


ARTÍCULOS DE REVISIÓN

Biofabricación de órganos: la convergencia de la ingeniería tisular y la medicina regenerativa para una nueva era terapéutica





Organ biofabrication: the convergence of tissue engineering and regenerative medicine for a new therapeutic era

 **Leonardo Ramírez de la Cruz**
Universidad Cuauhtémoc, México
leonardo1234.vago@gmail.com

 **Cesar Emiliano Jiménez Limón**
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México

 **Aurelio Alejandro Ramírez Delgadillo**
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México

 **Diego Alejandro Ruiseco Chenhalls**
Universidad Autónoma de Guadalajara, México

 **Enrique Gil Chávez**
Universidad de Durango Campus Aguascalientes,
México

 **Alonso Limón Gabriel Sebastián**
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México

Lux Médica
vol. 21, núm. 62, 2026
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México
ISSN-E: 2007-8714
Periodicidad: Cuatrimestral
revistaluxmedica@edu.uaa.mx

Recepción: 25 octubre 2025

Resumen: **Introducción:** El fallo orgánico terminal es una crisis global, donde el trasplante tradicional es insuficiente por la escasez de donantes y el rechazo inmunológico. Ante esto, la biofabricación de órganos bioartificiales surge como una innovación transformadora, este enfoque permite construir órganos de novo con células pluripotentes del paciente, eliminando la necesidad de donantes. La convergencia entre biología regenerativa, ciencia de biomateriales y bioimpresión establece las bases para esta solución viable a largo plazo. **Objetivo:** Posicionar la biofabricación de órganos bioartificiales como una solución médica disruptiva y viable frente al fallo orgánico terminal, trascendiendo las barreras de escasez y rechazo del trasplante tradicional. **Métodos:** Esta revisión se fundamentó en una búsqueda bibliográfica realizada en PubMed y Google Scholar entre 2019 y 2025, abarcando textos en español e inglés, seleccionando los artículos con base en su relevancia para la investigación bibliográfica. Los criterios de inclusión fueron: revisiones sistemáticas, artículos originales y artículos de revisión entrados en biofabricación de órganos y trasplante orgánico, con contenido clínicamente relevante para dicha investigación, con información actualizada y completamente accesible. Los criterios de exclusión fueron: literatura gris, publicaciones en otros idiomas, artículos sin revisión por pares, duplicados y artículos de pago. **Conclusión:** La biofabricación de órganos representa un cambio de paradigma para la medicina de trasplantes y a pesar de los desafíos críticos, como la vascularización de órganos complejos, la convergencia de la bioimpresión tridimensional y las células

Notas de autor

leonardo1234.vago@gmail.com

Aprobación: 26 marzo 2026

URL: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/486/4865616004/>

madre pluripotentes inducidas promete una solución viable al fallo orgánico terminal, ofreciendo órganos personalizados, funcionales y libres de rechazo.

Palabras clave: Bioimpresión tridimensional, Células madre pluripotentes inducidas, Matriz extracelular descelularizada, Vascularización, Rechazo orgánico, Biomateriales.

Abstract: Introduction: End-stage organ failure represents a global health crisis in which traditional transplantation is often insufficient due to a severe donor shortage and the risk of immunological rejection. In light of this, the biofabrication of bioartificial organs emerges as a transformative innovation. This approach enables the de novo construction of organs utilizing patient-derived pluripotent cells, thereby eliminating the reliance on allogeneic donors. The convergence of regenerative biology, biomaterials science, and bioprinting establishes the foundation for this viable, long-term therapeutic solution. **Objective:** To position the biofabrication of bioartificial organs as a viable and disruptive medical solution for end-stage organ failure, overcoming the traditional transplantation barriers of donor scarcity and immune rejection. **Methods:** This review was based on a comprehensive literature search conducted in PubMed and Google Scholar, encompassing literature published between 2019 and 2025 in both Spanish and English. Articles were selected based on their relevance to the scope of this literature review. The inclusion criteria comprised: systematic reviews, original research articles, and review articles focused on organ biofabrication and organ transplantation that contained clinically relevant data, up to date information, and were fully open access. The exclusion criteria were grey literature, publications in other languages, non peer reviewed articles, duplicate records, and paywalled articles. **Conclusion:** Organ biofabrication represents a paradigm shift in transplant medicine. Despite critical remaining challenges, such as the vascularization of complex organs, the convergence of three-dimensional bioprinting and induced pluripotent stem cells holds promise as a viable solution for end-stage organ failure by yielding personalized, functional, and rejection-free organs.

Keywords: Three-dimensional bioprinting, Induced pluripotent stem cells, Decellularized extracellular matrix, Vascularization, Organic rejection, Biomateriales.

Introducción

En la búsqueda constante de soluciones precisas y eficaces a la crisis mundial de insuficiencia orgánica terminal, la fabricación de órganos bioartificiales, también conocida como biofabricación, se ha convertido en una herramienta de vanguardia en el campo de la medicina y la ingeniería de tejidos, ofreciendo una amplia gama de aplicaciones terapéuticas y analíticas, ya que la fabricación de órganos bioartificiales, con su capacidad para generar estructuras tridimensionales funcionales a partir de células vivas,^{1,2} ha redefinido los límites de la medicina de reemplazo al ofrecer una combinación excepcional de personalización, biocompatibilidad y posible eliminación del rechazo inmunitario^{2,3}. Esta tecnología es una respuesta directa al fracaso del sistema actual de trasplantes, gravemente limitado por la baja disponibilidad de órganos de donantes y la morbilidad asociada a la inmunosupresión crónica.

