

Biomateriales, de prótesis a implantes a la medida

Jorge Andrés Ornelas-Guillén¹

J. Betzabe González-Campos²

Alejandra Pérez-Nava³

DOI: 10.64121/rece.2025v3.jja005

RESUMEN

Desde la prehistoria, el ser humano se ha ocupado por adaptar instrumentos y materiales que le permitan reemplazar o sanar órganos y tejidos, permitiendo así mantener su funcionalidad y estilo de vida. Asombrosos hallazgos se han encontrado como vestigios del uso de biomateriales en civilizaciones como la egipcia, la inca y en general las culturas mesoamericanas, que ponen de manifiesto el conocimiento empírico de biomateriales con fines funcionales y cosméticos. El progreso tecnológico ha permitido consolidar la ciencia de los biomateriales, donde converge el conocimiento aportado por disciplinas como la química, física, biología, medicina y la robótica, por mencionar algunas. En la actualidad, los biomateriales son dispositivos de uso común en nuestra sociedad, permitiendo mejorar la calidad de vida de miles de personas a nivel global.

Introducción

Los *biomateriales* son componentes diseñados para interactuar con sistemas biológicos con el propósito de tratar, reemplazar o mejorar la función de tejidos y órganos. Estos materiales pueden ser naturales, sintéticos, o una combinación de ambos y son reconocidos

por su capacidad para integrarse con el tejido biológico debido a su estructura y composición similares a las del cuerpo humano, debiendo cumplir con criterios esenciales de biocompatibilidad, estabilidad mecánica y funcionalidad específica para cada aplicación clínica. La



Figura 1. Uso de algunos biomateriales en ingeniería de tejidos, imagen propia.

biocompatibilidad es una característica crucial, ya que el biomaterial debe ser aceptado por el organismo sin provocar una respuesta inmunológica adversa. Los biomateriales ofrecen ventajas en términos de control sobre sus propiedades mecánicas y químicas, permitiendo su ajuste para aplicaciones específicas como implantes ortopédicos y prótesis.

La definición de biomateriales también ha evolucionado para incluir materiales inteligentes, que responden a estímulos externos, como cambios en el pH o temperatura, y de especial interés en aplicaciones emergentes en la liberación controlada de fármacos y la ingeniería de tejidos. En la actualidad, los nuevos biomateriales tienen la capacidad de replicar, reemplazar y regular de manera precisa el microambiente del tejido dañado (**Figura 1**) para favorecer así la regeneración y función del tejido, a esta propiedad se le denomina comúnmente biomimetismo. Además, la ingeniería de tejidos utiliza biomateriales para crear andamios que soportan el crecimiento celular y la formación de nuevos tejidos, ayudando a regenerar órganos y tejidos dañados (Zhu et al., 2021).

La evolución de los biomateriales y los avances en tecnología y ciencia de materiales continúan ampliando sus aplicaciones y mejorando los resultados clínicos. La investigación y el desarrollo en este campo siguen siendo cruciales para enfrentar los desafíos en medicina y mejorar la calidad de vida del ser humano.

Biomateriales a través de la Historia

La historia de los biomateriales y prótesis (**Figura 2**) se remonta a la era de piedra, donde la trepanación demuestra los inicios de materiales y técnicas quirúrgicas aplicadas al cuerpo humano. Una época donde las primeras prótesis rudimentarias fueron fabricadas con

materiales naturales como madera y hueso para reemplazar miembros perdidos. Estos primeros intentos reflejan el inicio de la aplicación de materiales en medicina, aunque con una comprensión limitada de la biocompatibilidad y funcionalidad. Con el tiempo, la evolución de los biomateriales avanzó considerablemente durante la era de los metales, como se evidenció en el uso de metales preciosos y aleaciones en prótesis más sofisticadas durante la Edad Media y el Renacimiento (Migonney, 2014).

El siglo XIX marcó un punto de inflexión con el desarrollo de los primeros biomateriales sintéticos. El descubrimiento del celuloide, un plástico termoplástico, revolucionó las prótesis al ofrecer un material más ligero y manejable en comparación con los metales utilizados anteriormente. A lo largo del siglo XX, el campo de los biomateriales experimentó un avance significativo con la introducción de materiales como el polietileno y el titanio, que mejoraron la biocompatibilidad y la durabilidad de los implantes ortopédicos y dentales.

