

Edição IV

Clínica Médica & Cirurgia

Capítulo 20

PREDIÇÃO DE COMPLICAÇÕES PÓS-OPERATÓRIAS: FERRAMENTAS DE ESTRATIFICAÇÃO E APLICAÇÕES CLÍNICAS

JÚLIA FERREIRA ROCHA¹
BRUNO PELLOZO CERQUEIRA¹
ANDRE KIYOSHI MIYAHARA¹
PEDRO HENRIQUE MORETTI PEPATO¹

¹Discente. Escola Paulista de Medicina. Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP).

Palavras-chave: Complicações Pós-operatórias; Avaliação do Risco; Cuidados Perioperatórios.

INTRODUÇÃO

A evolução da medicina cirúrgica nas últimas décadas é inegável, os avanços em técnicas minimamente invasivas, o refinamento anestésico e a otimização de cuidados intensivos permitiram que procedimentos de alta complexidade antes considerados proibitivos se tornassem alternativas viáveis na prática clínica, estendendo a indicação cirúrgica a populações com múltiplas comorbidades e maior risco cirúrgico (GROCOTT *et al.*, 2019).

No entanto, o aumento na complexidade dos pacientes e dos procedimentos trouxe consigo um desafio persistente e de grande magnitude: as complicações pós-operatórias (NEPOGODIEV *et al.*, 2019).

Globalmente, estima-se que mais de 300 milhões de cirurgias de grande porte sejam realizadas anualmente (WEISER *et al.*, 2015).

Desse total, uma parcela significativa de pacientes enfrentará algum tipo de evento adverso no período pós-operatório (NEPOGODIEV *et al.*, 2019).

As complicações cirúrgicas, que englobam desde infecções do sítio cirúrgico até disfunções orgânicas e eventos cardiovasculares graves, como o infarto agudo do miocárdio perioperatório, não são apenas estatísticas clínicas isoladas, mas sim representam um impacto profundo na morbimortalidade global, diminuem drasticamente a qualidade de vida a longo prazo dos indivíduos acometidos e impõem um fardo financeiro colossal aos sistemas de saúde, tanto públicos quanto privados (GROCOTT *et al.*, 2019; NEPOGODIEV *et al.*, 2019).

Historicamente, a abordagem médica diante dessas intercorrências baseou-se em um modelo reativo: após o ato operatório, o paciente era monitorado de forma convencional e, caso uma complicação se manifestasse, a equipe intervinha para tratá-la. Essa estratégia pode ter reso-

lutividade parcial, mostrando-se insuficiente diante das demandas contemporâneas.

A medicina perioperatória moderna visa transitar do modelo puramente reativo para um modelo proativo e preventivo, focado na antecipação do risco (GROCOTT *et al.*, 2019).

Nesse cenário, a estratificação de risco perioperatório surge como a pedra angular do cuidado cirúrgico seguro. Estratificar o risco não significa apenas prever o pior cenário, mas sim decifrar a complexa interação entre a reserva fisiológica do paciente e a agressão biológica representada pelo trauma cirúrgico (DESBOROUGH, 2000; SANKAR; BEATTIE; WIJEYSUNDERA, 2015).

Ao identificar com precisão quais pacientes apresentam maior vulnerabilidade a desfechos desfavoráveis, a equipe multidisciplinar ganha a oportunidade de intervir precocemente.

Isso viabiliza a otimização de condições clínicas antes da incisão na pele, a personalização do manejo anestésico e hemodinâmico no intraoperatório e o planejamento logístico adequado, como a reserva preventiva de leitos de terapia intensiva (MCISAAC *et al.*, 2022).

Atualmente, o arsenal disponível para essa avaliação está em rápida transição. Se por um lado ainda dependemos fortemente de índices prognósticos clássicos e de aplicação rápida à beira do leito, por outro, testemunhamos a ascensão de novas ferramentas biológicas e tecnológicas (NENADIC *et al.*, 2026).

O refinamento de biomarcadores cardíacos e inflamatórios, somado à integração de algoritmos de inteligência artificial baseados em grandes volumes de dados (*big data*), promete transformar a estratificação de risco em um processo dinâmico, contínuo e altamente personalizado (HATIB *et al.*, 2018; NENADIC *et al.*, 2026; RAJKOMAR; DEAN; KOHANE, 2019).

