

Inteligencia artificial y biobancos cardiovasculares: promesa tecnológica y responsabilidad ética compartida

Artificial intelligence and cardiovascular biobanks: Shared technological promise and ethical responsibility

Gerardo Rivera-Silva^{1a}, María Guadalupe Moreno-Treviño^{2b}, Claudia Cristina Santos-Lozano^{1c}, Pablo Martínez-Fernández^{1d}

Resumen

La implementación de la inteligencia artificial (IA) en biobancos y bancos de tejidos cardiovasculares constituye una transformación estructural con impacto en la medicina de precisión, la investigación traslacional y la gestión de recursos biomédicos. Estas tecnologías permiten optimizar la clasificación, almacenamiento y asignación de tejidos, mejorar la trazabilidad de las muestras y analizar de forma integrada grandes volúmenes de datos clínicos, histológicos y genómicos. No obstante, su adopción introduce desafíos éticos, técnicos y epistemológicos que superan una visión meramente instrumental. El uso de algoritmos en contextos clínicos plantea riesgos como la automatización excesiva, la opacidad de los modelos predictivos, la reproducción de sesgos, la vulneración de la privacidad de los donantes y el manejo de datos genómicos sensibles. Además, la dependencia de sistemas automatizados puede desplazar el juicio experto y generar una falsa percepción de objetividad. Este artículo analiza estas implicaciones y propone un marco para la implementación responsable de la IA en biobancos cardiovasculares, basado en equidad, transparencia, gobernanza de datos, aplicabilidad clínica y respeto a la autonomía, y destaca que su valor depende de su solidez ética y científica. Todo ello orientado a fortalecer la confianza social, la calidad científica y el beneficio clínico sostenible.

Abstract

The implementation of artificial intelligence (AI) in biobanks and cardiovascular tissue banks constitutes a structural transformation with a significant impact on precision medicine, translational research, and the management of biomedical resources. These technologies enable the optimization, storage, and allocation of tissue classification, improve sample traceability, and allow the integrated analysis of large volumes of clinical, histological, and genomic data. However, their adoption introduces ethical, technical, and epistemological challenges that go beyond a purely instrumental perspective. The use of algorithms in clinical contexts poses risks such as excessive automation, the opacity of predictive models, the reproduction of biases, breaches of donor privacy, and the handling of sensitive genomic data. In addition, increasing reliance on automated systems may displace expert judgment and generate a false perception of objectivity. This article analyzes these implications and proposes a framework for the responsible implementation of AI in cardiovascular biobanks, based on principles of equity, transparency, data governance, clinical applicability, and respect for autonomy, emphasizing that their value depends on their ethical and scientific robustness. All of this is aimed at strengthening social trust, scientific quality, and sustainable clinical benefit.

¹Universidad de Monterrey, Facultad de Medicina, Banco de Tejidos Cardiovasculares. Monterrey, Nuevo León, México

²Universidad Autónoma de Coahuila, Centro de Estudios e Investigaciones Interdisciplinarios, Departamento de Posgrado. Saltillo, Coahuila, México

ORCID: 0000-0003-2587-5914^a, 0000-0002-4746-3630^b, 0000-0002-6362-1299^c, 0000-0001-8532-2364^d

Palabras clave

Inteligencia Artificial
Bancos de Muestras Biológicas
Ética en Investigación

Keywords

Artificial Intelligence
Biological Specimen Banks
Ethics, Research

Fecha de recibido: 10/12/2025

Fecha de aceptado: 18/02/2026

Comunicación con:

Gerardo Rivera Silva

✉ gerardo.rivera@udem.edu

☎ 81 8215 1000, extensión 2106

Cómo citar este artículo: Rivera-Silva G, Moreno-Treviño MG, Santos-Lozano CC, *et al.* Inteligencia artificial y biobancos cardiovasculares: promesa tecnológica y responsabilidad ética compartida. Rev Med Inst Mex Seguro Soc. 2026;64(5):e7068. doi: 10.5281/zenodo.21462818

