



Gêmeos digitais na cirurgia personalizada

Digital Twins in Personalized Surgery

Gemelos digitais en la cirugía personalizada



<https://doi.org/10.5281/zenodo.21348545>

Georggio Stephan Sgorla

Medicina

Universidade Anhanguera-UNIDERP, Brasil

e-mail: gsgorla@hotmail.com

Hesdra Ferreira Lima

Médico

Universidade Federal do Tocantins, Brasil

e-mail: esdrasferreira0010@gmail.com

- **Tipo de Estudo:** Revisão de Literatura
- **Recebido:** 19/05/2026
- **Aceito:** 28/06/2026
- **Publicado:** 13/07/2026



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), and a [LOCKSS](#) system.

RESUMO

Os gêmeos digitais (*digital twins*) representam uma inovação tecnológica com potencial para transformar a cirurgia personalizada ao integrar dados anatômicos, fisiológicos e clínicos em modelos virtuais dinâmicos capazes de simular cenários cirúrgicos individualizados. O objetivo desta revisão foi analisar as evidências científicas sobre as aplicações, benefícios, limitações e perspectivas dos gêmeos digitais na cirurgia personalizada. Trata-se de uma revisão integrativa da literatura. As buscas foram realizadas nas bases PubMed/MEDLINE, Scopus e Web of Science, utilizando descritores relacionados a gêmeos digitais e cirurgia. Foram identificados 18 estudos, dos quais seis atenderam aos critérios de elegibilidade e compuseram a amostra final. Os estudos demonstraram que os gêmeos digitais apresentam aplicações no planejamento pré-operatório, suporte intraoperatório, monitoramento pós-operatório, treinamento cirúrgico e medicina de precisão. Entre os principais benefícios destacam-se maior precisão cirúrgica, personalização das intervenções, redução de complicações e apoio à tomada de decisão clínica. Entretanto, desafios relacionados à validação clínica, padronização, interoperabilidade, custos, segurança dos dados e aspectos éticos ainda limitam sua implementação em larga escala. Conclui-se que os gêmeos digitais possuem elevado potencial para transformar a prática cirúrgica, embora sejam necessários estudos clínicos robustos e avanços tecnológicos para consolidar sua incorporação aos serviços de saúde.

Palavras-chave: Gêmeos digitais; Cirurgia personalizada; Medicina de precisão; Inteligência artificial; Planejamento cirúrgico.

ABSTRACT

Digital twins represent a technological innovation with the potential to transform personalized surgery by integrating anatomical, physiological, and clinical data into dynamic virtual models capable of simulating individualized surgical scenarios. This review aimed to analyze the scientific evidence regarding the applications, benefits, limitations, and future perspectives of digital twins in personalized surgery. An integrative literature review was conducted according to the PRISMA 2020 guidelines. Searches were performed in PubMed/MEDLINE, Scopus, and Web of Science using descriptors related to digital twins and surgery. Eighteen studies were identified, of which six met the eligibility criteria and were included in the final analysis. The selected studies demonstrated that digital twins can be applied to preoperative planning, intraoperative guidance, postoperative monitoring, surgical training, and precision medicine. The main reported benefits include improved surgical accuracy, personalized interventions, reduced complications, and enhanced clinical decision-making. However, challenges related to clinical validation, standardization, interoperability, implementation costs, data security, and ethical issues still limit their widespread adoption. Digital twins have considerable potential to reshape surgical practice, although robust clinical studies and further technological advances are required before their routine implementation in healthcare systems.

Keywords: Digital twins; Personalized surgery; Precision medicine; Artificial intelligence; Surgical planning.