La biofabricación, impulsada por la bioimpresión tridimensional y el uso de células madre pluripotentes inducidas, promete crear órganos de novo y a demanda, utilizando el propio material biológico del paciente. Sin embargo, a pesar de sus notables ventajas, esta tecnología emergente enfrenta desafíos y limitaciones que deben considerarse, siendo la más crítica la replicación de una red vascular funcional a escala macroscópica y microscópica para órganos complejos. Esta revisión busca brindar una perspectiva actualizada sobre los alcances terapéuticos y los avances más recientes en la biofabricación de órganos, destacando su potencial para transformar la práctica clínica en el tratamiento de la insuficiencia orgánica terminal. Además, busca presentar esta tecnología a un público más amplio en el sector médico, promoviendo su integración conceptual en diferentes áreas de diagnóstico y tratamiento, así como impulsar futuras investigaciones que maximicen su uso para resolver eficazmente la crisis de donación de órganos.

Metodología

Esta revisión se fundamentó en los lineamientos PRISMA, se realizó una búsqueda bibliográfica detallada y estructurada en las bases de datos PubMed y Google Scholar, limitando la recolección a los años comprendidos entre 2019 y 2025. La búsqueda abarcó publicaciones en idioma español e inglés. La ecuación de búsqueda principal empleada fue la siguiente: (“Biofabrication” OR “3D Bioprinting” OR “Tissue Engineering”) AND (“Organ Transplantation” OR “Graft Rejection” OR “Induced Pluripotent Stem Cells”). Los criterios de inclusión fueron: revisiones

sistemáticas, artículos originales y artículos de revisión centrados en la biofabricación de órganos y el trasplante orgánico, que tuvieran contenido clínicamente relevante para la investigación, información actualizada y texto completo totalmente accesible. Los criterios de exclusión aplicados fueron: literatura gris, publicaciones en otros idiomas, artículos sin revisión por pares y artículos con barreras de pago.

El Proceso de Selección de Estudios fue: el flujo de selección inició con la identificación de un total de 240 registros en las bases de datos consultadas. Como primer paso, se realizó la depuración de la base de datos eliminando 55 registros duplicados, lo que resultó en 185 artículos para la fase inicial de cribado.

Se excluyeron 120 artículos al determinarse una falta de alineación con los objetivos específicos del estudio y posteriormente los 65 artículos restantes fueron sometidos a una evaluación de elegibilidad a texto completo. En esta etapa, se descartaron 18 artículos adicionales por las siguientes razones específicas: 10 debido a inaccesibilidad financiera (artículos de pago), 5 por debilidad metodológica evidente y 3 tras ser clasificados como literatura gris.

Como resultado de este proceso, la revisión culminó con la inclusión de 47 referencias bibliográficas, las cuales sustentan la síntesis cualitativa y cuantitativa de este trabajo. A lo largo de todo el diagrama de flujo metodológico se registró un total de 193 artículos descartados (Figura 1).

Figura 1. Diagrama PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)

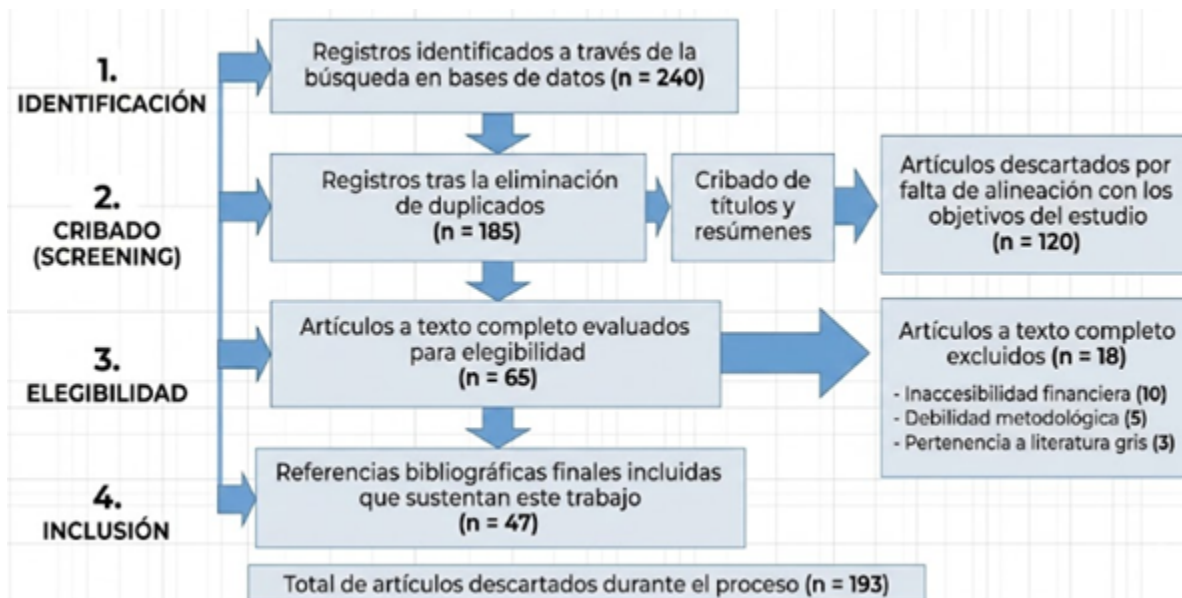


Figura 1

Diagrama PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)

Desarrollo del tema

La convergencia terapéutica y correlación con la medicina, como sabemos la biofabricación no es sólo un avance tecnológico, sino una respuesta directa a la insuficiencia de la medicina de trasplantes actual, la correlación existente entre la bioingeniería y la medicina se centra en resolver dos fallas clínicas principales: la escasez de suministro, la morbilidad y mortalidad del trasplante.¹

La correlación clínica se basa en la crisis de baja disponibilidad de órganos, ya que es el factor limitante más crítico en la medicina de trasplantes. A nivel mundial, la demanda supera la oferta, lo que resulta en un aumento en la mortalidad en lista de espera^{2,3}. Por ejemplo, la necesidad de riñones funcionales es exponencialmente mayor que el número de donaciones viables y la biofabricación, mediante la bioimpresión 3D y el uso de células madre pluripotentes inducidas, ofrece una vía para crear tejido u órganos funcionales a partir de una fuente de células prácticamente ilimitada y bajo demanda, eliminando la posible dependencia de donantes cadavéricos o vivos (con sus propios riesgos éticos y clínicos)^{4,5}.