Este capítulo propõe-se a mapear essa transição. Ao longo das próximas páginas, serão discutidos os fundamentos biológicos e clínicos que sustentam o risco cirúrgico, as ferramentas tradicionais de predição e exploraremos as novas fronteiras tecnológicas que estão moldando o futuro da segurança do paciente (NENADIC *et al.*, 2026; SANKAR; BEATTIE; WIJEYSUNDERA, 2015).

O objetivo é demonstrar como a ciência da predição pode ser traduzida em aplicações clínicas práticas, transformando dados brutos em decisões que salvam vidas na rotina hospitalar.

FUNDAMENTOS DA ESTRATIFICAÇÃO DE RISCO PERIOPERATÓRIO

A precisão na predição de complicações pós-operatórias depende da análise de uma equação fundamental: de um lado, a reserva fisiológica e a vulnerabilidade do paciente, de outro, a magnitude da agressão biológica representada pelo procedimento cirúrgico.

O risco perioperatório não é uma variável estática, mas sim o resultado do impacto do estresse cirúrgico sobre a homeostase de um organismo específico (DESBOROUGH, 2000; SANKAR; BEATTIE; WIJEYSUNDERA, 2015).

Fatores de risco intrínsecos do paciente

Os fatores relacionados ao paciente constituem a linha de base para qualquer modelo de estratificação (SANKAR; BEATTIE; WIJEYSUNDERA, 2015). Eles definem a capacidade do organismo de tolerar desvios hemodinâmicos, hipóxia transiente e o estado inflamatório sistêmico desencadeado pela cirurgia (DESBOROUGH, 2000).

A capacidade funcional é um dos preditores isolados mais robustos de desfechos pós-operatórios.

Mensurada rotineiramente em Equivalentes Metabólicos (METs), a capacidade funcional reflete a integridade do sistema cardiorrespiratório sob estresse. Pacientes incapazes de atingir 4 METs (atividades básicas como subir dois lances de escada ou caminhar rapidamente no plano) apresentam uma taxa significativamente maior de complicações cardíacas e pulmonares pós-operatórias, independentemente das comorbidades de base (LEVETT *et al.*, 2018; WIJEYSUNDERA *et al.*, 2018).

Nesse contexto, diferente da idade cronológica isolada, a fragilidade é um estado de vulnerabilidade biológica caracterizado pelo declínio cumulativo de múltiplos sistemas fisiológicos.

A perda de massa muscular (sarcopenia), a desnutrição subclínica e o declínio cognitivo reduzem drasticamente a resiliência do paciente, tornando-o altamente suscetível a complicações graves mesmo diante de cirurgias de menor porte (CLEGG *et al.*, 2013; SHAMLIYAN *et al.*, 2013).

Além disso, a carga de comorbidades, associada a presença de doenças crônicas ativas, especialmente a insuficiência cardíaca, a doença arterial coronariana, a doença renal crônica e a doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), atua como limitadora direta da reserva de órgãos vitais durante o período de maior demanda metabólica (HALVORSEN *et al.*, 2022; MUNSALLAM *et al.*, 2011).

Fatores relacionados ao procedimento

A natureza do ato operatório define a intensidade da agressão fisiológica, de forma que três variáveis principais determinam o risco intrínseco do procedimento.

A invasividade e sítio cirúrgico, pois cirurgias intracavitárias (torácicas e abdominais de grande porte) e procedimentos vasculares arteriais calibrosos (como correções de aneurisma

de aorta) impõem alterações hemodinâmicas drásticas, grandes deslocamentos de fluidos e interferência direta na mecânica ventilatória (HALVORSEN *et al.*, 2022; SANKAR; BEATTIE; WIJEYSUNDERA, 2015).

O caráter de urgência ou emergência uma vez que a ausência de tempo hábil para a otimização clínica pré-operatória é um dos principais determinantes de desfechos desfavoráveis (NEPOGODIEV *et al.*, 2019).

Procedimentos de emergência multiplicam o risco de mortalidade e complicações devido à instabilidade hemodinâmica prévia do paciente e à necessidade de decisões rápidas com dados limitados.

Por fim, o tempo cirúrgico estimado é também um grande fator de risco, pois o prolongamento do tempo de anestesia e exposição cirúrgica está diretamente correlacionado ao aumento de taxas de infecção do sítio cirúrgico, eventos tromboembólicos e disfunções orgânicas transitórias (SANKAR; BEATTIE; WIJEYSUNDERA, 2015).

FISIOPATOLOGIA DA RESPOSTA AO ESTRESSE CIRÚRGICO

Para compreender por que as complicações ocorrem, é necessário analisar a resposta endócrino-metabólica e imunológica ao trauma cirúrgico. A incisão tecidual e a manipulação de órgãos disparam uma cascata de eventos neuro-endócrinos coordenada pelo sistema nervoso simpático e pelo eixo hipotálamo-hipófise-adrenal.