RESUMEN

Los gemelos digitales (digital twins) representan una innovación tecnológica con potencial para transformar la cirugía personalizada mediante la integración de datos anatómicos, fisiológicos y clínicos en modelos virtuales dinámicos capaces de simular escenarios quirúrgicos individualizados. El objetivo de esta revisión fue analizar la evidencia científica sobre las aplicaciones, beneficios, limitaciones y perspectivas de los gemelos digitales en la cirugía personalizada. Se realizó una revisión integradora de la literatura siguiendo las recomendaciones PRISMA 2020. La búsqueda se llevó a cabo en las bases de datos PubMed/MEDLINE, Scopus y Web of Science utilizando descriptores relacionados con gemelos digitales y cirugía. Se identificaron 18 estudios, de los cuales seis cumplieron los criterios de elegibilidad y fueron incluidos en la revisión. Los estudios demostraron que los gemelos digitales tienen aplicaciones en la planificación preoperatoria, el apoyo intraoperatorio, el seguimiento postoperatorio, el entrenamiento quirúrgico y la medicina de precisión. Entre los principales beneficios destacan el aumento de la precisión quirúrgica, la personalización de las intervenciones, la reducción de complicaciones y el apoyo a la toma de decisiones clínicas. Sin embargo, los desafíos relacionados con la validación clínica, la estandarización, la interoperabilidad, los costos de implementación, la seguridad de los datos y los aspectos éticos aún limitan su adopción generalizada. Se concluye que los gemelos digitales poseen un gran potencial para transformar la práctica quirúrgica, aunque se requieren estudios clínicos robustos y mayores avances tecnológicos para consolidar su incorporación en los sistemas de salud.

Palabras clave: *Gemelos digitales; Cirugía personalizada; Medicina de precisión; Inteligencia artificial; Planificación quirúrgica.*

1. INTRODUÇÃO

A transformação digital da medicina tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de tornar o cuidado em saúde cada vez mais preciso, personalizado e preditivo. Nesse contexto, os gêmeos digitais (*digital twins*) surgem como uma das mais promissoras inovações aplicadas à medicina de precisão e à cirurgia personalizada. Originalmente desenvolvidos na engenharia para monitorar e simular o comportamento de sistemas físicos em tempo real, os gêmeos digitais consistem em representações virtuais dinâmicas de um objeto, processo ou indivíduo, continuamente atualizadas por dados provenientes de exames de imagem, sensores, dispositivos vestíveis, registros eletrônicos de saúde e algoritmos de inteligência artificial. Essa integração permite reproduzir o estado fisiológico e anatómico do paciente com elevado grau de fidelidade, favorecendo a tomada de decisão clínica baseada em dados individualizados¹.

Na cirurgia, a adoção dessa tecnologia representa uma mudança significativa em relação aos modelos tradicionais de planejamento operatório. Historicamente, as decisões cirúrgicas foram fundamentadas na experiência do cirurgião, em protocolos clínicos e em exames diagnósticos estáticos.

Entretanto, a crescente complexidade dos procedimentos, associada à variabilidade anatômica e fisiológica entre os pacientes, evidencia a necessidade de ferramentas capazes de prever cenários clínicos e otimizar estratégias terapêuticas. Os gêmeos digitais possibilitam a simulação de diferentes abordagens cirúrgicas antes da intervenção, permitindo avaliar riscos, antecipar complicações e selecionar a estratégia mais adequada para cada paciente².

Os avanços recentes em inteligência artificial, aprendizado de máquina (*machine learning*), aprendizado profundo (*deep learning*), computação de alto desempenho, internet das coisas (*Internet of Things* – IoT), impressão tridimensional e realidade aumentada têm acelerado a implementação dos gêmeos digitais na prática médica. A combinação dessas tecnologias permite integrar informações anatômicas, funcionais, laboratoriais e genômicas em um único modelo computacional, capaz de evoluir continuamente conforme novos dados clínicos são incorporados. Dessa forma, torna-se possível não apenas planejar procedimentos cirúrgicos com maior precisão, mas também monitorar a evolução do paciente no período perioperatório e prever desfechos clínicos individualizados³.

