). Stimulus-responsive starch-based nanocapsules for targeted delivery and antibacterial applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 241, 124664. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124664>
- Mistry, P., Chhabra, R., Muke, S., Narvekar, A., Sathaye, S., Jain, R., & Dandekar, P. (2021). Fabrication and characterization of starch-TPU based nanofibers for wound healing applications. *Materials Science & Engineering: C*, 119, 111316. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111316>

- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Mojally, M., Sharmin, E., Obaid, N. A., Alhindi, Y., & Abdalla, A. N. (2022). Polyvinyl alcohol/corn starch/castor oil hydrogel films, loaded with silver nanoparticles biosynthesized in *Mentha piperita* leaves' extract. *Journal of King Saud University. Science*, 34(4), 101879. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101879>
- Moradi, M., Barati, A., Moradi, S., & Zarinabadi, E. (2023). Synthesis and characterization of starch-based hydrogels containing myrtus oil nanoemulsion for wound dressings. *Polymer Bulletin*, 81, 3043-3062. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04855-w>
- Movahedi, M., Asefnejad, A., Rafienia, M., & Khorasani, M. T. (2020). Potential of novel electrospun core-shell structured polyurethane/starch (hyaluronic acid) nanofibers for skin tissue engineering: In vitro and in vivo evaluation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 146, 627-637. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.233>
- Naseri, E., Cartmell, C., Saab, M., Kerr, R. G., & Ahmadi, A. (2021). Development of N,O-carboxymethyl chitosan-starch biomaterial inks for 3D printed wound dressing applications. *Macromolecular Bioscience*, 21(12), 2100368. <https://doi.org/10.1002/mabi.202100368>
- Neres Santos, A., Duarte Moreira, A. P., Piler Carvalho, C. W., Luchese, R., Ribeiro, E., McGuinness, G. B., Fernandes Mendes, M., & Nunes Oliveira, R. (2019). Physically cross-linked gels of PVA with natural polymers as matrices for manuka honey release in wound-care applications. *Materials*, 12(4), 559. <https://doi.org/10.3390/ma12040559>
- Ng, J. Y., Yu, P., Murali, D. M., Liu, Y. S., Gokhale, R., & Ee, P. L. R. (2023). The influence of pregelatinized starch on the rheology of a gellan gum-collagen IPN hydrogel for 3D bioprinting. *Chemical Engineering Research & Design*, 192, 477-486. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.02.042>
- Ounkaew, A., Kasemsiri, P., Jetsrisuparb, K., Uyama, H., Hsu, Y. I., Boonmars, T., Artchayasawat, A., Knijnenburg, J. T. N., & Chindaprasirt, P. (2020). Synthesis of nanocomposite hydrogel based carboxymethyl starch/polyvinyl alcohol/nanosilver for biomedical materials. *Carbohydrate Polymers*, 248, 116767. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116767>
- Poonguzhali, R., Khaleel Basha, S., & Sugantha Kumari, V. (2018). Fabrication of asymmetric nanostarch reinforced Chitosan/PVP membrane and its evaluation as an antibacterial patch for in vivo wound healing application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 114, 204-213. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.03.092>
- Punyanitya, S., Thiansem, S., Koonawoot, R., Sontichai, W., & Suchaitanawanit, S. (2020). Preparation and characterization of a new absorbent pad from rice starch. *Materials science forum*, 990, 91-95. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.990.91>

- Rožanc, J., & Maver, U. (2023). Methods for analyzing the biological and biomedical properties of biomaterials. En Mohan, T., & Kleinschek, K. S. (Eds.), *Functional biomaterials: Design and development for biotechnology, pharmacology, and biomedicine* (pp. 165-197). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527827657>
- Ruksanti, A., Mahapram, B., Thiansem, S., Koonawoot, R., & Punyanitya, S. (2021). Preparation and some physical characterization of rice starch - carboxymethyl cellulose as hemostatic film. *Materials Science Forum*, 1042, 117-122. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1042.117>