La década de 1980 marcó el inicio de la era moderna de biomateriales con la aplicación de materiales biocompatibles avanzados y la introducción de técnicas de ingeniería de tejidos. El desarrollo de materiales como la hidroxiapatita, utilizada para recubrir implantes de titanio, mejoró la integración ósea y la eficacia de los dispositivos implantables

(Dorozhkin, 2010). La investigación en biomateriales también se expandió hacia el uso de polímeros biodegradables y biomateriales inteligentes, capaces de responder a estímulos ambientales.

En la actualidad, el campo de los biomateriales continúa evolucionando con avances en nanotecnología y la creación de biomateriales personalizados y a medida. Los biomateriales modernos incluyen materiales compuestos e híbridos diseñados para aplicaciones específicas, desde prótesis personalizadas hasta implantes bioactivos que mejoran la regeneración de tejidos. La ingeniería de tejidos ha sido una de las áreas más beneficiadas por estos avances, logrando crear implantes que se adaptan mejor al entorno biológico del paciente (Khan et al., 2023).

Los implantes personalizados creados con biomateriales biomiméticos también han permitido avances notables

en la regeneración tisular. Las tecnologías de impresión 3D han permitido la fabricación de bioprótesis que no solo replican la forma anatómica exacta del paciente, sino que también promueven una interacción más natural con el tejido circundante, optimizando la cicatrización y la biocompatibilidad. Estos materiales han mostrado una gran capacidad para liberar de forma controlada factores de crecimiento y otros agentes terapéuticos, acelerando los procesos de regeneración celular. En consecuencia, el futuro de los biomateriales biomiméticos abre nuevas posibilidades para el tratamiento de enfermedades y lesiones complejas (Trucillo, 2024).

Clasificación de los biomateriales

Los biomateriales, tanto naturales como sintéticos, han ganado una relevancia significativa en la biomedicina debido a sus propiedades únicas y adaptabilidad en una variedad de

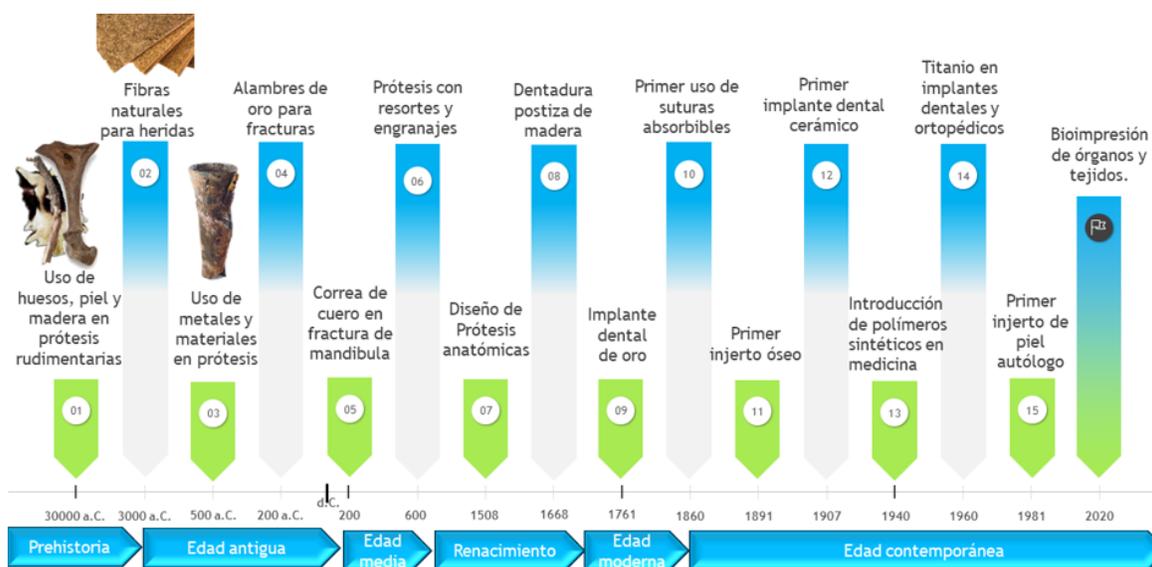


Figura 2. Desarrollo cronológico de las prótesis y biomateriales a través de la historia, imagen propia.