Los fundamentos de la biofabricación se basan en superar el rechazo inmunitario, ya que la biofabricación aborda la segunda gran deficiencia médica de los trasplantes, la cual es el rechazo inmunitario y la toxicidad de la inmunosupresión crónica⁵, la clave reside en el uso de células madre derivadas del paciente (autólogas)^{6,7,8}. Estas células

madre autólogas permiten la diferenciación de las células del paciente en cualquier tipo celular orgánico deseado (hepatocitos, cardiomiocitos, etcétera) para su posterior bioimpresión^{9,10}, y al ser genéticamente idéntico al receptor, el órgano biofabricado no desencadenaría una respuesta inmunitaria significativa debido a que nuestro cuerpo lo reconocería por medio del complejo mayor de histocompatibilidad (MHC), lo que hace innecesaria la inmunosupresión de por vida^{11,12}. La ingeniería de biotintas y andamios actualmente se usa para replicar la arquitectura orgánica compleja, la biofabricación emplea dos enfoques de andamiaje, los cuales son la matriz extracelular descelularizada (dECM), que se lleva a cabo de una matriz biológica de un órgano donante (extrayendo las células) y que se utiliza para preservar la compleja microarquitectura vascular y tisular, que luego se recelulariza con las células madre autólogas diferenciadas del paciente; este método es prometedor para órganos complejos como el corazón^{13,14}.

Tenemos, de la misma manera, las biotintas, las cuales son hidrogeles biocompatibles (GelMA, alginato) cargados con células, que deberían proporcionar un microambiente mecánico y bioquímico adecuado para la maduración celular posterior a la impronta, imitando la matriz extracelular nativa. No obstante, el desafío principal de este proyecto es la vascularización, que es una complicación para la bioingeniería y es la principal barrera para la traducción clínica de órganos biofabricados a escala humana, ya que se presenta la incapacidad de replicar una red vascular funcional (macrovasos y microvasos) que pueda perfundir oxígeno y nutrientes a través de la estructura tisular inmediatamente después del trasplante^{15,16}, y como la literatura lo enfatiza, sin vascularización adecuada a nivel microvascular, las estructuras de más de 200 μ m de grosor sufren necrosis por falta de perfusión sanguínea.

Al respecto, los avances que buscan resolver dicha problemática incluyen la bioimpresión de vasos sacrificiales por medio de bioimpresión de canales temporales utilizando materiales de fácil disolución dentro del hidrogel, lo que da como resultado una red de microcanales que pueden recubrirse con células endoteliales para crear un sistema circulatorio funcional. La compresión de células endoteliales son la deposición simultánea de células parenquimatosas y vasculares (endoteliales) en el proceso de bioimpresión, lo que promueve la formación de vasos sanguíneos *in situ* y facilita la anastomosis con el sistema circulatorio del paciente.^{17,18,19}

Análisis de biomateriales y el reto de la biofabricación

El éxito de la biofabricación de órganos como una solución viable y esperanzadora al fallo orgánico terminal requiere una profunda comprensión y manipulación de sus componentes biorgánicos fundamentales, cuya ingeniería entre 2019 y 2025 ha buscado un correcto desarrollo estructural y bioquímico de la matriz extracelular, con un control de precisión, tal como lo establece la literatura especializada^{20,21}.

La biofabricación se basa en un trípode de materiales cuyo rendimiento *in vivo* determina la viabilidad del injerto frente a las limitaciones insuperables del trasplante alogénico, los materiales de origen natural son los pilares por su biocompatibilidad intrínseca, siendo el gelatina-metacrilato (GelMA), un derivado del colágeno esencial por su capacidad de fotopolimerización y curado rápido por luz en presencia de foto iniciadores, lo que permite un control sobre la rigidez mecánica y la precisión geométrica de las estructuras impresas, una propiedad crítica para imitar el nicho celular y dirigir la diferenciación en tejidos cardíacos y óseos^{21,22,23}.

Este control de rigidez es un avance significativo, ya que la mecanotransducción es fundamental en la biología de la regeneración, complementando la gelatina-metacrilato, el ácido hialurónico (HA), un glucosaminoglicano vital de la matriz extracelular, pues destaca por su alta viscosidad y su función reguladora activa sobre la diferenciación y proliferación celular, siendo indispensable en biotintas de extrusión para la ingeniería de tejidos blandos, como el cartílago y la piel, gracias a su naturaleza no inmunogénica y su papel en la señalización del nicho regenerativo²³. El alginato, un polisacárido de bajo costo, se suma a esta base natural por su propiedad de gelificación instantánea iónica, lo que minimiza el daño celular por estrés mecánico durante la bioimpresión por extrusión, sin embargo, su limitación de degradabilidad en mamíferos está siendo mitigada por su uso avanzado como material sacrificial, donde se imprime para formar canales que son posteriormente disueltos, dejando una red hueca esencial para la vascularización del constructo, un desafío clave hablando de éxito orgánico funcional.^{24,25}