Introducción

Los biobancos y los bancos de tejidos cardiovasculares constituyen infraestructuras esenciales para la medicina moderna. Su función como repositorios estructurados de muestras humanas permite sostener actividades de investigación, docencia y, en algunos casos, aplicaciones clínicas directas. En el ámbito cardiovascular, donde la calidad y la adecuada caracterización de los tejidos influyen en los resultados quirúrgicos, la trazabilidad y la integridad de la información asociada son pilares indispensables para garantizar seguridad, calidad y reproducibilidad científica.¹

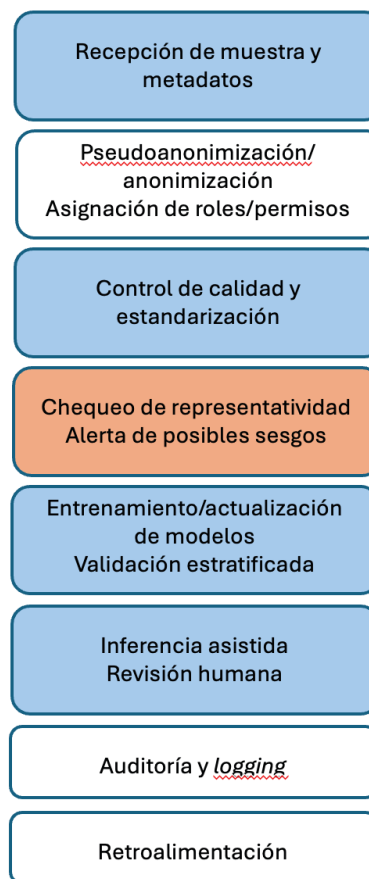
Estos repositorios almacenan tejidos cardíacos y vasculares, sangre, ADN, ARN y otros fluidos que permiten estudiar fisiopatología y biomarcadores. Globalmente existen al menos 2663 biobancos.² Europa concentra más de 700 en 23 países, mientras que América Latina posee cerca de 44, sobre todo oncológicos. En México hay 3 principales: *OriGen Health Research Center*, colaboración entre el Tecnológico de Monterrey y la Universidad de Texas en Austin; BIOMEM, del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán (INCMNSZ); y el Banco de Tejidos Cardiovasculares de la Universidad de Monterrey. Esto pone en evidencia la necesidad de expandirlos en nuestra región para fortalecer la investigación, la innovación biomédica y el diagnóstico clínico equitativo y sostenible.³

Tradicionalmente, estos repositorios han operado mediante sistemas manuales o semiautomatizados, los cuales presentan limitaciones relevantes: registros heterogéneos, variabilidad humana en la evaluación macroscópica y microscópica, dificultades en la estandarización de metadatos y restricciones para integrar información clínica, histológica y genómica. En el tenor de la medicina de precisión, surge la necesidad de evolucionar hacia plataformas digitales robustas y capaces de sostener análisis complejos. En este escenario, la IA se proyecta como una herramienta transformadora a lo largo del ciclo completo del tejido, desde su recepción hasta su almacenamiento y uso.⁴

La IA, particularmente el aprendizaje maquinal, el aprendizaje profundo y la visión computarizada, ha demostrado capacidad para procesar grandes volúmenes de datos biomédicos, identificar patrones imperceptibles para el ojo humano y generar modelos predictivos de alta precisión.⁵ En biobancos cardiovasculares, estas tecnologías pueden mejorar el control de calidad mediante algoritmos de clasificación tisular, automatizar la detección de alteraciones estructurales en imágenes digitales, optimizar inventarios y predecir la degradación tisular con base en condiciones de almacenamiento (figura 1).⁶

Sin embargo, la incorporación de IA no debe concebirse

Figura 1 Proceso de integración de inteligencia artificial en biobancos cardiovasculares desde recepción de muestras hasta retroalimentación



Cajas azules: etapas técnicas y analíticas; blancas: control, seguridad y gobernanza; naranja: evaluación de representatividad y sesgos. El *logging* es el registro automático de actividades para garantizar trazabilidad, supervisión y cumplimiento normativo