Diversos estudos recentes têm demonstrado aplicações promissoras dos gêmeos digitais em diferentes áreas da cirurgia, incluindo cirurgia hepatobiliar, colorretal, cardiovascular, torácica, neurocirurgia, ortopedia e transplantes. Entre os principais benefícios descritos destacam-se a melhora do planejamento pré-operatório, redução do tempo cirúrgico, otimização da preservação de estruturas anatômicas nobres, diminuição da incidência de complicações, aprimoramento do treinamento cirúrgico e fortalecimento da medicina personalizada. Além disso, a integração com sistemas robóticos e plataformas de navegação cirúrgica amplia as possibilidades de monitoramento intraoperatório em tempo real, favorecendo intervenções mais seguras e precisas⁴.

Apesar do elevado potencial dessa tecnologia, importantes desafios ainda limitam sua ampla implementação na prática clínica. Questões relacionadas à padronização dos modelos computacionais, interoperabilidade entre sistemas de informação, qualidade dos dados utilizados para construção dos gêmeos digitais, custos de infraestrutura, validação clínica, segurança cibernética, proteção de dados e aspectos éticos permanecem como obstáculos relevantes⁵.

Diante desse cenário, esta revisão de literatura tem como objetivo analisar as evidências científicas atuais sobre a utilização dos gêmeos digitais na cirurgia personalizada, abordando seus fundamentos tecnológicos, principais aplicações clínicas, benefícios, limitações e perspectivas futuras,

bem como seu potencial para transformar o planejamento cirúrgico, a tomada de decisão e os resultados clínicos na era da medicina de precisão.

2. METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, conduzida e descrita de acordo com as recomendações do Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020), com o objetivo de identificar e sintetizar as evidências científicas acerca da aplicação dos gêmeos digitais (*digital twins*) na cirurgia personalizada.

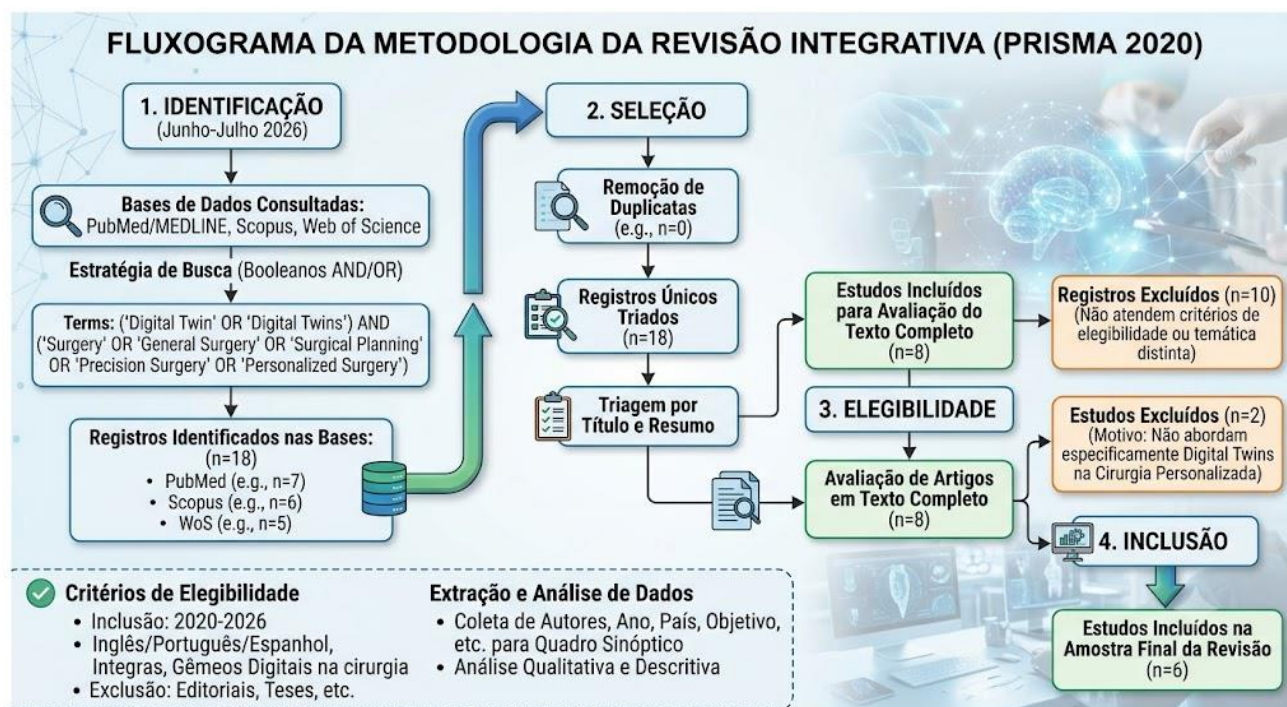
A questão norteadora da pesquisa foi elaborada com base na estratégia PICO (População, Interesse e Contexto), sendo definida da seguinte forma: quais são as aplicações, benefícios, limitações e perspectivas dos gêmeos digitais na cirurgia personalizada?