- Sabando, C., Ide, W., Rodríguez-Díaz, M., Cabrera-Barjas, G., Castaño, J., Bouza, R., Müller, N., Gutiérrez, C., Barral, L., Rojas, J., Martínez, F., & Rodríguez-Llamazares, S. (2020). A novel hydrocolloid film based on pectin, starch and Gunnera tinctoria and Ugni molinae plant extracts for wound dressing applications. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 20(4), 280-292. <https://doi.org/10.2174/1568026620666200124100631>
- Sahana, T. G., & Rekha, P. D. (2018). Biopolymers: Applications in wound healing and skin tissue engineering. *Molecular Biology Reports*, 45(6), 2857-2867. <https://doi.org/10.1007/s11033-018-4296-3>
- Salehi, H., Mehrasa, M., Nasri-Nasrabadi, B., Doostmohammadi, M., Seyedebrahimi, R., Davari, N., Rafienia, M., Hosseinabadi, M., Agheb, M., & Siavash, M., (2017). Effects of nanozeolite/starch thermoplastic hydrogels on wound healing. *Journal of Research in Medical Sciences: The Official Journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 22(1), 110. https://doi.org/10.4103/jrms.jrms_1037_16
- Selvaraj, D., Viswanadha Vijaya, P., & Elango, S. (2015). Wound dressings - a review. *Biomedicine*, 5(4), 22. <https://doi.org/10.7603/s40681-015-0022-9>
- Sethi, S., Saruchi, Medha, Thakur, S., Kaith, B. S., Sharma, N., Ansar, S., Pandey, S., & Kuma, V. (2022). Biopolymer starch-gelatin embedded with silver nanoparticle-based hydrogel composites for antibacterial application. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(11), 5363-5384. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02437-w>
- Su, C., Zhao, H., Yang, H., & Chen, R. (2019). Stearic acid-modified starch/chitosan composite sponge with asymmetric and gradient wettability for wound dressing. *ACS Applied Bio Materials*, 2(1), 171-181. <https://doi.org/10.1021/acsabm.8b00508>
- Tavakoli, J. (2017). Physico-mechanical, morphological and biomedical properties of a novel natural wound dressing material. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 65, 373-382. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.09.008>
- Torres, F. G., Commeaux, S., & Troncoso, O. P. (2013). Starch-based biomaterials for wound-dressing applications. *Die Starke*, 65(7-8), 543-551. <https://doi.org/10.1002/star.201200259>

- Wu, W. C., Hsiao, P. Y., & Huang, Y. C. (2019). Effects of amylose content on starch-chitosan composite film and its application as a wound dressing. *Journal of Polymer Research*, 26, 137. <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1770-0>
- Xu, R., Xia, H., He, W., Li, Z., Zhao, J., Liu, B., Wang, Y., Lei, Q., Kong, Y., Bai, Y., Yao, Z., Yan, R., Li, H., Zhan, R., Yang, S., Luo, G., & Wu, J. (2016). Controlled water vapor transmission rate promotes wound-healing via wound re-epithelialization and contraction enhancement. *Scientific Reports*, 6(1), 24596. <https://doi.org/10.1038/srep24596>
- Yang, X., Liu, W., Shi, Y., Xi, G., Wang, M., Liang, B., Feng, Y., Ren, X., & Shi, C. (2019). Peptide-immobilized starch/PEG sponge with rapid shape recovery and dual-function for both uncontrolled and noncompressible hemorrhage. *Acta Biomaterialia*, 99, 220-235. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.08.039>
- Yeniay, E., Öcal, L., Altun, E., Giray, B., Nuzhet Oktar, F., Talat Inan, A., Ekren, N., Kilic, O., & Gunduz, O. (2018). Nanofibrous wound dressing material by electrospinning method. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 68(1-3), 11-18. <https://doi.org/10.1080/00914037.2018.1525718>

Anexo

Anexo 1. Características de los artículos revisados

Referencia	Tipos de apósito	Técnica de obtención	Polímeros y aditivos utilizados	Técnicas de caracterización y evaluación de las propiedades del biomaterial
Adeli et al., 2019	Biomembrana	Electrohilado	PVA, peso molecular ($M_w = 85.000-124.000$ Da), quitosano en grado de deacetilación al 90 % (ChitoTech Company) y almidón (Merck Company).	SEM, AFM, FTIR, WVTR, prueba de tensión y estiramiento, ensayo MTT de viabilidad y proliferación celular, y ensayo antibacterial <i>in vitro</i> .
Ahmed, Khan Niazi, Jahan, Ahmad et al., 2020a	Biomembrana	Técnica de fundición de soluciones (TFS)	PVA ($M_w = 30.000-70.000$ Da), almidón (Merck Company), síntesis de nitrato de carbono gráfico ($g-C_3N_4$) y óxido de titanio de plata ($Ag@TiO_2$).	XRD, FTIR, SEM, fracción de gel, habilidad de retención de humedad, WVTR, comportamiento de absorción, porosidad, permeabilidad de oxígeno, actividad antibacterial y de herida por escisión.