únicamente como un avance técnico orientado a la eficiencia. Su impacto alcanza la estructura epistemológica de la ciencia biomédica al introducir sistemas de decisión automatizados cuya transparencia y auditabilidad no siempre están garantizadas. La relevancia clínica de los tejidos cardiovasculares exige marcos normativos rigurosos y estrategias de gobernanza que aseguren que la automatización no comprometa la calidad ni la ética.⁷

En este contexto, el presente artículo tiene como propósito desarrollar un marco integral para la integración responsable de IA en biobancos y bancos de tejidos cardiovasculares, abordando 4 ejes centrales: (1) fundamentos técnicos y operativos de implementación, (2) aplicaciones biomédicas y analíticas, (3) riesgos éticos y regulatorios y (4) estrategias de gobernanza y validación orientadas a la práctica clínica y científica.

Desarrollo

De repositorios pasivos a ecosistemas inteligentes

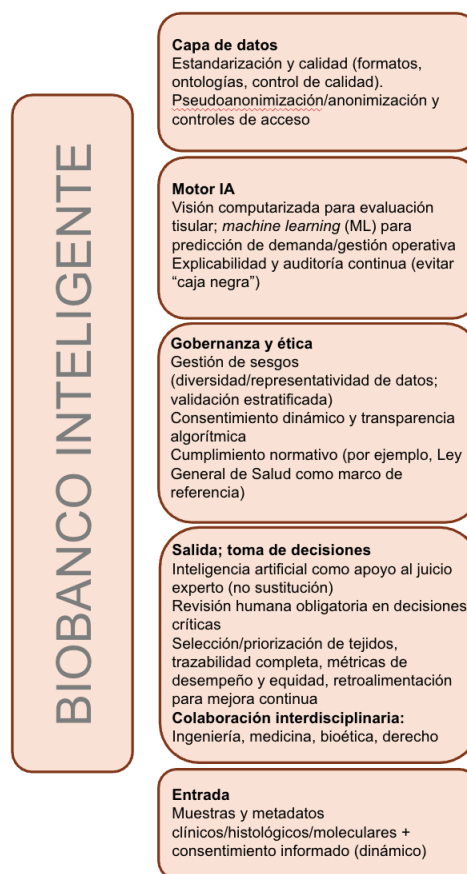
Durante décadas, los biobancos operaron principalmente como repositorios pasivos destinados al almacenamiento, la conservación y el resguardo de muestras biológicas, con una participación limitada en la generación activa de conocimiento científico. Su función se centraba en garantizar la integridad física y biológica de las muestras, así como en su disponibilidad para estudios futuros, sin una integración profunda con los procesos analíticos, clínicos o decisionales. Este modelo tradicional, aunque fundamental para el desarrollo inicial de la investigación biomédica, mostraba limitaciones frente a la creciente complejidad y volumen de los datos generados en la medicina moderna.

No obstante, el avance sostenido de la digitalización, junto con la incorporación progresiva de herramientas de IA, ha impulsado una transformación profunda de este paradigma. Este proceso ha permitido que los biobancos evolucionen hacia ecosistemas inteligentes capaces de analizar información de manera dinámica, generar conocimiento en tiempo casi real y participar activamente en redes biomédicas interconectadas local, nacional e internacionalmente.⁸ De esta forma, los biobancos dejan de ser entidades aisladas para integrarse en infraestructuras de datos que apoyan la medicina de precisión, la investigación traslacional y la toma de decisiones basada en evidencia.

La IA ofrece la capacidad de integrar, procesar y analizar grandes volúmenes de datos heterogéneos, entre los que se incluye información clínica, histopatológica, genómica, proteómica, imagenológica y logística. Mediante el uso de modelos predictivos y sistemas de aprendizaje automático, es posible anticipar necesidades futuras, optimizar la organización y rotación del inventario, predecir la vida útil de las muestras y sugerir rutas más eficientes para su procesamiento, trazabilidad y distribución.⁹ En el caso específico de los bancos de tejidos cardiovasculares, esta transición tecnológica puede traducirse en una mejora sustancial de la disponibilidad, calidad y seguridad de los injertos, una asignación más precisa basada en perfiles de riesgo clínico y biológico, y un fortalecimiento de los sistemas de bioseguridad, control de calidad y gobernanza de datos.¹⁰ En conjunto, estos avances permiten consolidar el concepto de biobancos inteligentes, orientados no solo al resguardo de muestras, sino a la generación activa de valor científico, clínico y social (figura 2).