aplicaciones clínicas. Los biomateriales naturales, como las proteínas y polisacáridos, ofrecen ventajas intrínsecas debido a su biocompatibilidad y capacidad para integrarse con tejidos biológicos, siendo útiles en aplicaciones como la ingeniería de tejidos y cicatrización. Por otro lado, los biomateriales sintéticos permiten una personalización y control más preciso sobre sus propiedades físicas y químicas, lo que es crucial para aplicaciones como la liberación controlada de fármacos y la creación de matrices para la ingeniería de tejidos (Chelu et al., 2023). La combinación de ambos tipos de biomateriales está revolucionando el campo, permitiendo innovaciones en tratamientos médicos y soluciones terapéuticas avanzadas. La investigación continúa ampliando las aplicaciones y la eficacia de estos materiales, resaltando su papel esencial en la medicina moderna.

Cerámicos

En el campo de la medicina regenerativa, los biomateriales cerámicos se destacan por su excelente biocompatibilidad y propiedades mecánicas, siendo muy prometedores para aplicaciones en ortopedia y odontología. Un ejemplo es la hidroxiapatita (HA), un fosfato de calcio que se asemeja a la estructura mineral del hueso humano, lo que facilita su integración en implantes e injertos óseos. Se puede comparar la HA con un material de construcción que se parece mucho a los ladrillos del hueso, por lo que, al

colocarlo en el cuerpo, se convierte en parte del entorno natural, promoviendo así la regeneración ósea de manera efectiva (Soleymani et al., 2023).

Por otro lado, los biovidrios son otra categoría importante de cerámicos médicos que, al interactuar con fluidos corporales, forman una capa que mejora la unión con el tejido óseo. Estos materiales no solo favorecen la regeneración ósea, sino que también pueden utilizarse en la regeneración de tejidos blandos. Además, los biovidrios pueden degradarse en el cuerpo, liberando iones bioactivos que promueven la cicatrización (Pawar et al., 2024).

Los cerámicos de óxido de zirconio y alúmina son ampliamente empleados en prótesis dentales y articulares debido a su resistencia al desgaste y su biocompatibilidad. La zirconia, en particular, destaca por su estabilidad mecánica, alta resistencia a la fractura y biocompatibilidad, lo que lo convierte en un material preferido para coronas e implantes articulares duraderos. Estos materiales, aunque no interactúan directamente con el tejido biológico, ofrecen una excelente estabilidad estructural y se utilizan en prótesis de cadera y rodilla, donde la durabilidad es fundamental. Además, se han desarrollado cerámicos con estructuras porosas que permiten la infiltración celular y la formación de nuevo tejido. Estos cerámicos porosos son especialmente útiles en la regeneración

ósea, ya que facilitan la integración con el tejido circundante y la vascularización en áreas afectadas (Chand et al., 2024).

a) Metálicos

Debido a su alta resistencia mecánica y capacidad para soportar cargas, los biomateriales metálicos son esenciales para la creación de dispositivos médicos implantables. Esto es especialmente cierto para usos en ortodoncia y odontología. El titanio y sus aleaciones son ampliamente utilizados y se destacan por su biocompatibilidad, resistencia a la corrosión y bajo peso. Estos metales son ideales para el desarrollo de implantes óseos y dentales. Además, los recubrimientos de hidroxiapatita pueden modificar las superficies de titanio para mejorar su integración al tejido vivo, facilitando la unión entre el hueso y el implante (Elleuch et al., 2023).

Las aleaciones de acero inoxidable son otro grupo de biomateriales metálicos, específicamente el acero inoxidable 316L, que ha sido ampliamente empleado en prótesis articulares, endoprótesis y placas óseas. Estas aleaciones ofrecen una buena combinación de resistencia mecánica y ductilidad, aunque su susceptibilidad a la corrosión en ambientes fisiológicos requiere de recubrimientos protectores o tratamientos superficiales para prolongar su durabilidad (Malkiya Rasalin Prince et al., 2023).