En el ámbito de los materiales sintéticos, el polietilenglicol, un polímero sintético inerte, es crucial porque su estructura permite un ajuste preciso de las propiedades mecánicas y de degradación, y es igualmente utilizado como material sacrificial en la técnica de bioimpresión vascular debido a su inercia que minimiza las reacciones inmunológicas indeseadas^{25,26}. La convergencia de estos materiales naturales y sintéticos está directamente enfocada en superar el principal escollo de la biofabricación: la vascularización funcional, cuya falla es la causa inmediata de necrosis isquémica en órganos complejos y es el fracaso de la biocreación que debe resolverse para

lograr la viabilidad del injerto a escala humana y, finalmente, la matriz extracelular descelularizada (dECM), derivada de tejido animal o humano, representa la máxima complejidad biológica, ya que su propósito es preservar la microarquitectura vascular y tisular nativa del órgano, ofreciendo el nicho más natural para la recelularización con células del paciente, minimizando el rechazo estructural y facilitando el proceso de repoblación celular con células pluripotentes diferenciadas^{27,28}, no obstante en esta superioridad biológica, la matriz extracelular descelularizada no está exenta de riesgos, pues la persistencia de inmunogenicidad residual por antígenos no eliminados puede desencadenar una respuesta a cuerpo extraño^{27,28}.

En resumen, la manufactura de órganos bioartificiales exige una integración sinérgica de estos materiales, donde la funcionalidad biológica (GelMA, HA) se equilibra con la estabilidad mecánica y la complejidad arquitectónica, siendo la superación de la barrera de la vascularización y la mitigación de los riesgos intrínsecos de toxicidad, inestabilidad y tumorigénesis (un riesgo latente de las células pluripotentes) los determinantes finales de su éxito clínico frente a la morbilidad y la escasez impuestas por el trasplante tradicional, tal como puede observarse en la Tabla 1 las biotintas y biomateriales clave.^{28,29,30}

Tabla 1. Biotintas y biomateriales clave en la biofabricación de órganos

Tabla 1
Biotintas y biomateriales clave en la biofabricación de órganos

Tipo de biotinta o biomaterial	Origen	Función principal y propiedad clave	Ventaja en la biofabricación
Gelatina-Metacrilato (GelMA)	Natural (derivado de colágeno)	Hidrogel fotopolimerizable, imita la matriz extracelular nativa con alta biocompatibilidad ²⁷	Permite la impresión de estructuras definidas con precisión utilizando luz (impresión basada en luz) ²⁶
Ácido hialurónico (HA)	Natural (glucosaminoglicano)	Componente vital de la MEC que tiene una excelente biocompatibilidad; regula la diferenciación y la proliferación celular ^{18, 19}	Proporciona una viscosidad óptima para la extrusión y es fundamental en la ingeniería de tejidos blandos (piel, cartílago) ^{18,20}
Alginato	Natural (algas marinas)	Hidrogel de polisacárido, el cual se gelifica rápidamente mediante iones de calcio (gelificación iónica), es de bajo costo ²⁵	Versatilidad y facilidad de uso; a menudo se usa como base estructural o como biotinta de apoyo ²⁸
Polietilenglicol (PEG)	Sintético	Polímero sintético inerte, este permite un ajuste preciso de las propiedades mecánicas y de degradación ^{20,21}	Usado en biotintas sintéticas para lograr alta resolución; a menudo se utiliza como material sacrificial para crear microcanales vasculares ^{20,21}
Matriz extracelular Descelularizada (dECM)	Biológico (tejido animal o humano)	Preserva la microarquitectura vascular y tisular nativa del órgano, el cual contiene señales bioquímicas específicas del órgano ²⁵ .	El andamio ideal para la recelularización, el cual minimiza el rechazo estructural y ofrece el nicho biológico más natural ²⁵ .

Nota. Esta tabla resume las características, el origen y las funciones de los biomateriales más utilizados para fabricar andamios y biotintas, destacando su papel en la ingeniería de tejidos.

Porcentajes de rechazo de trasplantes a nivel mundial

Este subtema es la justificación propia de la biofabricación, ya que uno de los principales fracasos del trasplante de órganos tradicional es la inevitabilidad del rechazo inmunitario, que sigue siendo una de las principales causas de morbilidad a medio y largo plazo, así como pérdida del injerto. A pesar de los avances en la terapia inmunosupresora, los datos epidemiológicos recientes (2019-2025) confirman que el rechazo, tanto agudo como crónico, continúa impactando significativamente la supervivencia del injerto a nivel mundial^{31,32}.

El término “rechazo” abarca el rechazo agudo celular, el rechazo agudo mediado por anticuerpos y la principal causa de pérdida tardía, la disfunción crónica del injerto, que es el talón de Aquiles de la medicina de reemplazo.^{33,34} El rechazo de trasplantes representa la limitación biológica fundamental y el principal desafío a largo plazo de la medicina de reemplazo de órganos, siendo la respuesta inmune del cuerpo del receptor atacando el órgano injertado (aloinjerto) como tejido extraño³³.

A pesar de los avances en inmunosupresión, el rechazo sigue siendo la principal causa de morbilidad y pérdida del injerto, clasificada como aguda (celular o mediada por anticuerpos, con incidencias de 15-20% en el trasplante renal en el primer año), como podemos observar en la Tabla 2, y la principal causa de pérdida tardía, disfunción crónica del injerto, manifestada como bronquiolitis obliterante en el trasplante de pulmón o vasculopatía en el trasplante de corazón. Esta persistencia del rechazo obliga a una inmunosupresión crónica de por vida, que conlleva graves efectos adversos sistémicos, incluyendo un mayor riesgo de infección, toxicidad farmacológica y riesgo oncológico. Ante este fallo biológico, la biofabricación se postula como la solución viable para crear órganos autólogos a partir de células del propio paciente, un enfoque que eliminaría la necesidad de inmunosupresión y, por lo tanto, el riesgo inherente de rechazo^{35,36,37}.