Ahmed, Khan Niazi, Jahan, Samin et al., 2020b	Biomembrana	TFS	PVA ($M_w = 30.000-70.000$ Da), almidón (Daejung Chemicals) y síntesis de nitrato de carbono gráfico ($g-C_3N_4$).	XRD, FTIR, SEM, TGA, fracción de gel, comportamiento de absorción, habilidad de retención de humedad, WVTR, porosidad y permeabilidad de oxígeno.
Aktürk et al., 2019	Biomembrana	Electrohilado e irradiación de microondas	PVA ($M_w = 85.000-124.000$ Da) (Acros. Co), nitrato de plata ($AgNO_3$) y almidón (Merck Company).	DLS, SEM, FTIR, XRD, MS y actividad antibacterial frente a <i>S. aureus</i> y <i>E. coli</i> .
Alborzi et al., 2021	Biomembrana	TFS	Quitano (CS) (Sigma-Aldrich), gelatina (GL), almidón de papa (ST) (Merck Company), aceite de sésamo (SO) y polvo de cascara de plátano (BPP) consecución local.	FTIR, capacidad de retención de agua, WVTR, prueba de tensión, SEM, prueba antibacterial, ensayo MTT, cultivo celular <i>in vitro</i> , ensayo en modelo <i>in vivo</i> y herida por quemadura.
Aliabadi et al., 2020	Biomembrana	TFS	Gel microfibrilado de celulosa (MFC), pulpa de papel de Eucalyptus (Suzano Papel e Celulose), almidón de maíz (Rhoster Ltd., Araçoiaba da Serra) y extracto de yerba mate (<i>Ilex paraguariensis</i> , A. St.-Hil).	FTIR, DSC, ensayo de liberación del extracto de yerba mate, actividad antioxidante, evaluación antibacterial, evaluación citotóxica, ensayo en modelo <i>in vitro</i> y herida por rasgado.
Altaf et al., 2021	Biomembrana	TFS	PVA y almidón (Daejung Chemicals), aceite de clavo, aceite de árbol de té y aceite de orégano 100 % puro (Plant therapy, Inc.).	SEM, FTIR, XRD, AFM, hidrofilicidad, WVTR, capacidad de retención de humedad, fracción de gel, porosidad de la membrana, absorción de agua, ensayo de tensión y actividad antibacterial.

Ansarizadeh et al., 2020	Biomembrana	Electrohilado	Fluoruro de polivinilideno (PVDF) (Mw = 455.000 g mol ⁻¹) (Merck Company), almidón de maíz (Sigma-Aldrich), ciprofloxacina (CIP) (Mojalali Co. y Exir Co.) y nanopartículas de dióxido de titanio (TiO ₂).	FTIR, SEM, pruebas de tensión y elasticidad, caracterización reológica, modelo de liberación de fármacos, modelo <i>in vitro</i> , cultivo celular, ensayo de MTT y actividad antibacterial.
Azarian et al., 2019	Biomembrana	Electrohilado	Latex de caucho natural (NRL) (Nam Rubber Co. Ltd.), PVAc (Mw = 145.000 Da) (Sigma-Aldrich), caolín (arcilla mineral de aluminio y silicato) (Lucky Unión Co. Ltd.) y almidón de maíz (Continental Food Co. Ltd.).	DSC, SEM, ensayo de viabilidad celular, biodegradabilidad y FTIR.
Baghaie et al., 2017	Biomembrana	TFS	Almidón (ST) (Sigma-Aldrich), PVAc (Mw = 72.000 gr/mol) (Merck Company), quitosano (CS) (Mw = 122.400 g mol ⁻¹) (Sigma Chemical Company), y nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) (Sigma-Aldrich).	ESR, WVT, capacidad de estiramiento, SEM, análisis citotóxico por ensayo de MTT, capacidad antibacterial, modelo <i>in vivo</i> y herida por excisión.
Batool et al., 2019	Biomembrana	TFS	Frutos de <i>Diospyros lotus</i> colectados en Malkot Abbottabad (Pakistán), PVAc (Mw = 1500) y almidón (Daejung Chemicals).	Espectroscopia UV-visible, FTIR, XRD, SEM, DLS, prueba de absorción de líquido, WVT, fracción de gel, capacidad de retención de líquido y capacidad antibacteriana.