En los últimos años, las aleaciones de magnesio han recibido atención como

biomateriales degradables para aplicaciones temporales, como en los implantes ortopédicos y dispositivos de fijación ósea. El magnesio tiene la ventaja de degradarse en el cuerpo humano, eliminando la necesidad de una segunda cirugía para retirar el implante. Sin embargo, uno de los desafíos es controlar su tasa de degradación, que puede ser demasiado rápida en ambientes biológicos, lo que ha llevado a desarrollar aleaciones y tratamientos superficiales que mejoran su resistencia a la corrosión (Singh et al., 2024)

Finalmente, las aleaciones de cobalto-cromo se utilizan principalmente en prótesis de cadera y rodilla debido a su excelente resistencia al desgaste y estabilidad en condiciones de carga cíclica. Estas aleaciones tienen una alta resistencia a la corrosión, aunque su rigidez puede ser superior a la del hueso, lo que puede causar problemas de tensión en aplicaciones ortopédicas (Chen et al., 2024).

b) Polímeros

Los biomateriales basados en polímeros, tanto naturales como sintéticos, han emergido como una categoría crucial en el desarrollo de dispositivos biomédicos avanzados, dada su versatilidad y capacidad para ser adaptados a diversas aplicaciones biomédicas, desde la ingeniería de tejidos hasta la liberación controlada de fármacos. Estos materiales, por sus propiedades únicas y versatilidad, están

revolucionando el campo de la biomedicina (Prete et al., 2023; Vach Agocsova et al., 2023).

Entre los polímeros más prominentes para esta aplicación, se encuentra el alcohol polivinílico (PVA), conocido por su excelente biocompatibilidad y capacidad de formar matrices porosas, lo cual es ideal para aplicaciones en ingeniería de tejidos y liberación controlada de fármacos. Los estudios han demostrado que el PVA, cuando se combina con otros agentes, puede mejorar la funcionalidad de los biomateriales y promover una interacción eficaz con los tejidos biológicos (Prete et al., 2023).

El ácido poliláctico (PLA), otro polímero ampliamente investigado, destaca por su biodegradabilidad y sus aplicaciones en implantes temporales y dispositivos de liberación de fármacos. Su capacidad para degradarse en productos no tóxicos en el cuerpo humano lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones que requieren una disolución controlada del material sin dejar residuos permanentes (Vach Agocsova et al., 2023).

En el ámbito de las fibras, el quitosano, un derivado del segundo biopolímero más abundante en la naturaleza; la quitina, ha ganado atención por sus propiedades antimicrobianas y su utilidad en la creación de matrices para la ingeniería de tejidos. Su capacidad para promover la cicatrización de heridas y su biodegradabilidad son características destacadas que facilitan su integración en

dispositivos médicos y sistemas de liberación de fármacos.

Entre los polímeros naturales, el colágeno destaca por su estructura bioactiva y biocompatibilidad, haciéndolo ideal para la regeneración de tejidos y aplicaciones en ingeniería de tejidos. El colágeno, derivado de la matriz extracelular, favorece la integración celular y la formación de nuevos tejidos. Los estudios han demostrado que los andamios de colágeno pueden promover la cicatrización de heridas y la regeneración ósea de manera efectiva (Prete et al., 2023).

El ácido hialurónico (HA) es otro polímero notable para el desarrollo de biomateriales, conocido por sus propiedades hidratantes y su rol en la promoción de la regeneración celular. Su uso en la creación de andamios para la ingeniería de tejidos y en aplicaciones dermatológicas resalta su importancia en la medicina regenerativa (Vach Agocsova et al., 2023).

Los polímeros híbridos, que combinan características de polímeros naturales y sintéticos, también están ganando atención. Estos materiales, como el quitosano modificado, combinan la biocompatibilidad del quitosano con la robustez de polímeros sintéticos, creando materiales que pueden ser utilizados en una variedad de aplicaciones, desde andamios para regeneración de tejidos hasta sistemas de liberación de fármacos. Las propiedades ajustables de estos

híbridos permiten una personalización para aplicaciones específicas.

El poliuretano ha mostrado ser una opción versátil y eficaz para aplicaciones que requieren propiedades mecánicas específicas y biocompatibilidad (Xu et al., 2023). Los poliuretanos son conocidos por su elasticidad y durabilidad, y se están utilizando cada vez más en la fabricación de dispositivos médicos implantables, incluyendo catéteres y prótesis.