No obstante, esta evolución tecnológica exige el desarrollo de estructuras de gobernanza avanzadas, una interope-

Figura 2 Etapas de conformación de un biobanco inteligente



IA: inteligencia artificial

rabilidad efectiva entre plataformas clínicas, laboratoriales y de investigación, así como mecanismos robustos para la protección de datos sensibles. En este nuevo escenario, el biobanco deja de ser un mero espacio de almacenamiento para convertirse en un nodo estratégico de información biomédica, cuya operación debe alinearse estrictamente con estándares de calidad, ética, seguridad y responsabilidad social.¹¹

La tensión entre automatización y juicio profesional

La utilización de algoritmos de IA en la clasificación de tejidos, la interpretación de imágenes histológicas y la predicción del deterioro de las muestras ofrece un potencial significativo para reducir la variabilidad diagnóstica y mejorar la estandarización de los procesos evaluativos. Por medio de tecnologías de visión computarizada y aprendizaje automatizado, estos sistemas pueden identificar patrones y características microscópicas que resultan imperceptibles o difíciles de cuantificar para el observador humano,

lo cual favorece evaluaciones más homogéneas, reproducibles y eficientes.¹² Esta capacidad resulta especialmente relevante en el ámbito de los biobancos cardiovasculares, donde la calidad estructural y funcional del tejido tiene un impacto directo en los resultados clínicos, la viabilidad de los injertos y la seguridad de los pacientes.

No obstante, la creciente automatización de estos procesos no está exenta de riesgos. Una dependencia excesiva de sistemas algorítmicos, particularmente aquellos con arquitecturas opacas, puede desplazar el juicio experto y generar una falsa sensación de certeza diagnóstica. Los modelos denominados de “caja negra”, característicos de ciertos enfoques de aprendizaje profundo, pueden ofrecer altos niveles de precisión predictiva, pero carecen de explicación respecto a los criterios que sustentan sus decisiones. En un entorno en el que se toman decisiones de alto impacto clínico y ético, esta falta de transparencia puede erosionar la confianza de los profesionales, dificultar la detección de errores y limitar los procesos de auditoría y validación externa.

Por ello, el juicio profesional continúa siendo un componente indispensable del proceso de evaluación. Patólogos, cardiólogos, ingenieros biomédicos y especialistas en control de calidad deben participar activamente en la interpretación crítica de los resultados generados por los algoritmos, identificar posibles inconsistencias y contextualizar las predicciones dentro del marco clínico y biológico correspondiente.¹³ En este sentido, la IA debe concebirse como una herramienta de apoyo que amplifique las capacidades humanas y no como un sustituto del razonamiento experto. El diseño e implementación de estas tecnologías debe priorizar principios de transparencia, trazabilidad algorítmica y posibilidad de revisión independiente, los cuales constituyen la base de un desarrollo tecnológico responsable y confiable.

Sesgos y desigualdades algorítmicas

Los algoritmos de IA aprenden a partir de los datos que reciben, lo que los hace particularmente susceptibles a reproducir y amplificar desigualdades estructurales preexistentes en los conjuntos de datos.¹⁴ En el contexto de los biobancos cardiovasculares, esta vulnerabilidad adquiere especial relevancia, ya que la subrepresentación de determinados grupos demográficos, étnicos o genéticos puede conducir a errores sistemáticos en la clasificación de muestras, a la subestimación de la calidad tisular o a decisiones de asignación inequitativas. Tales sesgos pueden afectar de manera directa la validez de los estudios derivados y comprometer la generalización de los resultados científicos.