Costa et al., 2020	Biomembrana	TFS	PVAc (Mw = 85.000-124.000 g mol ⁻¹), almidón de papa y ácido poliacrílico (PAA) (Sigma-Aldrich) y extracto de cáscara de granada (PPE) (Laboratory of Pharmaceutical Production of UFES).	Actividad antibacterial, capacidad de absorción de líquido, porcentaje de solubilidad, WVT, ensayo de biocompatibilidad, citotoxicidad y cicatrización <i>in vitro</i> .
da Silva et al., 2021	Biomembrana	TFS	Almidón de yuca (Agrícola Horizonte Paraná), nanotubos de haloisita (15 nm) (Applied Minerals Inc.) y sulfadiazina de plata (Fagron).	SEM, FTIR, XRD, capacidad de estiramiento, WVT y actividad antimicrobial.
Das et al., 2020	Biomembrana	TFS	PVAc (Mw = 72.000 g/mol) (Merck Company), almidón soluble y ácido cítrico de monohidrato (ACM) (Mw = 211,14 g/mol) (Merck Limited).	Grosor de la biomembrana, FTIR, ensayo de degradación y solubilidad <i>in vitro</i> , actividad antibacterial, evaluación de citotoxicidad y crecimiento celular <i>in vitro</i> .
Delavari & Stiharu, 2022	Biomembrana	TFS	Almidón de papa (Mw = 342,30 g/mol), PVAc (Mw = 16.000-23.000 g/mol), Óxido de Zinc (ZnO) (Sigma-Aldrich).	WVT, FTIR y espectroscopia UVvis, capacidad de absorción, solubilidad, capacidad de estiramiento, SEM, actividad antibacterial.
Dodda et al., 2022	Biomembrana	TFS	Quitosano (CS), almidón (S), celulosa microcristalina (C), PVAc (Mw = 146.000-186.000 KDa) y poli 3,4-etilendioxitiofeno-poliestireno	Capacidad de absorción, FTIR, microscopía de luz, XRD de ángulo pequeño y ancho, prueba de tensión, ensayo de

			sulfonato PEDOT: PSS (PP) (Sigma-Aldrich Co. Ltd.).	citotoxicidad y proliferación celular <i>in vitro</i> .
Elbassiyoni et al., 2020	Biomembrana	TFS	PVA (Mw = 72.000 g/mol) (Biochemica), arcilla atapulgita (AA) (Desert of Borg El Arab), almidón hidroxietil (HES) (Mw = 130.000 g/mol) (Sigma-Aldrich Chemie), cloruro de hexadecil trimetil amonio (HDTMA) (> 98 %) (Sigma-Aldrich Chemie).	Actividad antibacterial, ensayo de biocompatibilidad por prueba de hemólisis, FTIR, XRD, SEM, EDX, prueba de tensión y capacidad de absorción.
El-Hefnawy et al., 2022	Biomembrana	Electro hilado	Almidón hidroxipropílico (HPS) n.º 9049-76-7 (Shanghai Time Chemicals Co. Ltd.), poliuretano PU (Mw = 80 kg/mol-1) (Sigma Aldrich Co.), nitrato de plata (AgN ₃) (Sigma Aldrich Co.), planta de <i>Nerium Oleander</i> , familia Apocinaceae deternis (mercado local, Egipto).	Espectroscopia UVvis, FTIR, XRD, capacidad de retención de humedad y capacidad antibacteriana.
Es-haghi et al., 2017	Nanocompuesto	TFS	Óxido de cerio (CeO ₂), almidón, nanopartículas de plata y quitosano (síntesis realizada en laboratorio local).	TEM, modelo <i>in vivo</i> , cicatrización y actividad antibacterial.
Eskandarinia et al., 2019	Biomembrana	TFS	Almidón de maíz con alto contenido de amilosa (S4180) (Sigma-Aldrich), ácido hialurónico (HA) (Mw = 1,00-105 KDa) (Institute of Pasteur) y propóleo colectado manualmente (Isfahan).	FTIR, cromatografía, MS, SEM, capacidad de absorción, índice de degradación, actividad antibacterial, modelo <i>in vitro</i> , modelo <i>in vivo</i> y ensayo MTT para citotoxicidad.
Faris Taufeq et al., 2023	Biomembrana	TFS, deshidratación a 95-100 °C/ 1 liofilizado a 80 °C.	<i>Lignosus rhinocerotis</i> sclerotia (Lignas Bio Synergy Plt.), frutas de <i>Punica granatum</i> (Kuala Lumpur, Malasia), pluronic F-127 (Sigma-Aldrich) y PEG 400 (380-420 g/mol) (Merck Company).	FTIR, SEM, pruebas de estiramiento y tensión, prueba de absorción de líquido, capacidad antibacterial y ensayos de cicatrización <i>in vitro</i> .