Finalmente, los copolímeros y polímeros bloque han demostrado ser útiles en la creación de sistemas de liberación de fármacos que responden a estímulos específicos, como por ejemplo los polímeros conductores que son capaces de responder a pulsos eléctricos. Estos materiales ofrecen la ventaja de ajustar su estado de oxidación a partir de la aplicación de señales eléctricas puntuales, lo que permite una liberación más controlada y eficiente de los medicamentos.

La investigación en biomateriales basados en polímeros sigue avanzando, proporcionando nuevas oportunidades para mejorar la eficacia y seguridad de los tratamientos médicos, al tiempo que se optimizan los materiales para satisfacer las demandas específicas de cada aplicación.

c) Biomateriales compuestos

Los biomateriales compuestos se han consolidado como una categoría clave en el desarrollo de soluciones innovadoras para aplicaciones biomédicas. Estos materiales, que combinan propiedades de

diferentes componentes, ofrecen una amplia gama de beneficios en términos de funcionalidad y rendimiento.

Biomateriales naturales como el colágeno-quitina son ampliamente reconocidos por su biocompatibilidad y capacidad de promover la regeneración de tejidos (Prete et al., 2023). El colágeno, fundamental en la matriz extracelular, se utiliza en andamios para la reparación de tejidos blandos y óseos, facilitando la integración celular y la formación de nuevos tejidos. La quitina, un biopolímero derivado de crustáceos, ha demostrado ser efectiva en aplicaciones de cicatrización y liberación controlada de fármacos, gracias a su estructura bioactiva y capacidad de biodegradación. Del mismo modo, compósitos de colágeno-hidroxiapatita, han demostrado ser particularmente efectivos en aplicaciones ortopédicas y dentales debido a su similitud con la estructura ósea natural. La combinación de colágeno, que proporciona elasticidad, con hidroxiapatita, que ofrece rigidez, resulta en materiales que favorecen la osteointegración y la regeneración ósea (Khan et al., 2023).

Por otro lado, los biomateriales sintéticos han sido diseñados para ofrecer propiedades específicas que pueden ser ajustadas según las necesidades clínicas. Los compósitos de polímero-vidrio (Pawar et al., 2024), como el de ácido poliláctico (PLA) combinado con vidrio bioactivo, son un ejemplo de cómo los materiales sintéticos pueden ser utilizados para

mejorar la integración ósea y promover la regeneración. Estos materiales no solo proporcionan soporte estructural, sino que también liberan iones que favorecen la formación ósea.

Los biomateriales compuestos que combinan componentes naturales y sintéticos también están ganando importancia (Prete et al., 2023). Un ejemplo destacado es el compósito basado en los polímeros quitosano y ácido poliláctico (PLA). Este tipo de biomaterial combina la biocompatibilidad del quitosano con las propiedades mecánicas ajustables del PLA, resultando en materiales que pueden ser utilizados en una variedad de aplicaciones, incluyendo la ingeniería de tejidos y sistemas de liberación de fármacos. Los andamios basados en geles de alginato y PLA están ganando atención por su capacidad para soportar la formación de tejido y su adaptabilidad a diversas aplicaciones clínicas (Sheng et al., 2023).

Por su parte, los biomateriales basados en nanocompuestos están emergiendo como una clase innovadora que ofrece mejoras significativas en términos de resistencia, funcionalidad y biocompatibilidad. Por ejemplo, los nanocompuestos de sílice y polímeros sintéticos presentan una alta resistencia mecánica y propiedades mejoradas para aplicaciones en implantes y dispositivos médicos (Lee et al., 2023).

La integración de biomateriales compuestos y sintéticos está ampliando las posibilidades en la medicina

regenerativa y la ingeniería de tejidos. El continuo avance en la investigación y desarrollo de estos materiales es fundamental para mejorar los resultados clínicos y ofrecer soluciones innovadoras para una amplia gama de aplicaciones médicas.