A busca bibliográfica foi realizada entre os meses de junho e julho de 2026, nas bases de dados PubMed/MEDLINE, Scopus e Web of Science, utilizando descritores controlados dos *Medical Subject Headings* (MeSH) e palavras-chave relacionadas ao tema. A estratégia de busca combinou os termos: ("Digital Twin" OR "Digital Twins") AND ("Surgery" OR "General Surgery" OR "Surgical Planning" OR "Precision Surgery" OR "Personalized Surgery"), empregando os operadores booleanos AND e OR.

Foram incluídos artigos científicos publicados em inglês, português ou espanhol, disponíveis na íntegra, que abordassem a utilização de gêmeos digitais na prática cirúrgica, planejamento operatório, simulação cirúrgica ou medicina de precisão. Foram considerados estudos originais, revisões sistemáticas e revisões narrativas publicados entre 2020 e 2026. Foram excluídos editoriais, cartas ao editor, resumos de congressos, capítulos de livros, dissertações, teses, duplicatas e estudos que não apresentassem relação direta com o objetivo desta revisão.

O processo de seleção dos estudos seguiu as etapas preconizadas pelo fluxograma PRISMA. Inicialmente, a estratégia de busca identificou 18 artigos. Após a leitura dos títulos e resumos, foram excluídos 10 estudos por não atenderem aos critérios de elegibilidade ou por apresentarem abordagem distinta da temática proposta. Os 8 artigos restantes foram submetidos à leitura completa, sendo 2 estudos excluídos por não abordarem especificamente a aplicação dos gêmeos digitais na cirurgia personalizada. Dessa forma, 6 artigos preencheram todos os critérios de inclusão e foram selecionados para compor a amostra final desta revisão (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma do processo de seleção dos estudos.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos seis estudos incluídos evidenciou que a aplicação dos gêmeos digitais na cirurgia personalizada constitui uma área emergente da medicina de precisão, com crescimento significativo das publicações em 2025 e 2026. Todos os artigos convergem ao reconhecer que os gêmeos digitais representam modelos virtuais dinâmicos capazes de integrar informações anatômicas, fisiológicas e clínicas do paciente, permitindo simulações individualizadas que apoiam o planejamento cirúrgico, a tomada de decisão clínica e o monitoramento perioperatório (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização dos estudos incluídos na revisão, segundo autor, ano de publicação, objetivo, principais achados e conclusão.