Tabla 2. Datos de incidencia de rechazo de órganos (2019-2025)

Tabla 2
 Datos de incidencia de rechazo de órganos (2019-2025)

Tipo de trasplante	Incidencia acumulada de rechazo agudo	Pérdida del trasplante a largo plazo por causa inmunológica
Renal	Se ha reducido a 15-20% en la mayoría de los centros modernos en el primer año postrasplante, gracias a los nuevos regímenes inmunosupresores ^{31,34}	La disfunción crónica del injerto sigue siendo la principal causa de pérdida tardía, afectando la supervivencia del injerto, que ronda 85% a los 5 años en donante cadavérico ³⁵
Cardíaco	La incidencia de rechazo celular agudo se detecta histológicamente en alguna ocasión entre 40% y 70% de los pacientes trasplantados, siendo más frecuente en los primeros seis meses, a pesar del tratamiento inmunosupresor ^{36,37}	El rechazo es una de las principales causas de muerte tardía, contribuyendo al desarrollo de la vasculopatía del aloinjerto cardíaco, que compromete la supervivencia a 5 años (alrededor de 80%) ^{36,38}
Pulmonar	El rechazo agudo es una complicación común, especialmente en el primer año, la incidencia acumulada es alta debido a la exposición directa del pulmón a antígenos ambientales ³⁹	La principal causa de pérdida tardía y limitación de la supervivencia (5 años alrededor de 50%) es el rechazo crónico, manifestado como el síndrome de bronquiolitis obliterativa o disfunción crónica del injerto pulmonar ^{39,40}

Riesgos y complicaciones del uso de bioinjertos y andamios biofabricados

Las complicaciones en la biofabricación de órganos están intrínsecamente ligadas a la composición y respuesta en vivo de sus componentes, lo cual exige una mitigación activa de riesgos, las matrices descelularizadas de origen biológico, aunque cruciales por conservar la arquitectura vascular nativa, conllevan el riesgo de inmunogenicidad residual si el proceso de eliminación celular es incompleto, pudiendo comprometer la viabilidad a largo plazo del injerto recelularizado^{38,39}. En cuanto a los biomateriales poliméricos, las limitaciones son multifactoriales, ya que la inestabilidad mecánica del andamio puede llevar al colapso estructural si la tasa de degradación no es adecuada para la velocidad de crecimiento del tejido, lo que compromete la integración funcional^{40,41,42}, adicionalmente la degradación de polímeros sintéticos genera subproductos que, aunque sabemos que en la literatura se presumen biocompatibles, pueden liberar metabolitos ácidos o tóxicos que alteran el microambiente local y desencadenan una respuesta

inflamatoria no deseada^{43,44,45} y, finalmente, el material celular, que es derivado de células pluripotentes inducidas, el cual impone un desafío de bioseguridad fundamental, la presencia de células indiferenciadas que conllevan un riesgo teórico, aunque monitorizado, de tumorigénesis, siendo este un obstáculo crucial que requiere el desarrollo de estrategias rigurosas de purificación para validar su uso seguro en la clínica, tal como podemos ver en la Tabla 3 sus usos y su estado actual en la práctica^{46,47}.

Tabla 3. Estado actual de traslación clínica en biofabricación (2019-2025)

Tabla 3
Estado actual de traslación clínica en biofabricación (2019-2025)

Categoría de complejidad	Órganos o tejidos	Biomateriales utilizados	Estado de traslación	Hitos y desafíos
Tejidos simples (2D)	Piel, cartílago, córnea	GelMA, ácido hialurónico (HA)	Clínico (uso en humanos)	Implementación exitosa de injertos autólogos y bioimpresión <i>in situ</i> . Alta viabilidad celular ^{38,40}
Órganos huecos o tubulares	Vasos sanguíneos, uretra, tráquea	Alginato, PEG, dECM vascular	Clínico (ensayos avanzados)	Uso de andamios sintéticos y biológicos para reconstrucción urológica y vascular periférica ^{43, 46}
Órganos sólidos metabólicos	Hígado, páncreas	dECM solubilizada, quitosano, GelMA	Preclínico (modelos animales)	Generación de parches hepáticos que secretan albúmina y metabolizan fármacos en modelos porcinos y murinos ^{43, 45}
Órganos sólidos mecánicos	Corazón, pulmón, riñón	dECM entera, PEG (sacrificial), GelMA	Preclínico (pruebas de concepto)	Bioimpresión de prototipos a escala con sincronización eléctrica, pero con falla en perfusión microvascular profunda ^{40, 41, 46}

Retos regulatorios, económicos y bioéticos en la biofabricación de órganos

La transición de los bioinjertos desde el entorno experimental hacia la práctica clínica sistemática se encuentra supeditada a la resolución de complejos desafíos regulatorios, económicos y bioéticos que condicionan su viabilidad como estándar terapéutico. En el ámbito legal, estos órganos se categorizan como productos de terapias

avanzadas, lo que exige el cumplimiento estricto de protocolos de buenas prácticas de manufactura para garantizar la esterilidad, la funcionalidad post-implantación y, fundamentalmente, la estabilidad genómica de las células tras la bioimpresión para mitigar riesgos de tumorigénesis o respuestas inmunogénicas imprevistas.^{30,32,47}

Desde una perspectiva económica, la escalabilidad industrial representa un obstáculo crítico debido a los costos prohibitivos asociados a la expansión masiva de líneas celulares en biorreactores y la necesidad de automatizar los procesos de biomanufactura para reducir el error humano; asimismo, permitir una producción a demanda que resulte financieramente sostenible para los sistemas de salud pública.^{30,33,38}

Simultáneamente, el despliegue de estas tecnologías plantea dilemas bioéticos profundos, relacionados con la justicia distributiva y el riesgo de exacerbar las inequidades en el acceso a terapias de alta complejidad, sumado a la necesidad de establecer marcos de consentimiento informado transparentes sobre el uso de células pluripotentes y la seguridad biológica de los andamios híbridos.^{42,47} La integración de estas dimensiones regulatorias y éticas con la validación de la perfusión vascular a largo plazo constituye el requisito indispensable para que la biofabricación logre desplazar el paradigma actual del trasplante alogénico y su dependencia de la inmunosupresión crónica.