A liberação maciça de catecolaminas (adrenalina e noradrenalina) e cortisol resulta em vasoconstrição periférica, taquicardia e aumento da contratilidade miocárdica (DESBOROUGH, 2000).

Esse cenário eleva drasticamente o consumo de oxigênio pelo miocárdio. Se o paciente apresentar doença arterial coronariana prévia

ou reserva cardíaca limitada, o desequilíbrio entre a oferta e a demanda de oxigênio pode culminar em isquemia miocárdica silenciosa ou infarto agudo do miocárdio perioperatório (HALVORSEN *et al.*, 2022; VISION *et al.*, 2012).

Simultaneamente, ocorre uma resposta inflamatória sistêmica mediada pela liberação de citocinas pró-inflamatórias (como as interleucinas IL-1 e IL-6 e o fator de necrose tumoral TNF-alfa) (DESBOROUGH, 2000).

Essa reação altera a permeabilidade capilar, induz disfunção endotelial e ativa a cascata de coagulação, gerando um estado de hipercoagulabilidade (aumento do risco de trombose venosa profunda e embolia pulmonar) (DESBOROUGH, 2000; KIETAIBL *et al.*, 2023).

Se o organismo do paciente não possuir reserva fisiológica suficiente para amortecer essa tempestade inflamatória e adrenérgica, instala-se uma disfunção orgânica que se manifestará clinicamente sob a forma de complicações renais, pulmonares, cardíacas ou infecciosas nos dias subsequentes ao procedimento (BELLOMO; KELLUM; RONCO, 2012).

FERRAMENTAS CLÁSSICAS DE ESTRATIFICAÇÃO DE RISCO

As ferramentas clássicas de estratificação de risco perioperatório consolidaram-se na prática médica como instrumentos padronizados para prever desfechos adversos a partir de variáveis de fácil obtenção à beira do leito (HALVORSEN *et al.*, 2022; SANKAR; BEATTIE; WIJEYSUNDERA, 2015).

Entre os sistemas focados na avaliação cardiovascular, o Índice de Risco Cardíaco Revisado, amplamente conhecido como Índice de Lee, destaca-se como um dos modelos mais validados e utilizados na rotina clínica.

Estruturado com base em seis preditores independentes, que incluem o tipo de cirurgia

realizada, o histórico de doença arterial coronariana, a presença de insuficiência cardíaca congestiva, o histórico de doença cerebrovascular, o diabetes melito sob insulino-terapia e a disfunção renal prévia com creatinina sérica superior a dois miligramas por decilitro, o índice estima a probabilidade de complicações cardíacas maiores de forma simples e direta (LEE *et al.*, 1999).

Apesar de sua praticidade e excelente reprodutibilidade, o Índice de Lee apresenta limitações importantes no cenário atual, demonstrando menor acurácia em cirurgias vasculares de alta complexidade e subestimando o risco em populações geriátricas frágeis (FORD; BEATTIE; WIJEYSUNDERA, 2010; FRONCZEK *et al.*, 2019).

Para refinar a indicação e o manejo perioperatório de pacientes com risco cardiovascular elevado, diretrizes de sociedades médicas internacionais, como a *American Heart Association* e a Sociedade Europeia de Cardiologia, estabelecem algoritmos sequenciais de decisão.

Esses protocolos integram a estimativa do risco cirúrgico intrínseco, a capacidade funcional medida em equivalentes metabólicos e a presença de condições cardíacas ativas estáveis ou instáveis (HALVORSEN *et al.*, 2022).

Essas diretrizes determinam de maneira pragmática a necessidade de exames complementares adicionais, como o ecocardiograma sob estresse ou a cintilografia miocárdica, e guiam a terapia farmacológica protetora no perioperatório, evitando o atraso injustificado de cirurgias em pacientes que não se beneficiariam de investigações cardiológicas adicionais (HALVORSEN *et al.*, 2022).

Além da avaliação cardiovascular específica, as ferramentas de caráter geral e multissistêmico oferecem uma visão global do prognóstico do paciente.

A classificação de estado físico desenvolvida pela *American Society of Anesthesiologists*, embora tenha sido originalmente desenhada para descrever o perfil de comorbidades do paciente antes da anestesia e não para prever desfechos cirúrgicos específicos, permanece como um dos preditores de mortalidade mais robustos na literatura médica devido à sua simplicidade conceitual (HENDRIX; GARMON, 2026).