Autor	Ano	Objetivo	Principais achados	Conclusão
Asciak <i>et al.</i> ²	2025	Apresentar o conceito de <i>Digital Twin-Assisted Surgery</i> e discutir suas oportunidades e desafios para aplicação clínica.	Os gêmeos digitais permitem a reprodução virtual do paciente, possibilitando planejamento cirúrgico personalizado, atualização em tempo real durante o procedimento e maior suporte à tomada de decisão. Foram identificados desafios relacionados à integração de dados, validação clínica e regulamentação.	A cirurgia assistida por gêmeos digitais possui potencial para aumentar a precisão cirúrgica e melhorar os desfechos clínicos, porém depende de avanços tecnológicos e validação clínica antes de sua implementação rotineira.
Chilaka <i>et al.</i> ⁶	2025	Discutir o papel dos gêmeos digitais na cirurgia personalizada e sua contribuição para o planejamento, execução e monitoramento cirúrgico.	Os autores destacam aplicações no planejamento pré-operatório, orientação intraoperatória, monitoramento pós-operatório e treinamento cirúrgico. Também enfatizam barreiras como privacidade de dados, alto custo computacional e ausência de protocolos padronizados.	Os gêmeos digitais representam uma tecnologia promissora para democratizar a cirurgia de precisão, embora estudos clínicos e padronização metodológica ainda sejam necessários.
Mekki <i>et al.</i> ⁷	2025	Revisar as aplicações dos gêmeos digitais ao longo de todo o cuidado perioperatório.	Os gêmeos digitais mostraram potencial para otimizar treinamento cirúrgico, planejamento operatório, monitoramento pós-operatório e reabilitação personalizada.	A integração dos gêmeos digitais poderá transformar a cirurgia personalizada, desde que sejam superados desafios relacionados à interoperabilidade, validação clínica e regulamentação.
Silva e Vale ⁸	2025	Avaliar a maturidade científica dos gêmeos	Os autores destacam a integração entre dados	A implementação responsável dos

		digitais na medicina personalizada e propor estratégias para sua implementação clínica.	genômicos, exames de imagem, sensores e registros eletrônicos para construção de modelos preditivos individualizados.	gêmeos digitais exige validação contínua dos modelos, desenvolvimento interdisciplinar e regulamentação adequada para consolidar sua utilização clínica.
David-Olawade <i>et al.</i> ⁹	2026	Revisar as aplicações dos gêmeos digitais na prática cirúrgica e avaliar o estágio atual de desenvolvimento da tecnologia.	Foram identificadas aplicações em cirurgia cardiovascular, ortopédica, neurológica e oncológica, principalmente para planejamento pré-operatório, navegação intraoperatória, treinamento e monitoramento pós-operatório.	Apesar dos resultados promissores, ainda são necessários protocolos padronizados, estudos clínicos robustos e validação multicêntrica para consolidar o uso dos gêmeos digitais na cirurgia.
Vallée ¹⁰	2026	Discutir os gêmeos digitais multiescala na medicina personalizada e suas aplicações clínicas futuras.	O estudo propõe a integração de dados moleculares, celulares, anatômicos, clínicos, ambientais e comportamentais utilizando inteligência artificial, aprendizado profundo e inferência causal. Destaca desafios relacionados à integração de dados, vieses algorítmicos e governança ética.	Os gêmeos digitais multiescala representam uma das principais tecnologias da medicina de precisão, com potencial para transformar o planejamento terapêutico individualizado, incluindo aplicações cirúrgicas.

Os estudos de Asciak *et al.* (2025) e Chilaka *et al.* (2025) destacam que a principal contribuição dos gêmeos digitais consiste na personalização do planejamento cirúrgico. A possibilidade de construir modelos tridimensionais específicos para cada paciente permite simular diferentes estratégias operatórias antes do procedimento, favorecendo a identificação de estruturas anatômicas críticas, a previsão de dificuldades técnicas e a redução do risco de complicações intraoperatórias. Essa



abordagem representa uma evolução em relação ao planejamento convencional baseado exclusivamente em exames estáticos de imagem, aproximando a prática cirúrgica dos princípios da medicina personalizada.

Outro aspecto recorrente refere-se ao suporte intraoperatório proporcionado pelos gêmeos digitais. Segundo David-Olawade *et al.* (2026), a integração de dados em tempo real provenientes de sistemas de navegação, inteligência artificial e realidade aumentada pode auxiliar o cirurgião durante procedimentos complexos, aumentando a precisão das intervenções e reduzindo a variabilidade técnica. Além disso, a associação com plataformas robóticas amplia as possibilidades de monitoramento contínuo e adaptação dinâmica do procedimento conforme alterações fisiológicas observadas durante a cirurgia.

No contexto do cuidado perioperatório, Mekki *et al.* (2025) demonstraram que os gêmeos digitais possuem potencial para acompanhar todas as fases do tratamento cirúrgico, desde o treinamento da equipe até a reabilitação pós-operatória.