Este riesgo tiene una dimensión ética considerable debido a la responsabilidad social inherente a los bioban-

cos. Estos constituyen un recurso de interés público que influye de forma directa en el acceso equitativo a la investigación biomédica, en la calidad de los trasplantes y en la generación de estrategias terapéuticas innovadoras. En este sentido, un algoritmo sesgado podría restringir inadvertidamente la inclusión de ciertos donantes, infravalorar la calidad de sus tejidos o influir negativamente en la asignación de recursos, lo cual profundizaría desigualdades ya existentes en los sistemas de salud.¹⁵

La mitigación de estos riesgos exige la implementación de estrategias metodológicas robustas y sistemáticas. Entre ellas se incluyen el diseño deliberado de bases de datos diversas e inclusivas, la validación externa de los modelos en poblaciones independientes, la realización de auditorías multicéntricas y la supervisión por comités interdisciplinarios que integren perspectivas clínicas, éticas y computacionales. Asimismo, el monitoreo continuo del desempeño algorítmico resulta esencial para detectar y corregir desviaciones a lo largo del tiempo. En este marco, la equidad algorítmica no solo representa un imperativo ético, sino también un requisito científico fundamental para garantizar resultados confiables, reproducibles y socialmente responsables.

Privacidad, gobernanza y consentimiento informado dinámico

La integración intensiva de datos clínicos, histológicos y genómicos en biobancos modernos plantea desafíos sustanciales para los modelos tradicionales de consentimiento informado, los cuales se basaban en usos predecibles, delimitados y temporalmente estables. En la actualidad, estos datos pueden ser reutilizados de forma continua y combinados mediante algoritmos de IA capaces de generar aplicaciones futuras que no siempre pueden ser anticipadas en el momento de la donación inicial.

En este contexto, el consentimiento informado debe concebirse como un proceso dinámico, renovable y sensible a la evolución tecnológica, el cual permita a los donantes actualizar sus preferencias y niveles de autorización conforme cambian los usos potenciales de sus datos.¹⁶ Si bien la anonimización y la pseudoanonimización robustas constituyen herramientas fundamentales para la protección de la privacidad, estas estrategias no son infalibles, particularmente cuando se integran datos genómicos con metadatos clínicos detallados que incrementan el riesgo de reidentificación.

Por ello, los biobancos deben implementar estructuras sólidas de gobernanza de datos que incluyan controles estrictos de acceso, segmentación de la información, trazabilidad del uso de los datos y auditorías periódicas.¹⁷ El

cumplimiento de los marcos regulatorios nacionales e internacionales representa únicamente el punto de partida. Una protección efectiva de los donantes exige además el desarrollo de una cultura institucional sustentada en la transparencia, la comunicación clara de riesgos y beneficios, y el respeto continuo a la autonomía de las personas participantes.¹⁸

Hay biobancos cardiovasculares que han incorporado la IA para mejorar la predicción y el diagnóstico clínico. En Gran Bretaña, el *UK Biobank* ha permitido crear modelos que estiman riesgo cardiovascular, edad vascular y cardiopatías mediante datos masivos y aprendizaje automático. En España, el Centro Nacional de Investigaciones Cardiovasculares desarrolló el CARMINA, un sistema que analiza bases protegidas para investigación. Asimismo, repositorios clínicos como los de la *Mayo Clinic* han desarrollado algoritmos capaces de detectar disfunción ventricular a partir de electrocardiogramas. Estos avances muestran que la integración de grandes bases biológicas con IA impulsa la cardiología predictiva y fortalece la medicina personalizada en poblaciones amplias globales de forma sostenible.