No entanto, por ser essencialmente subjetiva e apresentar considerável variação na avaliação entre diferentes examinadores, a classificação frequentemente requer complementação por dados quantitativos.

Para superar essa limitação de subjetividade, o *American College of Surgeons* desenvolveu uma calculadora de risco cirúrgico do programa nacional de melhoria de qualidade cirúrgica, uma plataforma digital alimentada por milhões de dados reais de desfechos clínicos.

Esse modelo utiliza dezenas de variáveis do paciente e do procedimento específico para gerar estimativas probabilísticas personalizadas para mais de dez desfechos pós-operatórios diferentes, incluindo pneumonia, infecção urinária, complicações cardíacas e óbito, configurando-se como uma das ferramentas mais completas disponíveis atualmente (BILIMORIA *et al.*, 2013).

Em paralelo, o escore de severidade fisiológica e cirúrgica para a enumeração de mortalidade e morbidade, conhecido historicamente como sistema POSSUM e suas variações subsequentes, destaca-se por realizar um ajuste logístico minucioso do risco ao mensurar parâmetros fisiológicos pré-operatórios associados a dados de complexidade técnica obtidos durante o próprio ato operatório.

Esse modelo permite uma auditoria rigorosa da qualidade do serviço cirúrgico ao compa-

rar a taxa de complicações observada com a taxa de complicações predita pela ferramenta, mitigando distorções de interpretação associadas à gravidade intrínseca da população atendida (COPELAND; JONES; WALTERS, 1991).

Por fim, a estratificação de risco perioperatório também se estende de forma específica aos sistemas pulmonar e renal.

O escore ARISCAT, por exemplo, utiliza variáveis clínicas simples como idade avançada, saturação de oxigênio pré-operatória em ar ambiente, presença de infecção respiratória recente, anemia, tipo de incisão cirúrgica e duração do procedimento para predizer com alta especificidade a probabilidade de complicações pulmonares pós-operatórias, tais como insuficiência respiratória aguda, pneumonia e atelectasia (CANET *et al.*, 2010).

De forma semelhante, calculadoras de risco dedicadas a monitorar a função renal pós-operatória analisam a combinação de nefropatias prévias, exposição a contrastes radiológicos e instabilidade hemodinâmica para estimar a probabilidade de desenvolvimento de lesão renal aguda (BELLOMO; KELLUM; RONCO, 2012).

O uso dessas ferramentas clássicas, embora dependa majoritariamente de dados estáticos obtidos em uma única avaliação temporal, constitui o alicerce fundamental sobre o qual se estruturam os protocolos modernos de segurança cirúrgica (HALVORSEN *et al.*, 2022).

NOVAS FRONTEIRAS: BIOMARCADORES E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

O avanço da medicina de precisão e a digitalização dos sistemas de saúde impulsionaram a estratificação de risco perioperatório para além das limitações dos escores estáticos tradicionais, inaugurando uma era de monitoramento biológico e tecnológico em tempo real.

No centro dessa evolução está a incorporação de biomarcadores perioperatórios de alta sensibilidade, capazes de detectar injúrias orgânicas subclínicas muito antes da manifestação de sintomas físicos ou de alterações funcionais evidentes (NENADIC *et al.*, 2026).

O exemplo mais proeminente dessa aplicação é o uso da troponina ultrasensível para a identificação da injúria miocárdica após cirurgia não cardíaca, conhecida pela sigla MINS (SMILOWITZ *et al.*, 2019).

Ao contrário do infarto do miocárdio convencional, a MINS frequentemente se manifesta de forma silenciosa, sem dor torácica ou alterações eletrocardiográficas típicas, devido ao efeito residual de analgésicos e sedativos pós-operatórios.

A dosagem sistemática de troponina no período pré e pós-operatório imediato permite o diagnóstico precoce dessa condição, que está diretamente associada a um aumento drástico na mortalidade em trinta dias e a eventos cardiovasculares tardios (SMILOWITZ *et al.*, 2019; VISION *et al.*, 2012).

Complementarmente, a mensuração pré-operatória de peptídeos natriuréticos, como o BNP e o NT-proBNP, consolidou-se como um preditor robusto de estresse miocárdico e disfunção ventricular, fornecendo um substrato quantitativo essencial para antecipar episódios de insuficiência cardíaca congestiva e eventos cardiovasculares maiores (DUCEPPE *et al.*, 2017; WIJEYSUNDERA *et al.*, 2018).