Os autores destacam que modelos digitais personalizados podem prever complicações, monitorar a recuperação funcional e orientar intervenções individualizadas, contribuindo para melhores desfechos clínicos e maior segurança do paciente. Essa visão amplia o papel dos gêmeos digitais para além do ato operatório, consolidando-os como ferramentas de suporte ao cuidado cirúrgico contínuo.

A integração entre inteligência artificial e grandes bases de dados foi amplamente discutida por Silva e Vale (2025) e Vallée (2026). Esses estudos ressaltam que a construção de gêmeos digitais depende da combinação de informações provenientes de exames de imagem, dados genômicos, registros eletrônicos de saúde, dispositivos vestíveis e sensores biomédicos.

A utilização de algoritmos de aprendizado de máquina, aprendizado profundo e inferência causal possibilita o desenvolvimento de modelos capazes de prever a evolução clínica do paciente e fornecer suporte à tomada de decisão baseada em evidências individualizadas. Essa integração reforça o conceito de cirurgia preditiva e adaptativa, considerado um dos principais pilares da medicina de precisão.

Apesar do elevado potencial da tecnologia, todos os estudos reconhecem que sua implementação clínica ainda enfrenta importantes limitações. Entre as principais barreiras destacam-se a necessidade de validação clínica em estudos prospectivos, ausência de protocolos padronizados,

interoperabilidade limitada entre sistemas hospitalares, elevado custo computacional, escassez de infraestrutura tecnológica e desafios relacionados à privacidade, segurança e governança dos dados. Além disso, questões éticas envolvendo transparência algorítmica, vieses dos modelos preditivos e responsabilidade clínica permanecem como obstáculos relevantes para sua adoção em larga escala.

Em conjunto, os estudos analisados demonstram que os gêmeos digitais possuem potencial para transformar profundamente a cirurgia personalizada, permitindo planejamento pré-operatório mais preciso, suporte intraoperatório em tempo real, monitoramento pós-operatório individualizado e treinamento cirúrgico baseado em simulações altamente realistas.

As evidências disponíveis ainda são predominantemente provenientes de estudos conceituais, revisões e aplicações em fase experimental, evidenciando a necessidade de ensaios clínicos multicêntricos que confirmem sua eficácia, segurança, custo-efetividade e impacto sobre os desfechos clínicos antes de sua incorporação rotineira aos serviços de saúde. Essa constatação reforça que, embora os gêmeos digitais representem uma das tecnologias mais promissoras da cirurgia contemporânea, sua consolidação dependerá do avanço simultâneo das áreas de inteligência artificial, engenharia biomédica, ciência de dados e regulamentação em saúde.

Além das aplicações clínicas já descritas, observa-se que os gêmeos digitais representam uma mudança de paradigma na forma como o processo cirúrgico é planejado e executado. Diferentemente dos modelos convencionais, essa tecnologia permite uma abordagem dinâmica, na qual o modelo virtual acompanha continuamente as alterações do paciente, possibilitando ajustes individualizados antes, durante e após o procedimento. Essa característica amplia a capacidade preditiva do planejamento cirúrgico e favorece uma tomada de decisão baseada em informações continuamente atualizadas¹¹.

Outro aspecto relevante consiste na possibilidade de integração dos gêmeos digitais com outras tecnologias emergentes da saúde digital, como realidade aumentada, realidade virtual, impressão tridimensional, robótica e sistemas avançados de navegação cirúrgica. Essa convergência tecnológica tende a tornar os procedimentos cada vez mais precisos, permitindo melhor visualização das estruturas anatômicas, maior preservação de tecidos saudáveis e redução de lesões inadvertidas. Como consequência, espera-se diminuição das complicações perioperatórias, menor tempo cirúrgico, redução da permanência hospitalar e recuperação funcional mais rápida dos pacientes¹².