Diseño de biomateriales

El diseño de biomateriales es un proceso complejo que requiere la consideración de múltiples prerequisites para garantizar su eficacia y seguridad en aplicaciones clínicas. Un aspecto fundamental es la biocompatibilidad, que asegura que el biomaterial no cause una respuesta adversa en el organismo. La biocompatibilidad se evalúa mediante estudios *in vitro* e *in vivo* para determinar la respuesta celular y la toxicidad del material. Además, la estabilidad mecánica del biomaterial es crucial, especialmente en aplicaciones donde el material estará sujeto a cargas físicas, como en implantes ortopédicos. La estabilidad debe ser suficiente para soportar las tensiones sin degradarse o perder funcionalidad (Choi et al., 2009).

Otro prerequisite importante es la resistencia a la corrosión y al desgaste, particularmente en biomateriales que estarán en contacto con fluidos corporales. La corrosión puede comprometer la integridad del biomaterial y liberar sustancias tóxicas, por lo que se requiere un análisis detallado de la química y la física del material (Gutiérrez Púa et al., 2023). El

diseño y la funcionalidad del biomaterial también deben alinearse con su aplicación específica, como en el caso de las prótesis personalizadas que requieren características de diseño específicas para adaptarse al cuerpo del individuo.

Además, la compatibilidad con el tejido circundante es esencial para facilitar la integración del biomaterial en el cuerpo y promover la cicatrización. Los biomateriales enfocados a la regeneración de tejidos deben fomentar la formación de tejido nuevo y la conexión con las estructuras biológicas existentes. Considerando el caso de los implantes para administración de fármacos, la capacidad de liberación controlada de fármacos es otro factor crítico, donde el biomaterial debe ser capaz de entregar fármacos de manera sostenida y controlada (Trucillo, 2024).

En el contexto de normas y regulaciones, los biomateriales deben cumplir con estándares internacionales y locales para garantizar su seguridad y eficacia. Estos estándares incluyen pruebas rigurosas de calidad y seguridad para la aprobación clínica. La fabricación y el procesamiento también juegan un papel crucial, ya que deben garantizar la reproducibilidad y la calidad del biomaterial a lo largo del proceso de producción. Finalmente, la sostenibilidad y el impacto ambiental de los biomateriales también se están volviendo cada vez más importantes, especialmente con la creciente preocupación por el

medio ambiente y la búsqueda de materiales biodegradables (Sucheta et al., 2024).

Tipos de biomateriales de uso práctico

A través de los años, la estrecha relación entre la medicina y ciencias exactas como la química, la física y la biología han aportado grandes investigaciones a la ciencia de los materiales, permitiendo avances tecnológicos que resultan en una amplia variedad de biomateriales asequibles. Anteriormente se ha mencionado que esta categoría de materiales puede ser de origen natural o sintético, y frecuentemente son el resultado de combinaciones entre polímeros, metales y cerámicos. Sin embargo, es importante distinguir dos subclasificaciones: los materiales biomiméticos y los materiales biológicos.

Un material biomimético puede ser de origen natural o sintético, e incluso compuesto que asemeja propiedades del tejido humano, ya sea en estructura o rendimiento mecánico. Por otra parte, un material biológico es aquel que necesariamente proviene o incluye sustancias generadas por la propia naturaleza; ya sea animal, vegetal o de origen humano. Desde ese punto de vista, las infinitas combinaciones han hecho posible que, al alcance de nuestra mano, y para todos los presupuestos, podemos encontrar prótesis, implantes, materiales de curación, hilos de sutura, sensores

portátiles, entre otros, los principales se ilustran en la **Figura 3**.

El avance tecnológico ha hecho posible el diseño de dispositivos avanzados, denominados como materiales inteligentes por su capacidad de detección y adaptación a los cambios que surgen en el entorno; esta capacidad de responder a las variaciones fisiológicas y estímulos externos proyecta su aplicación en medicina moderna, promoviendo estrategias de terapia, diagnóstico y tratamiento más efectivas. En este sentido, los biosensores portátiles de glucosa son un ejemplo muy representativo; mediante estos dispositivos es posible conocer en tiempo real la concentración de glucosa en nuestra sangre mediante un sencillo

propósito son conocidos como andamios celulares, del mismo modo que un andamio en una construcción, tienen la capacidad de soportar el cultivo celular y guiar el crecimiento del tejido. Si bien el cuerpo humano tiene capacidad de autorreparación, el desarrollo de andamios celulares busca facilitar el proceso de reparación y el restablecimiento total de la capacidad de los órganos y tejidos renovados. Al propio estilo de las estrellas de mar, con el progreso tecnológico es posible que en un futuro cercano el ser humano sea capaz de fabricar “prótesis a la medida” de hueso, cartílago, piel, y otros tejidos de nuestro cuerpo.