Gong et al., 2023	Biomembrana	TFS	Colágeno, hidrógeno, interleucina 12, hidrogel a base de almidón e hidruro de calcio (Sigma-Aldrich Company).	Ensayos <i>in vivo</i> en modelos de animales pequeños y grandes (ratones diabéticos y sanos y minipigs).
Hadisi et al., 2018	Biomembrana	Electrohilado	Extracto de hojas de henna (<i>Lawsonia inermis</i>) (Kerman), gelatina (piel de porcino, tipo A) (Sigma-Aldrich Company) y almidón de papa (Biobasic).	FTIR, retención de líquido, DSC, ensayo <i>in vitro</i> , actividad antimicrobial y ensayo <i>in vivo</i> en ratón BALB/c como modelo.

Hasan Shahriari et al., 2023	Biomembrana	Solución homogénea y deshidratación a 60°C	Almidón, tetraborato de sodio, formazano y cúrcuma (Sigma-Aldrich Company).	SEM, FTIR, XRD y ángulo de contacto.
Hassan et al., 2018	Biomembrana	TFS	PVA, almidón, glutaraldehído (GA), ácido hidrociorhídrico (HCl) (Daejung Chemicals) y cúrcuma (mercado local Daejung).	FTIR, SEM, WVTR, capacidad de absorción de líquido, capacidad de retención de humedad, actividad antibacterial y prueba de estiramiento y tensión.
Iqbal et al., 2019	Biomembrana	TFS	PVA (Mw = 1500 KDa), almidón de maíz de calidad extra pura, glutaraldehído (GA) (Haen Chemicals), <i>Piper Nigrum</i> y <i>Cinnamomum Verum</i> (mercado local).	FTIR, SEM, prueba de tensión, actividad antimicrobial y WVTR.
Joorabloo et al., 2022	Biomembrana	TFS	PVA (Mw = 85-124 kg/mol), quitosano (Mw = 130-150 kg/mol) (Chitotech Company), óxido de zinc (ZnO) (Tecnan Company), sal de heparina sódica (Caspian-Tamin Company) y almidón de papa (Merck Company).	ANN, WVTR, SEM, viabilidad celular, adsorción de proteína, actividad antibacterial y ensayo <i>in vivo</i> .
Jungprasertchai et al., 2022	Esponja de carboximetil quitosan y almidón	Liofilizado (secado por enfriamiento)	Almidón de maíz (Sigma-Aldrich), carboximetil quitosano (CM) (Xi'an Lukee Biotech Co. Ltd.) y glicerol y glioxalato al 40 % de solución acuosa (Sigma-Aldrich).	Capacidad de absorción de líquido, SEM, ensayo de compresión, ensayo de citotoxicidad <i>in vitro</i> y ensayo de coagulación <i>in vitro</i> .
Komur et al., 2017	Biomembrana	Electrohilado	Almidón de maíz (Mw = 106 g/mol) (Sigma-Aldrich) y policaprolactona (PCL) (Mw = 80.000 g mol ⁻¹) (Sigma-Aldrich).	Densidad, viscosidad, conductividad eléctrica, FTIR, SEM, capacidad e tensión, capacidad de estiramiento y viabilidad celular <i>in vitro</i> .
Kuchaiyaphum et al., 2020	Biomembrana	TFS	Fibras de seda (SF) (Queen Sirikit Sericulture Center Nakhonratchasima), almidón de casava (CS) (San Guan Wongse Industries Co. Ltd.) y PVA (Mw = 85.000-124.000 kDa) (Aldrich Chemical Co. Inc.).	FTIR, ATR, capacidad de absorción de líquido, WVTR y TGA.
Leon-Bejarano et al., 2023	Biomembrana	TFS y deshidratación a 60 °C	Octenil succinil anhídrido (OSA), almidón de papa (Sigma-Aldrich).	Ensayos antibacteriales <i>in vitro</i> , SEM, FTIR, capacidad de absorción, WVTR y ensayos de estiramiento y tensión.
Li et al., 2023	Biomembrana	TFS y deshidratación a 60 °C	Glucomanano konjac (KGM), aerogel, almidón microporoso bifuncional (BMS) (Sigma-Aldrich).	XRD, FTIR, capacidad de absorción, ensayos antibacteriales <i>in vitro</i> y ensayos hemostáticos y de biocompatibilidad <i>in vivo</i> .