Discusión

La utilización de la IA en los biobancos y en los bancos de tejidos cardiovasculares ha despertado un notable interés por su potencial para transformar la gestión de muestras biológicas, mejorar la toma de decisiones y dinamizar la generación de conocimiento científico.¹⁹ Este interés se fundamenta en la capacidad de los sistemas algorítmicos para integrar y analizar grandes volúmenes de datos complejos, procedentes de fuentes clínicas, moleculares y administrativas, lo que permite identificar relaciones y tendencias que exceden las posibilidades de los métodos analíticos convencionales. Sin embargo, este escenario de entusiasmo tecnológico también puede ocultar desafíos estructurales relevantes. La IA no opera de manera aislada: tiende a reproducir y amplificar las condiciones organizativas, técnicas y éticas de las instituciones en las que se implementa, lo que puede traducirse en errores operativos, vulnerabilidades en la seguridad de la información o decisiones influenciadas por sesgos preexistentes.²⁰

La adopción intensiva de herramientas digitales introduce nuevas formas de riesgo. Fallos técnicos, problemas de interoperabilidad o una calibración inadecuada de los modelos pueden afectar la calidad del tejido biológico y distorsionar los procesos de clasificación, priorización y uso de las muestras. Asimismo, existe la posibilidad de que la búsqueda de eficiencia tecnológica desplace principios éticos esenciales.²¹ El respeto a la autonomía de los donantes, la justicia en la retribución de recursos y la imparcialidad en el acceso a los beneficios de la investigación pueden verse

comprometidos cuando los sistemas algorítmicos se desarrollan sin una supervisión crítica y transparente.²²

Desde esta perspectiva, la integración de la IA debe orientarse a complementar el juicio humano y no a sustituirlo.²³ Los profesionales involucrados en la gestión de biobancos y bancos de tejidos cardiovasculares mantienen un rol insustituible en la elucidación, validación y contextualización de los resultados generados por los algoritmos. La innovación tecnológica pierde valor cuando se desvincula del discernimiento experto y de un marco ético claramente definido.^{24,25} En este sentido, la cooperación interdisciplinaria resulta fundamental. El desarrollo y uso responsable de la IA depende de la interacción continua entre especialistas en ingeniería, medicina, bioética, derecho y políticas públicas.²⁶ Solo mediante un diálogo sostenido entre estas disciplinas será posible construir sistemas que refuercen la calidad científica sin comprometer valores centrales de la práctica biomédica.²⁷

La implementación de la IA en los biobancos y bancos de tejidos cardiovasculares es una coyuntura estratégica para fortalecer la medicina de precisión y mejorar la administración de los recursos biomédicos. La capacidad de los algoritmos para analizar grandes volúmenes de datos, anticipar tendencias y respaldar decisiones clínicas puede mejorar la eficiencia operativa y acelerar la generación de conocimiento.^{28,29} Esta transformación tiene el potencial de elevar la calidad del tejido disponible, facilitar la estandarización de procesos y ampliar el alcance científico de estas instituciones. No obstante, dicho potencial solo se materializará plenamente si la adopción tecnológica se acompaña de un marco ético sólido y de una gobernanza de datos clara y transparente. La trazabilidad de los procesos algorítmicos, la supervisión independiente, la protección de la privacidad y la equidad en el uso de los datos deben asumirse como principios fundamentales.^{30,31}

La tecnología por sí sola no puede sustituir el juicio experto ni los valores que orientan la práctica biomédica.³² Si bien la IA permite analizar grandes volúmenes de datos, determinar modelos complejos y sustentar la toma de decisiones, al optimizar la eficiencia operativa y ampliar el impacto científico,³³ su uso responsable exige una metodología clara de rendición de cuentas. En este contexto, la trazabilidad algorítmica, la supervisión por instancias externas y la salvaguarda efectiva de la privacidad deben consolidarse como ejes centrales de cualquier estrategia de implementación.³⁴ El objetivo final no debe limitarse a la creación de biobancos tecnológicamente avanzados, sino orientarse a la construcción de biobancos éticamente inteligentes, en los que la innovación coexista con el respeto a los donantes, la equidad y el compromiso con la excelencia científica.

Conclusión

La incorporación de la IA en biobancos y bancos de tejidos cardiovasculares ofrece oportunidades significativas para optimizar procesos, analizar grandes volúmenes de información y potenciar el desarrollo científico, lo cual favorece el progreso de la medicina de precisión. No obstante, para que estos beneficios se concreten, es indispensable que su aplicación se acompañe de supervisión especializada, principios éticos firmes, transparencia en los algoritmos y

una gestión responsable de los datos. Solo al equilibrar la innovación tecnológica con el criterio humano y los valores biomédicos será posible maximizar su utilidad sin poner en riesgo la calidad, la justicia y la integridad científica.