¹ **Jorge Andrés Ornelas-Guillén**; Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Fco. J. Múgica s/n, 58030, Morelia, Michoacán, México. 1343585k@umich.mx y <https://orcid.org/0009-0006-0511-1844>

² **J. Betzabe González-Campos**; Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Fco. J. Múgica s/n, 58030, Morelia, Michoacán, México. betzabe.gonzalez@umich.mx y <https://orcid.org/0000-0001-5996-0282>

³ **Alejandra Pérez-Nava**; Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEMéx-UNAM, Carretera Toluca-Atacomulco Km. 14.5 C. P. 50200, Toluca, Estado de México, México. Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Ciudad de México, México. alejandra.perez@iquimica.unam.mx y <https://orcid.org/0000-0003-4285-5763>

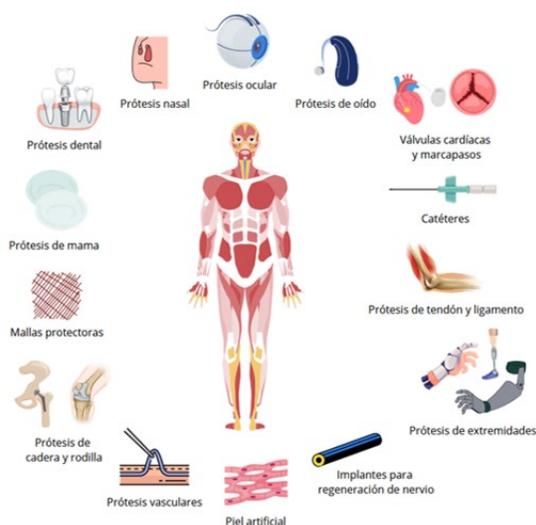


Figura 3. Biomateriales de uso común, imagen propia.
escaneo.

Por otra parte, una de las metas más ambiciosas en de las ciencias de biomateriales es la ingeniería de tejidos. Los biomateriales empleados para este

Referencias

- Chand, P., Malik, M., & Prasad, T. (2024). Bioactive Glass for Applications in Implants: A Review. *ChemistrySelect*, 9(29), e202304337. doi: <https://doi.org/10.1002/slct.202304337>
- Chelu, M., & Musuc, A. M. (2023). Advanced Biomedical Applications of Multifunctional Natural and Synthetic Biomaterials. In *Processes* (Vol. 11, Issue 9). doi: 10.3390/pr11092696
- Chen, A., & Kurmis, A. P. (2024). Understanding immune-mediated cobalt/chromium allergy to orthopaedic