Long et al., 2022	Esponja microfibrilada de hidrogel	Liofilizado (secado por enfriamiento)	Carboximetil quitosano (CMC) (Shanghai Macklin Biochemical Co. Ltd.), almidón soluble	SEM, FTIR, XRD, TGA, ensayo de compresión, capacidad hemostática,

			(Shanghai Titan Scientific Co. Ltd.) y suspensión de celulosa microfibrilada (MFC) (Guilin Qihong Technology Co. Ltd.).	capacidad antibacterial <i>in vitro</i> y ensayo <i>in vivo</i> .
Lopes et al., 2023	Biomembrana	TFS	Almidón (70 % amilopectina (350 kDa) y 30 % amilosa (50 kDa)) (A Saloinha, Lda, a Portuguese potato chips industry), glicerol (LabChem) y 5,10,15,20-tetrakis (1-methylpyridinium-4-yl porfirina (TMPyP)).	Análisis colorimétrico, prueba de estiramiento y tensión, prueba de absorción y permeabilidad, liberación de TMPyP <i>in vitro</i> y propiedades fotodinámicas antimicrobiales.
Luan et al., 2021	Esferas de Almidón carboximetil, oxidado.	Electrohilado	Almidón carboximetil (CMS) (Aladdin Reagent) y periodato de sodio (NaIO ₄) (Xilong Chemical Company).	SEM, FTIR, capacidad de estiramiento, biocompatibilidad, ensayo <i>in vitro</i> , WVTR y rapidez de absorción.
Mao et al., 2020a	Biomembrana	TFS	Almidón soluble (ZhiYuan Chemicals. Co. Ltd.), gelatina (tipo A) y periodato de sodio (NaIO ₄) (Aladdin Chemical Co. Ltd.).	Capacidad de estiramiento, comportamiento de memoria de forma, ensayo de citotoxicidad <i>in vitro</i> y ensayo <i>in vivo</i> .
Mao et al., 2020b	Hidrogel inyectable	TFS	Almidón de maíz 100 % amilopectina (Lihua Starch Co. Ltd.), nitrato de estroncio en grado analítico (Sinopharm Chemical Reagent Co. Ltd.).	FTIR, capacidad de retención de líquido, ensayo de tensión de barrido, capacidad de adhesión, ensayo de biocompatibilidad <i>in vitro</i> , capacidad antibacterial y migración celular.
Meng et al., 2023	Esponja	Solución homogénea y liofilizada	1-Ethyl-3-(3-dimethyl-amine-propyl) carbodiimida hidroclicídrico (EDC, > 98 %), N-hydrox- y succinimida (NHS, > 97 %), L-Glutation (GSH, > 98 %), cúrcuma (> 98 %), L-lisina (Lys, > 98 %) (Aladdin Industrial Corporation), almidón (≥ 99 %) (Henan Wanbang Chemical Technology Corporation).	DLS, TEM, FTIR, ensayos MTT de citotoxicidad, ensayos <i>in vitro</i> antibacterial y capacidad antitumoral.
Mistry et al., 2021	Biomembrana	Electrohilado	Almidón de papa (Signet) y poliuretano termoplástico (TPU) Texin Rxt85A (Covestro).	SEM, FTIR, DSC, TGA, capacidad de estiramiento y tensión, capacidad de retención de líquido, WVTR, ensayo de citotoxicidad <i>in vitro</i> , ensayo de coagulación sanguínea y ensayo de cicatrización <i>in vivo</i> .
Mojally et al., 2022	Biomembrana	TFS	Almidón de maíz (C6H10O5) (Holyland), PVA (Mw = 140.000 KDa) (HIMEDIA), nitrato de plata (ScharlauChemie S.A Sentmenat), y planta de menta fresca <i>Menta piperita</i> (Familia:	FTIR, SEM, TEM, TGA, ensayo <i>in vitro</i> antibacterial y evaluación de biodegradabilidad.

			<i>Lamiaceae</i> (Alahmadi farm in Madina Al- Monawwarah).	
Moradi et al., 2023	Biomembrana	TFS	Ácido acrílico (AA), acrilamida (Am), persulfato de amonio (APS), N, N'- bisacrilamida metileno (MBA), hidróxido de sodio (NaOH) y Tween 80 (d = 1,06-1,09 20/4 °C) (Merck-Sigma-Aldrich).	<i>DLS</i> , <i>FTIR</i> , <i>SEM</i> , capacidad de absorción, <i>WVTR</i> , pruebas de estiramiento y tensión, test antibacterial, ensayos <i>MTT</i> de citotoxicidad y ensayos <i>in vivo</i> .