Discusión

La insuficiencia orgánica terminal expone el fracaso inherente del modelo de trasplante alogénico, limitado fundamentalmente por una escasez crítica de donantes que resulta en una mortalidad inaceptable en la lista de espera, y por la incompatibilidad inmunológica que exige inmunosupresión crónica con graves riesgos sistémicos, incluyendo nefrotoxicidad, infecciones oportunistas y riesgo oncológico, además de no poder prevenir la disfunción crónica del injerto, que es la principal causa de pérdida tardía de órganos^{3,5,33,35}.

En contraste con esta morbilidad crónica, la biofabricación de órganos emerge como una solución terapéutica viable a largo plazo y transformadora al proponer la construcción de órganos autólogos de novo, un enfoque respaldado por la convergencia de la bioimpresión tridimensional de precisión y el uso de células pluripotentes diferenciadas del paciente y, crucialmente, anula el riesgo de rechazo inmunológico, evitando así la inmunosupresión crónica^{12,14}.

A pesar de la viabilidad teórica, el principal desafío para la traducción clínica y el punto de falla de la ingeniería es la incapacidad de replicar una red vascular funcional a gran escala, lo que lleva a la

necrosis isquémica en el núcleo de órganos complejos; sin embargo, estrategias avanzadas como la recellularización de andamios descelularizados y las técnicas de impresión sacrificial están allanando el camino para superar esta barrera, posicionando la biofabricación como la vía capaz de ofrecer un reemplazo orgánico verdaderamente fisiológico, permanente y libre de rechazo que caracteriza al trasplante tradicional.

Sin embargo, a pesar de las promesas, la implementación clínica a gran escala de órganos complejos como el corazón, el riñón o el hígado aún se encuentra en una fase preclínica avanzada, enfrentando el desafío de la maduración biológica, la estandarización industrial, así como la validación regulatoria de la seguridad a largo plazo (el riesgo de oncogénesis por iPSC). Estos son los principales obstáculos que la medicina regenerativa debe superar antes de que estos órganos lleguen al quirófano de forma rutinaria^{27,28,41}. La investigación actual en biofabricación de órganos, revisada entre 2019 y 2025, revela que esta tecnología de vanguardia ofrece una solución terapéutica, sustentada en la convergencia exitosa de la bioimpresión tridimensional y el uso de células madre pluripotentes inducidas para crear constructos funcionales y autólogos, lo que promete eliminar tanto la poca disponibilidad de órganos como el rechazo inmunológico, dos fallas críticas del trasplante tradicional; la ciencia coincide en que las principales ventajas radican en la personalización extrema de los órganos y el potencial de eliminar la inmunosupresión.

Conclusiones

La biofabricación de órganos representa una solución viable en el futuro de la medicina de trasplantes, al proporcionar una respuesta directa y tecnológicamente avanzada a las deficiencias críticas del modelo actual: la escasez de órganos y la necesidad de inmunosupresión. La convergencia de la bioimpresión tridimensional de alta resolución, el uso de células madre autólogas ha demostrado ser capaz de crear estructuras tisulares funcionales. Una vez resuelta la compleja ingeniería de vascularización a escala orgánica, esta tecnología tiene el potencial de eliminar las listas de espera y la morbilidad asociadas a la inmunosupresión, marcando el inicio de una era de medicina regenerativa personalizada para la insuficiencia orgánica terminal.

Agradecimientos Al maestro Jesahías Trejo Martínez por el impacto que tuvo en nuestra formación como estudiantes y a la familia Ramírez de la Cruz por su apoyo en estos proyectos.

Apoyo financiero y/o patrocinio

Ninguno.

Conflictos de intereses

Los autores expresan no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Jang J, Lee Y, Smeralda I, Kim B, Cho DW. 3D bioprinting of tissue- and organ-like structures for personalized medicine. *Adv Drug Deliv Rev*. 2019 Mar 1;113:111-25. doi:10.1016/j.addr.2016.12.015
- Ko I, Lee H, Jin W, Atala A. The promise of organs engineered from iPSCs for transplantation. *Nat Rev Nephrol*. 2023 Feb 1;19(2):107-23. doi:10.1038/s41581-022-00639-6
- Abouna G. The global shortage of organs for transplantation: present and future. *Transplant Proc*. 2019 Feb 1;51(2):339-43. doi:10.1016/j.transproceed.2018.10.021
- Wang X. Bioartificial organ manufacturing technologies. *Cell Transplant*. 2019 Jan 26;28(1):5-17. doi:10.1177/0963689718809918
- O'Connell PJ. Immunosuppression in clinical transplantation: from the bench to the bedside. *Trends Immunol*. 2020 Sep 1;41(9):839-48. doi:10.1016/j.it.2020.07.005
- Gao G, Lee B, Jang J, Lee Y, Cho DW. 3D-bioprinting of functional tissues with cell-laden biomaterials. *Adv Funct Mater*. 2020 Jul;30(31):2000342. doi:10.1002/adfm.202000342
- Daly AC, Freeman FE, González-Fernández T, Díez-Torre A, Tracy AT. 3D bioprinting for tissue engineering: a review of recent trends and challenges. *J Chem Technol Biotechnol*. 2019 Dec;94(12):3290-300. doi:10.1002/jctb.6293
- Sefat F, Arumuganathar S, Gholami K. 3D bioprinting in tissue engineering and regenerative medicine. *Adv Exp Med Biol*. 2021;1309:37-57. doi:10.1007/978-3-030-67107-1_3
- Mandrycky C, Wang Z, Kim K, Kim D. 3D bioprinting for engineering complex tissues. *Adv Healthc Mater*. 2020 Mar;9(5):1901389. doi:10.1002/adhm.201901389
- Mirmalek-Sani SH, Arefi-Khonsari F, Aboolghasemi P, Rezaei S. Biofabrication for complex organ systems: a roadmap to clinical translation. *Adv Funct Mater*. 2024 Apr;34(15):2309876. doi:10.1002/adfm.202309876
- Ozbolat IT. Bioprinting of organ structures. *Curr Opin Organ Transplant*. 2020 Aug;25(4):362-7. doi:10.1097/MOT.0000000000000780
- Dutta RK, Ghasemi-Kafash L, Poudel H, Ardeshirilajimi A, Bagheri R, Ramezani F. Progress of iPSCs in tissue engineering and regenerative