- implants: a meta-synthetic review. In *Arthroplasty* (Vol. 6, Issue 1). doi: 10.1186/s42836-023-00227-x
- Choi, J., Konno, T., Takai, M., & Ishihara, K. (2009). Controlled drug release from multilayered phospholipid polymer hydrogel on titanium alloy surface. *Biomaterials*, 96(28), 5201–5208. doi: 10.1016/J.BIOMATERIALS.2009.06.003
- Dorozhkin, S. V. (2010). Bioceramics of calcium orthophosphates. In *Biomaterials* (Vol. 31, Issue 7). doi: 10.1016/j.biomaterials.2009.11.050
- Elleuch, S., Jrad, H., Wali, M., & Dammak, F. (2023). Mandibular bone remodeling around osseointegrated functionally graded biomaterial implant using three dimensional finite element model. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 9(9). doi: 10.1002/cnm.3750
- Gutiérrez Púa, L. D. C., Rincón Montenegro, J. C., Fonseca Reyes, A. M., Zambrano Rodríguez, H., & Paredes Méndez, V. N. (2023). Biomaterials for orthopedic applications and techniques to improve corrosion resistance and mechanical properties for magnesium alloy: a review. In *Journal of Materials Science* (Vol. 58, Issue 9). doi: 10.1007/s10853-023-08237-5
- Khan, M. U. A., Aslam, M. A., Bin Abdullah, M. F., Hasan, A., Shah, S. A., & Stojanović, G. M. (2023). Recent perspective of polymeric biomaterial in tissue engineering— a review. In *Materials Today Chemistry* (Vol. 34). doi: 10.1016/j.mtchem.2023.101818
- Lee, C. Y., Hu, S. M., Christy, J., Chou, F. Y., Ramli, T. C., & Chen, H. Y. (2023). Biointerface Coatings With Structural and Biochemical Properties Modifications of Biomaterials. In *Advanced Materials Interfaces* (Vol. 10, Issue 10). doi: 10.1002/admi.202202286
- Malikiya Rasalin Prince, R., Selvakumar, N., Arulkirubakaran, D., & Christopher Ezhil Singh, S. (2023). Lifespan Enhancement of Stainless Steel 316L Artificial Hip Prosthesis by Novel Ti-6Al-4V-2ZrC Coating. *Journal of Materials. Engineering and Performance*. doi: 10.1007/s11665-023-08590-1
- Migonney, V. (2014). History of Biomaterials. In *Biomaterials*. doi: 10.1002/9781119043553.ch1
- Pawar, V., & Shinde, V. (2024). Bioglass and hybrid bioactive material: A review on the fabrication, therapeutic potential and applications in wound healing. *Hybrid Advances*, 100196. doi: 10.1016/J.HYBADV.2024.100196
- Prete, S., Dattilo, M., Patitucci, F., Pezzi, G., Parisi, O. I., & Puoci, F. (2023). Natural and Synthetic Polymeric Biomaterials for Application in Wound Management. In *Journal of Functional Biomaterials* (Vol. 14, Issue 9). doi: 10.3390/jfb14090455
- Sheng, W., Song, Q., Su, X. Z., Lu, Y., Bai, Y. Z., Ji, F. K., Zhang, L., Yang, R. G., & Fu, X. (2023). Sodium alginate/gelatin hydrogels loaded with adipose-derived mesenchymal stem cells promote wound healing in diabetic rats. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 88(5). doi: 10.1111/jocd.15631
- Singh, J., Wahab Hashmi, A., Ahmad, S., & Tian, Y. (2024). Critical review on biodegradable and biocompatibility magnesium alloys: Progress and prospects in bio-implant applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 709, 113111. doi: 10.1016/J.INOCHE.2024.113111
- Soleymani, S., & Naghib, S. M. (2023). 3D and 4D printing hydroxyapatite-based scaffolds for bone tissue engineering and regeneration. In *Heliyon* (Vol. 9, Issue 9). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19363
- Sucheta, Britya, N. V., Jha, M., Yadav, R., Chahal, K., Nagori, K., Tiwari, M., Singh, M. K., & Sharma, V. (2024). Clinical and Regulatory Consideration for Nanobiomaterials. In M. Pradhan, K. Yadav, & N. Singh Chauhan (Eds.), *Biomaterial-Inspired Nanomedicines for Targeted Therapies* (pp. 451–476). Singapore: Springer Nature Singapore. doi: 10.1007/978-981-97-3925-7_17
- Trucillo, P. (2024). Biomaterials for Drug Delivery and Human Applications. In *Materials* (Vol. 17, Issue 2). doi: 10.3390/ma17020456
- Vach Agocsova, S., Culenova, M., Birova, I., Omanikova, L., Moncmanova, B., Danisovic, L., Ziaran, S., Bakos, D., & Alexy, P. (2023). Resorbable Biomaterials Used for 3D Scaffolds in Tissue Engineering: A Review. In *Materials* (Vol. 16, Issue 12). doi: 10.3390/ma16124267
- Xu, R., Fang, Y., Zhang, Z., Cao, Y., Yan, Y., Gan, L., Xu, J., & Zhou, G. (2023). Recent Advances in Biodegradable and Biocompatible Synthetic Polymers Used in Skin Wound Healing. In *Materials* (Vol. 16, Issue 15). doi: 10.3390/ma16155459
- Zhu, Y., Joratmon, D., Shan, W., Chen, Y., Rong, J., Zhao, H., Xiao, S., & Li, X. (2021). 3D printing biomimetic materials and structures for biomedical applications. In *Bio-Design and Manufacturing* (Vol. 4, Issue 2). doi: 10.1007/s42242-020-00117-0