A incorporação de modelos preditivos também poderá modificar significativamente o acompanhamento pós-operatório. Ao integrar informações clínicas, laboratoriais e fisiológicas em tempo real, os gêmeos digitais poderão identificar precocemente alterações sugestivas de complicações, permitindo intervenções antes da manifestação clínica dos eventos adversos. Essa capacidade de monitoramento contínuo reforça o conceito de medicina preventiva e personalizada, possibilitando um seguimento individualizado e potencialmente reduzindo taxas de reinternação e mortalidade¹³.

Entretanto, para que essa tecnologia seja incorporada de forma segura à prática clínica, torna-se indispensável estabelecer critérios rigorosos de validação dos modelos computacionais. A confiabilidade das simulações depende diretamente da qualidade, diversidade e atualização dos dados utilizados para alimentar os algoritmos, bem como da capacidade desses sistemas em reproduzir fielmente as condições biológicas de cada indivíduo. Dessa forma, estudos multicêntricos com populações heterogêneas serão fundamentais para aumentar a robustez dos modelos e garantir sua aplicabilidade em diferentes contextos clínicos¹⁴.

Outro desafio importante refere-se à necessidade de padronização internacional para construção, validação e utilização dos gêmeos digitais. A ausência de protocolos uniformes dificulta a comparação entre estudos e limita a reprodutibilidade dos resultados. O desenvolvimento de diretrizes específicas para aquisição, processamento, integração e atualização dos dados poderá favorecer a interoperabilidade entre diferentes plataformas e acelerar a incorporação dessa tecnologia nos sistemas de saúde¹⁵.

Sob a perspectiva ética, a utilização de grandes volumes de dados clínicos para construção dos modelos digitais exige atenção especial quanto à privacidade, confidencialidade e segurança das informações dos pacientes. Além disso, torna-se necessário garantir transparência na tomada de decisão apoiada por algoritmos de inteligência artificial, preservando o papel do cirurgião como responsável final pelas condutas adotadas. Nesse sentido, os gêmeos digitais devem ser compreendidos como ferramentas de apoio à decisão clínica, e não como substitutos da experiência profissional e do julgamento médico¹⁶.

Dessa forma, embora a tecnologia ainda se encontre em processo de consolidação, sua evolução indica que os gêmeos digitais poderão desempenhar papel central na cirurgia personalizada nas próximas décadas. O avanço simultâneo da inteligência artificial, da ciência de dados, da engenharia



biomédica e das tecnologias de imagem tende a ampliar a precisão dos modelos virtuais, favorecendo uma prática cirúrgica mais segura, eficiente e centrada nas características individuais de cada paciente. A consolidação desse cenário dependerá da integração entre pesquisa científica, inovação tecnológica e validação clínica, permitindo que os benefícios observados em estudos experimentais sejam efetivamente transferidos para a prática assistencial.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos analisados nesta revisão evidenciam que os gêmeos digitais representam uma das tecnologias mais promissoras para a consolidação da cirurgia personalizada, permitindo a integração de informações clínicas, anatômicas, fisiológicas e funcionais em modelos virtuais capazes de apoiar o planejamento, a execução e o acompanhamento dos procedimentos cirúrgicos. A utilização dessa tecnologia demonstra potencial para aumentar a precisão das intervenções, otimizar a tomada de decisão, reduzir complicações perioperatórias e favorecer estratégias terapêuticas individualizadas, contribuindo para melhores desfechos clínicos e maior segurança do paciente.

Entretanto, apesar dos avanços observados, a aplicação dos gêmeos digitais na prática cirúrgica ainda se encontra em fase inicial de desenvolvimento. Persistem desafios relacionados à padronização dos modelos computacionais, interoperabilidade entre sistemas, qualidade e integração dos dados, validação clínica, aspectos éticos, proteção da privacidade e regulamentação.

Dessa forma, a consolidação dos gêmeos digitais como ferramenta de rotina na cirurgia dependerá do fortalecimento da pesquisa translacional, da colaboração interdisciplinar entre profissionais da saúde, engenharia, ciência de dados e tecnologia da informação, bem como do desenvolvimento de marcos regulatórios que garantam segurança, confiabilidade e uso ético da tecnologia.