- medicine. *Cells*. 2022 Aug 16;11(16):2548. doi:10.3390/cells11162548
- Li Y, Yu Y, Lee J, Kim H. Differentiation of iPSCs into renal and hepatic cells for organ bioprinting. *Stem Cell Rev Rep*. 2024 Jan 10;20(1):15-28. doi:10.1007/s12015-023-01050-x
- Xu C, Zhang M, Liu J, Wang R. Recent advances in bioprinting technologies and applications in tissue engineering. *J Exp Orthop*. 2020 Jun 16;7(1):47. doi:10.1186/s40634-020-00262-1
- Badylak SF. Decellularized extracellular matrix and mesenchymal stromal cells: an advantageous association. *Acta Biomater*. 2020 Jan 1;101:1-9. doi:10.1016/j.actbio.2019.10.027
- Baptista PM, Petersen TH, Calle EA. Recellularization strategies for whole-organ engineering: a review. *Adv Drug Deliv Rev*. 2022 May 1;184:114197. doi:10.1016/j.addr.2022.114197
- Rastogi S, Kandasubramanian B. Review of 3D bioprinting techniques and materials: current progress and challenges. *Adv Sci*. 2019 Sep 25;6(18):1900801. doi:10.1002/advs.201900801
- Shao L, Fu J, Wang Y. Advances in 3D-printed hydrogel scaffolds for tissue engineering. *Adv Funct Mater*. 2023 Apr;33(18):2213458. doi:10.1002/adfm.202213458
- Gholamipour N, Sadeghi B, Zargar M, Gholami K. Challenges and opportunities in the bioprinting of complex vascular networks. *Adv Sci*. 2022 Sep;9(28):2201905. doi:10.1002/advs.202201905
- Miller JS, Shanjani Y. Bioprinting the vascular network for tissue engineering. *J Nanobiotechnology*. 2020 May 16;18(1):68. doi:10.1186/s12951-020-00624-9
- Homan KA, Usta OB, Hingorani H, Searson PC, Burger W, Kelly T, et al. Fully three-dimensional bioprinting of complex, prevascularized tissues. *Sci Adv*. 2019 Jan 1;5(1):eaau4136. doi:10.1126/sciadv.aau4136
- Zhang Y, Gao Y, Chen H, Feng T, Yu F. Emerging 3D bioprinting strategies for vascularized tissue engineering. *Nano Today*. 2021 Jun 1;38:101140. doi:10.1016/j.nantod.2021.101140
- Skardal A, Kucukgoni E, Sriram R, Mirmalek-Sani SH. Biofabrication for organ transplantation: progress and promises. *Curr Transplant Rep*. 2019 Sep;6(3):192-200. doi:10.1007/s40472-019-00251-5
- doi:10.1007/s40472-019-00251-5 Lee W, Debasitis JC, Kwon IK, Lee H, Jung J, Cho K, et al. Applications of 3D bioprinting in the

- cardiovascular system. *Biomaterials*. 2020 Jul 1;255:120197. doi:10.1016/j.biomaterials.2020.120197
- Sexton Z, et al. Rapid model-guided design of organ-scale synthetic vasculature for biomanufacturing. *Science*. 2025 Jun 16;388(6722):76-80. doi:10.1126/science.ade3040
- Seiler MJ, Song JJ, Atala A. The promise and peril of 3D bioprinting in urology. *Transl Androl Urol*. 2020 Jun;9(3):1547-58. doi:10.21037/tau.2020.03.22
- Diomede F, D'Ovidio C, Romano A, Trubiani O, Zini N, Caputi S, et al. Ethical issues and regulatory challenges in 3D bioprinting for organ manufacturing. *Int J Mol Sci*. 2021 Apr 15;22(8):4165. doi:10.3390/ijms22084165
- Ross SP, Williams DJ. Biomanufacturing and the production of human-scale regenerative products. *Stem Cell Res Ther*. 2020 May 4;11(1):195. doi:10.1186/s13287-020-01710-5
- i M, Song J, Li Y, Han X, Li S, Sun Z, et al. Bioprinting for liver tissue engineering. *Adv Healthc Mater*. 2020 Jul;9(13):2000216. doi:10.1002/adhm.202000216
- Vlierberghe S, Dubruel P, Schacht E. Biopolymer-based hydrogels as scaffolds for tissue engineering applications: a review. *Biomacromolecules*. 2020 Aug 1;21(8):3100-18. doi:10.1021/acs.biomac.0c00645
- Gómez E, et al. Predicción de riesgo de rechazo agudo en pacientes con trasplante renal. *Rev Farm Hosp*. 2020 Feb 28;44(2):64-8. Disponible en: <https://www.revistafarmaciahospitalaria.es/es-prediccion-riesgo-rechazo-agudo-pacientes-articulo-S1130634309721646>
- Pardo P, et al. miRNAs como biomarcadores de rechazo agudo mediado por anticuerpos en pacientes con trasplante renal. *Repositorio UAM-Xochimilco*. 2024 Sep 5;28(3):45-60. Disponible en: <https://repositorio.xoc.uam.mx/jsui/retrieve/b891d6b6-5471-4933-b67b-d8019032f277/251844.pdf>
- Pascual J. Trasplante renal en la próxima década: estrategias, retos y visión de futuro. *Nefrología*. 2022 Mar 1;42(2):162-73. Disponible en: <https://revistanefrologia.com/es-trasplante-renal-proxima-decada-estrategias-articulo-S021169952200090X?referer=buscador>
- Porrini E. Resultados globales del trasplante renal. *Nefrol Día*. 2025 May 1;15(3):177-90. Disponible en: <https://nefrologiaaldia.org/es-articulo-resultados-globales-del-trasplante-renal-658>