Declaración de conflicto de interés: los autores han completado y enviado la forma traducida al español de la declaración de conflictos potenciales de interés del Comité Internacional de Editores de Revistas Médicas, y no fue reportado alguno relacionado con este artículo.

Referencias

1. Wang RS, Maron BA, Loscalzo J. Multiomics network medicine approaches to precision medicine and therapeutics in cardiovascular diseases. *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* 2023;43(4):493-503. doi: 10.1161/ATVBAHA.122.318731
2. Dorantes-Gilardi R, Ivey K, Costa L, et al. Quantifying the impact of biobanks and cohort studies. *arXiv.* 2024. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2407.01248>
3. Rivera-Silva G, Martínez-Fernández P, Papacristofilou-Riebeling B. Biobancos cardiovasculares. *Rev Med Inst Mex Seguro Soc.* 2020;58(4):508-10. doi: 10.24875/RMIMSS.M20000076
4. Singh M, Kumar A, Khanna NN, et al. Artificial intelligence for cardiovascular disease risk assessment in personalised framework: a scoping review. *EClinicalMedicine.* 2024;73:102660. doi: 10.1016/j.eclinm.2024.102660
5. Goel R. Artificial intelligence in medicine: its working, potentials and challenges. *Int J Adv Med.* 2022;10(1):108-16. doi: 10.18203/2349-3933.ijam20223412
6. Gupta MD, Kunal S, Girish MP, et al. Artificial intelligence in cardiology: the past, present and future. *Indian Heart J.* 2022;74(4):265-9. doi: 10.1016/j.ihj.2022.07.004
7. Dara M, Azarpira N. Ethical considerations emerge from artificial intelligence (AI) in biotechnology. *Avicenna J Med Biotechnol.* 2025;17(1):80-1. doi: 10.18502/ajmb.v17i1.17680
8. Caleyachetty R, Littlejohns T, Lacey B, et al. United Kingdom Biobank (UK Biobank): JACC Focus Seminar 6/8. *J Am Coll Cardiol.* 2021;78(1):56-65. doi: 10.1016/j.jacc.2021.03.342
9. Sriharan A, Kuhlmann E, Correia T, et al. Artificial intelligence in healthcare: balancing technological innovation with health and care workforce priorities. *Int J Health Plann Manage.* 2025;40(4):987-92. doi: 10.1002/hpm.3927
10. Meder B, Asselbergs FW, Ashley E. Artificial intelligence to improve cardiovascular population health. *Eur Heart J.* 2025;46(20):1907-16. doi: 10.1093/eurheartj/ehaf125
11. De Cremer D, Narayanan D. How AI tools can—and cannot—help organizations become more ethical. *Front Artif Intell.* 2023;6:1093712. doi: 10.3389/frai.2023.1093712
12. Komura D, Ochi M, Ishikawa S. Machine learning methods for histopathological image analysis: updates in 2024. *Comput Struct Biotechnol J.* 2024;27:383-400. doi: 10.1016/j.csbj.2024.01.021
13. Pesecan CM, Stoicu-Tivadar L. Explaining deep learning models applied in histopathology: current developments and the path to sustainability. *Stud Health Technol Inform.* 2024;316:1003-7. doi: 10.3233/SHTI240579
14. Birhane A. Algorithmic injustice: a relational ethics approach. *Patterns (N Y).* 2021;2(2):100205. doi: 10.1016/j.patter.2021.100205
15. Cadigan RJ, Ponsaran R, Rich C, et al. Supporting stewardship: funding, utilization, and sustainability as ethical concerns in networked biobanking. *AJOB Empir Bioeth.* 2025;16(1):42-51. doi: 10.1080/23294515.2024.2399533
16. Teare HJA, Pictor M, Kaye J. Reflections on dynamic consent in biomedical research: the story so far. *Eur J Hum Genet.* 2021;29:649-56. doi: 10.1038/s41431-020-00771-z
17. Rahimzadeh V, Knoppers BM, Bartlett G. Ethical, legal, and social issues of responsible data sharing involving children in genomics: a systematic review. *AJOB Empir Bioeth.* 2020;11(4):233-45. doi: 10.1080/23294515.2020.1818875
18. VandeVusse A, Mueller J, Karcher S. Qualitative data sharing: participant understanding, motivation, and consent. *Qual Health Res.* 2022;32(1):182-91. doi: 10.1177/10497323211054058
19. European Union. EU Artificial Intelligence Act [Internet]. Brussels: European Union. Disponible en: <https://artificialintelligenceact.eu/>
20. Bengio Y, LeCun Y, Hinton GE. Deep learning for AI. *Commun ACM.* 2021;64(7):58-65. doi: 10.1145/3448250
21. Acosta JN, Falcone GJ, Rajpurkar P, et al. Multimodal biomedical AI. *Nat Med.* 2022;28(9):1773-84. doi: 10.1038/s41591-022-01981-2
22. Domaradzki J, Czekańska J, Walkowiak D. To donate or not to donate? Future healthcare professionals' opinions on biobanking of human biological material for research purposes. *BMC Med Ethics.* 2023;24(1):53. doi: 10.1186/s12910-023-00930-z
23. Clayton EW, Rose S, Nebecker C, et al. Biomedical data repositories require governance for artificial intelligence/machine learning applications at every step. *JAMIA Open.* 2025;8(6):oaf134. doi: 10.1093/jamiaopen/oaf134
24. Karako K, Tang W. Applications of and issues with machine learning in medicine: bridging the gap with explainable AI. *Biosci Trends.* 2025;18(6):497-504. doi: 10.5582/bst.2024.01342
25. Vandemeulebroucke T. The ethics of artificial intelligence systems in healthcare and medicine: from a local to a global perspective, and back. *Pflugers Arch.* 2025;477(4):591-601. doi: 10.1007/s00424-024-02984-3
26. Bagherpour R, Bagherpour G, Mohammadi P. Application of artificial intelligence in tissue engineering. *Tissue Eng Part B Rev.* 2025;31(1):31-43. doi: 10.1089/ten.TEB.2024.0022
27. Aouedi O, Sacco A, Piamrat K, et al. Handling privacy-sensitive medical data with federated learning: challenges and future directions. *IEEE J Biomed Health Inform.* 2023;27(2):790-803. doi: 10.1109/JBHI.2022.3185673
28. Ubong D, Stewart L, Sepai O, et al. Application of human bio-