REFERÊNCIAS

1. Mekki YM, Luijten G, Hagert E, Belkhair S, Varghese C, Qadir J, et al. Digital twins for the era of personalized surgery. *NPJ Digit Med*. 2025;8(1):283. doi:10.1038/s41746-025-01575-5.
2. Asciak L, Kyeremeh J, Luo X, Borg M, et al. Digital twin assisted surgery: concept, opportunities, and challenges. *NPJ Digit Med*. 2025;8:32. doi:10.1038/s41746-024-01413-0.
3. Vallée A. Multi-scale digital twins for personalized medicine. *Front Digit Health*. 2026;8:1753906. doi:10.3389/fdgth.2026.1753906.
4. David-Olawade AC, Abdi AM, Amusa AO, Daniel RIA, Olasilola OR, Olawuyi OF. Digital twin technology in surgery: a narrative review of applications, evidence, and implementation challenges. *Laparosc Endosc Robot Surg*. 2026. doi:10.1016/j.lers.2026.03.001.
5. Silva A, Vale N. Digital twins in personalized medicine: bridging innovation and clinical reality. *J Pers Med*. 2025;15(11):503. doi:10.3390/jpm15110503.
6. Chilaka CF, Riaz H, Kashif M, Ejaz M, Riaz MS. Digital twins: pioneering personalized precision in modern surgery. *Ann Med Surg (Lond)*. 2025;87(11):7805-7806. doi:10.1097/MS9.0000000000003881.
7. Mekki YM, Luijten G, Hagert E, Belkhair S, Varghese C, Qadir J, Solaiman B, Bilal M, Dhanda J, Egger J, Deng J, Khanduja V, Frangi AF, Zughaier SM, Stotland MA. Digital twins for the era of personalized surgery. *NPJ Digit Med*. 2025;8(1):283. doi:10.1038/s41746-025-01575-5.
8. Silva A, Vale N. Digital Twins in Personalized Medicine: Bridging Innovation and Clinical Reality. *J Pers Med*. 2025;15(11):503. doi:10.3390/jpm15110503.
9. David-Olawade AC, Abdi AM, Amusa AO, Daniel RIA, Olasilola OR, Olawuyi OF. Digital twin technology in surgery: a narrative review of applications, evidence, and implementation challenges. *Laparosc Endosc Robot Surg*. 2026. doi:10.1016/j.lers.2026.03.001.
10. Vallée A. Multi-scale digital twins for personalized medicine. *Front Digit Health*. 2026;8:1753906. doi:10.3389/fdgth.2026.1753906.
11. Mekki YM, Luijten G, Hagert E, Belkhair S, Varghese C, Qadir J, Solaiman B, Bilal M, Dhanda J, Egger J, Deng J, Khanduja V, Frangi AF, Zughaier SM, Stotland MA. Digital twins for the era of personalized surgery. *NPJ Digit Med*. 2025;8(1):283. doi:10.1038/s41746-025-01575-5.
12. David-Olawade AC, Abdi AM, Amusa AO, Daniel RIA, Olasilola OR, Olawuyi OF. Digital twin technology in surgery: a narrative review of applications, evidence, and implementation challenges. *Laparosc Endosc Robot Surg*. 2026. doi:10.1016/j.lers.2026.03.001.
13. Chilaka CF, Riaz H, Kashif M, Ejaz M, Riaz MS. Digital twins: pioneering personalized precision in modern surgery. *Ann Med Surg (Lond)*. 2025;87(11):7805-7806. doi:10.1097/MS9.0000000000003881.
14. Vallée A. Multi-scale digital twins for personalized medicine. *Front Digit Health*. 2026;8:1753906. doi:10.3389/fdgth.2026.1753906.
15. Silva A, Vale N. Digital Twins in Personalized Medicine: Bridging Innovation and Clinical Reality. *J Pers Med*. 2025;15(11):503. doi:10.3390/jpm15110503.
16. Asciak L, Kyeremeh J, Luo X, Borg M, et al. Digital twin assisted surgery: concept, opportunities, and challenges. *NPJ Digit Med*. 2025;8:32. doi:10.1038/s41746-024-01413-0.