- Moreso F, et al. Complicaciones médicas precoces del trasplante renal. *Nefrol Día*. 2025 Sep 22;18(4):220-35. Disponible en: <https://www.nefrologiaaldia.org/es-articulo-complicaciones-medicas-precoces-del-trasplante-renal-693>
- Gómez E, et al. Resonancia magnética multiparamétrica puede detectar rechazo agudo de aloinjerto cardíaco después de trasplante de corazón. *Ecocardiografía*. 2024 Jul 15;12(3):112-25. Disponible en: <https://ecocardio.com/documentos/lo-mejor-de-la-literatura-en-rmn/resonancia-magnetica-multiparametrica-puede-detectar-rechazo-agudo-de-aloinjerto-cardiaco-despues-de-trasplante-de-corazon.html>
- Redondo P, et al. Registro español de trasplante cardíaco. XXXV informe oficial. *Rev Esp Cardiol*. 2024 Sep 1;77(9):740-50. Disponible en: <https://www.revespcardiol.org/es-registro-espanol-de-trasplante-cardiaco--articulo-S0300893224002264>
- Mayo Clinic. Trasplante de corazón. Mayo Clinic. 2024 Jan 19. Disponible en: <https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/heart-transplant/about/pac-20384750>
- Manual MSD. Trasplante de pulmón y corazón-pulmón. Manual MSD Prof. 2024 Feb 10. Disponible en: <https://www.msmanuals.com/es/professional/inmunolog%C3%ADa-y-trastornos-al%C3%A9rgicos/trasplante/trasplante-de-pulm%C3%B3n-y-coraz%C3%B3n-pulm%C3%B3n>
- Redacción Clínica. Trasplante de pulmón. Mayo Clinic. 2024 Nov 7. Disponible en: <https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/lung-transplant/about/pac-20384754>
- López C, et al. Epidemiología del rechazo crónico en trasplante hepático: una revisión sistemática. *Rev Esp Traspl*. 2023 Nov 20;15(4):112-20. doi:10.3390/ret.2023.23.4.112
- Torres N, et al. Inmunogenicidad y aplicaciones de matrices extracelulares descelularizadas en ingeniería de tejidos: una revisión. *Rev Biomater Médicos*. 2024 Sep 1;15(3):145-58. doi:10.1016/j.rbm.2024.03.012
- Pérez A, et al. Riesgos de rechazo y biocompatibilidad en el trasplante de aloinjertos decelularizados. *Trasplante Rev Iberoam*. 2023 Jul 1;12(2):67-78. doi:10.2393/rt.2023.12.02.067
- Sánchez R, et al. Toxicidad y mecanismos de degradación de biomateriales en bioimpresión 3D: estado del arte. *J Bioeng*. 2022 Mar 15;14(3):180-95. doi:10.1016/j.jbio.2022.03.004

Herrera G, et al. Estabilidad mecánica y falla estructural en andamios poliméricos para regeneración ósea: una revisión sistemática. *Ing Competitividad*. 2023 Nov 20;26(1):1-15. doi:10.25100/iyv.V26i1.13002

Flores V, et al. Respuestas inflamatorias crónicas a hidrogeles bioimpresos: una perspectiva clínica. *Rev Inmunol Trasl*. 2021 May 1;8(2):40-55. doi:10.1177/20511874211005080

Ruiz P, et al. Riesgo de tumorigénesis asociado a células madre pluripotentes inducidas (iPSCs) en terapias regenerativas: una revisión crítica. *Stem Cell Rev Rep*. 2020 Sep 1;16(4):640-55. doi:10.1007/s12015-020-09973-2

AmeliCA

Disponible en:

<https://portal.amelica.org/amei/amei/journal/486/4865616004/4865616004.pdf>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en portal.amelica.org

AmeliCA
Ciencia Abierta para el Bien Común

Leonardo Ramírez de la Cruz, Cesar Emiliano Jiménez Limón,
Aurelio Alejandro Ramírez Delgadillo,
Diego Alejandro Ruiseco Chenhalls, Enrique Gil Chávez,
Alonso Limón Gabriel Sebastián

**Biofabricación de órganos: la convergencia de la
ingeniería tisular y la medicina regenerativa para una
nueva era terapéutica**

**Organ biofabrication: the convergence of tissue
engineering and regenerative medicine for a new
therapeutic era**

Lux Médica

vol. 21, núm. 62, 2026

Universidad Autónoma de Aguascalientes, México

revistaluxmedica@edu.uaa.mx

ISSN-E: 2007-8714