- monitoring data to support policy development and environmental public health protection within the HBM4EU project. *Int J Hyg Environ Health*. 2023;251:114170. doi: 10.1016/j.ijheh.2023.114170
29. Khomtchouk BB. Cardioinformatics advancements in healthcare and biotechnology. *Circ Genom Precis Med*. 2023;16(3): 283-5. doi: 10.1161/CIRCGEN.123.004119
 30. Dhade P, Shirke P. Federated learning for healthcare: a comprehensive review. *Eng Proc*. 2023;59(1):230. doi: 10.3390/engproc2023059230
 31. Molnár-Gábor F. Schutz der Rechte und Freiheiten von Personen bei der Datenverarbeitung im Gesundheitsbereich: der Risikoansatz der EU-Datenschutz-Grundverordnung. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*. 2023;66(2):143-53. doi: 10.1007/s00103-022-03652-6.
 32. Harnett JD. Research Ethics for Clinical Researchers. *Methods Mol Biol*. 2021;2249:53-64. doi: 10.1007/978-1-0716-1138-8_4
 33. Ye J, Woods D, Jordan N, et al. The role of artificial intelligence for the application of integrating electronic health records and patient-generated data in clinical decision support. *AMIA Jt Summits Transl Sci Proc*. 2024:459-67.
 34. Plass M, Wittner R, Holub P, et al. Provenance of specimen and data - A prerequisite for AI development in computational pathology. *N Biotechnol*. 2023;78:22-28. doi: 10.1016/j.nbt.2023.09.006