Movahedi et al., 2020	Biomembrana	Electrohilado Core-Shell	Poliuretano termoplástico tecoflex EG- 80A (PU) (LubriZol), almidón (no reporta origen) y ácido hialurónico (HU) (no reporta origen).	<i>SEM</i> , <i>TEM</i> , <i>FTIR</i> , capacidad de estiramiento, absorción de líquido, ensayo de degradación <i>in vitro</i> , adhesión celular y ensayos de cicatrización <i>in vivo</i> .
Naseri et al., 2021	Biomembrana	Impresión 3D	Carboximetil quitosano (CMC) al 75 % deacetilado (Sigma-Aldrich C3646), almidón de papa, solución <i>stock</i> y mupirocina (AM26100) (Biosynth Carbosynth).	Imprimibilidad, prueba reológica, humectabilidad, <i>SEM</i> , ensayo <i>in vitro</i> de liberación farmacológica y ensayo <i>in vitro</i> de capacidad antimicrobiana.
Neres Santos et al., 2019	Biomembrana	TFS	<i>PVA</i> (Mw = 85.000-124.000 Da) (Sigma-Aldrich), gelatina (Sigma-Aldrich), carboximetil celulosa sódica (NaCMC) (250.000 Da) (Sigma-Aldrich), almidón de papa (Sigma-Aldrich) y miel de Manuka (mercado local, Nueva Zelanda).	<i>FTIR</i> , análisis térmico, <i>SEM</i> , ensayo antimicrobial y capacidad de retención de líquido.
Ng et al., 2023	Biomembrana	Imprimación 3D por extrusión	Goma gellan (Gelzan™ CM, G1910), cloruro de magnesio (MgCl ₂ , 208337), hidróxido de sodio (NaOH, S8045), penicilina/estreptomicina (P4333), paraformaldehído (PFA, P6148), glycerol (G5516) (Sigma-Aldrich) y colágeno tipo 1 (SC-136157) (Sta Cruz Biotechnology, Inc.).	Pruebas de estiramiento y tensión, viscoelasticidad y ensayos de biocompatibilidad <i>in vitro</i> .
Ounkaew et al., 2020	Biomembrana	TFS	Almidón de yuca (17 % de humedad) (Bangkok Interfood Ltd.), <i>PVA</i> (Mw = 1700-1800) (Laboratory Reagents & Fine Chemical) y nitrato de plata (AgNO ₃) (RCI Labscan Limited).	<i>FTIR</i> , <i>XRD</i> , espectrometría UVvis, comportamiento de absorción de líquido, comportamiento deformación, <i>TEM</i> , capacidad antibacterial <i>in vitro</i> y ensayo de citotoxicidad <i>in vitro</i> .
Poonguzhali et al., 2018	Biomembrana de hidrogel hidrófoba e hidrofílica con adición de ácido esteárico	TFS	Quitosano (Mw = 190.000-300.000 g/mol) (Sisco Research Laboratories Pvt. Ltd.), polivinilpirrolidona (PVP) (Mw = 40.000 g/mol), almidón de maíz cerezo y ácido esteárico al	<i>TEM</i> , modelo <i>in vivo</i> cicatrización y actividad antibacterial, capacidad de estiramiento, <i>WVTR</i> , capacidad de absorción de agua, <i>SEM</i> , prueba de biocompatibilidad, capacidad antibacterial,

			98 % calidad analítica (Spectrochemicals Pvt. Ltd.).	viabilidad celular y prueba de cicatrización <i>in vivo</i> .
Punyanitya et al., 2020	Esponja hemostática con adición de yodo povidona	Liofilización -20 °C - 12 h y sublimación por 72 h	Almidón de arroz grado médico (Era-tab) (Erawan Pharmaceutical Research and Laboratory), <i>PVA</i> , yodo povidona y glicerol (Sigma-Aldrich).	<i>FTIR</i> , <i>XRD</i> , <i>SEM</i> , capacidad de retención de humedad y ensayo antibacterial <i>in vitro</i> .
Ruksanti et al., 2021	Biomembrana de hidrogel hemostática	TFS	Almidón de arroz (Era-Tab) (Erawan Pharmaceutical Research and Laboratory Company Co., Ltd.) y carboximetil celulosa (0,65-0,85 %) (Sigma-Aldrich Chemical Co.).	Capacidad de retención de humedad, capacidad de tensión y estiramiento, <i>FTIR</i> y <i>SEM</i> .
Sabando et al., 2020	Biomembrana hidrocoloide.	TFS	Pectina cítrica (grado de metilación 69,1 mol) (Furet Ltda.), almidón de papa pregelatinizado (grado farmacéutico) (Laboratorio Pasteur), glicerol al 99,5 %, polietilenglicol diglicidil eter (PEGDGE) (Mn 500 g/mol, CAS 72207-80-8) (Sigma-Aldrich), extracto de <i>Ugni molinae</i> (Murta) y <i>Gunnera tinctoria</i> (Nalca) (Araucanía Región de Chile).	<i>SEM</i> , <i>FTIR</i> , <i>TGA</i> , capacidad de absorción de líquido, capacidad de estiramiento y tensión, perfil de liberación de polifenoles y ensayo de cicatrización <i>in vivo</i> .
Salehi et al., 2017	Biomembrana	TFS	Almidón de maíz, glicerol (calidad analítica) (Merck Company), nanopartículas de zeolita (Berkeley Advanced Biomaterials, Inc.), y <i>Matricaria chamomilla</i> (Instituto de Medicina Tradicional y Plantas Herbales de Irán).	Transparencia y morfología de superficie, capacidad de retención de líquido, medición de liberación farmacológica, ensayos de citotoxicidad <i>in vitro</i> , ensayos de cicatrización <i>in vivo</i> y estudios clínicos en humanos.
Sethi et al., 2022	Biomembrana	TFS	Almidón soluble (Fisher Scientific), gelatina (G) (225 g sangre, tipo B piel bovina) (Sigma-Aldrich), metileno de bisacrilamida (MBA), ácido acrílico (AA), nitrato de plata (AgNO_3) y persulfato de amonio (APS) (Loba Chemie).	Capacidad de retención de líquido, <i>SEM</i> , <i>FTIR</i> , <i>TGA</i> , <i>XRD</i> , <i>TEM</i> , <i>EDX</i> , <i>DLS</i> , capacidad antibacterial, ensayos de liberación de partículas de plata <i>in vitro</i> , <i>WVTR</i> , ensayos de citotoxicidad <i>in vitro</i> y ensayo de degradación <i>in vitro</i> .
Su et al., 2019	Esponja compuesta de quitosano y almidón	TFS	Quitosano (CS) ($\geq 95\%$), almidón de maíz (ST), ácido esteárico (SA) (Aladdin).	<i>SEM</i> , <i>FTIR</i> , <i>ATR</i> , <i>WVTR</i> , ensayos <i>in vitro</i> de citotoxicidad, coagulación, agregación celular, infiltración bacteriana y biodegradación.
Tavakoli, 2017	Esponja de carboximetil quitosano y almidón	TFS	Almidón de maíz, gelatina (de piel de bovino), tetraborato de sodio al 99 % (Sigma-Aldrich).	Capacidad de retención de líquido, <i>WVTR</i> , <i>FTIR</i> , <i>SEM</i> , capacidad de estiramiento y tensión, y ensayo <i>in vitro</i> de citotoxicidad.

Wu et al., 2019	Biomembrana.	TFS	Quitosano (Charming & Beauty Co.), almidón de papa, almidón de maíz, almidón de arroz glutinoso (productos comerciales) y glicerol (Amresco Co.).	<i>SEM</i> , <i>FTIR</i> , <i>WVTR</i> , capacidad de estiramiento y tensión, ensayos <i>in vitro</i> de degradación, biocompatibilidad, reacción inflamatoria y coagulación.
Yang et al., 2019	Esonja hemostática con TRAP modificado	TFS	Almidón de papa (St) (Shanghai Aladdin Biochemical Technology Co. Ltd.), polietilen glicol (Mw = 2000 Da) (Wuhu Peng Shuo Biological Technology Co. Ltd.), péptido agonista receptor de trombina modificado (TRAP-Cys-COOH) (Zhejiang Hongtuo Biotechnology Co. Ltd.).	<i>SEM</i> , capacidad de absorción de líquido, capacidad de estiramiento y tensión, ensayos <i>in vitro</i> de biodegradabilidad, adhesión plaquetaria, coagulación plasmática, citotoxicidad y ensayo de capacidad hemostática <i>in vivo</i> .
Yeniay et al., 2018	Biomembrana electrohilada	TFS Electrohilado	Ácido poliláctico (PLA) (Mw = 160.000 Da), quitosano (C) al 95 % (Mw = 122.400 g/mol). almidón y óxido de zinc (ZnO) (Sigma-Aldrich).	Prueba de tensión superficial, densidad, viscosidad, pH, conductividad eléctrica, <i>SEM</i> , <i>FTIR</i> , capacidad de estiramiento y tensión, capacidad de absorción de líquido y ensayo de citotoxicidad <i>in vitro</i> .

Fuente: Elaboración propia