Paralelamente ao avanço dos biomarcadores, a integração da inteligência artificial e do aprendizado de máquina aos prontuários eletrônicos redefiniu a capacidade analítica dos sistemas de saúde.

Algoritmos computacionais complexos são agora capazes de processar volumes massivos de dados heterogêneos, incluindo histórico clínico, exames laboratoriais, sinais vitais histó-

ricos e prescrições, para identificar padrões sutis de deterioração clínica que passariam despercebidos pela avaliação humana convencional (RAJKOMAR; DEAN; KOHANE, 2019).

Na prática intraoperatória, essa tecnologia viabiliza ferramentas de predição em tempo real de extrema relevância, como os índices preditivos de hipotensão arterial baseados na análise contínua da morfologia da onda de pulso arterial (HATIB *et al.*, 2018).

Esses sistemas utilizam modelos de aprendizado profundo para alertar a equipe de anestesia sobre a iminência de um evento hipotensivo minutos antes de sua ocorrência real, permitindo ajustes proativos na infusão de fluidos ou vasopressores e mitigando o tempo de hipoperfusão orgânica, um dos principais gatilhos para a lesão renal aguda pós-operatória e complicações miocárdicas (BELLOMO; KELLUM; RONCO, 2012; HATIB *et al.*, 2018).

Essa transição conceitual culmina no desenvolvimento de modelos de predição dinâmica, que superam a natureza estática das avaliações pré-operatórias convencionais.

Enquanto os escores tradicionais congelam o risco do paciente no momento da consulta pré-anestésica, os modelos dinâmicos atualizam continuamente a probabilidade de complicações à medida que novos dados são gerados durante o ato cirúrgico e nas primeiras horas de recuperação (KIETAIBL *et al.*, 2023).

Variáveis intraoperatórias críticas, tais como a magnitude da oscilação da pressão arterial média, a variabilidade da frequência cardíaca, o volume total de sangramento, a necessidade de transfusão de hemoderivados e os parâmetros de ventilação mecânica, são processadas de forma contínua por modelos matemáticos acoplados aos monitores do centro cirúrgico.

O resultado é um refinamento constante do prognóstico do paciente, permitindo que a

transição de cuidados para a unidade de terapia intensiva ou enfermaria seja guiada por um indicador de risco vivo e adaptável, otimizando a alocação de recursos críticos e o tempo de intervenção terapêutica (KIETAIBL *et al.*, 2023; NENADIC *et al.*, 2026; PEARSE *et al.*, 2014).

APLICAÇÕES CLÍNICAS E TOMADA DE DECISÃO

A tradução prática das ferramentas de estratificação de risco em ações concretas à beira do leito representa o elo fundamental entre a teoria preditiva e a melhoria dos desfechos cirúrgicos.

O primeiro ponto de impacto dessa aplicação ocorre na relação entre a equipe médica, o paciente e seus familiares, por meio do processo de consentimento informado e alinhamento de expectativas (HALVORSEN *et al.*, 2022).

Ao quantificar de maneira objetiva as probabilidades de complicações específicas e mortalidade, o cirurgião e o anestesiológista conseguem conduzir conversas mais transparentes e realistas.

Esse compartilhamento de dados concretos desmistifica o procedimento, reduz a ansiedade decorrente da incerteza e apoia decisões compartilhadas complexas, inclusive a opção pela conduta não cirúrgica ou por cuidados paliativos em cenários onde o risco de perda da autonomia ou de óbito supera significativamente os potenciais benefícios terapêuticos da intervenção (BILIMORIA *et al.*, 2013; HALVORSEN *et al.*, 2022).

No âmbito da gestão e logística hospitalar, a estratificação de risco funciona como um orientador crítico para a alocação de recursos escassos.

A decisão de encaminhar um paciente para um leito de unidade de terapia intensiva no pós-operatório imediato, em detrimento da enfer-

maria geral, historicamente dependia de critérios puramente subjetivos e da disponibilidade de vagas no momento da cirurgia (GROCOTT *et al.*, 2019).

Com o uso de modelos preditivos consolidados, essa triagem ganha contornos científicos precisos (BILIMORIA *et al.*, 2013). Pacientes categorizados como de alto risco cardiorrespiratório ou renal são direcionados proativamente para unidades de monitorização contínua, garantindo que o suporte hemodinâmico, a ventilação protetora e o manejo rigoroso de fluidos sejam iniciados imediatamente após a sutura da pele (HALVORSEN *et al.*, 2022; PEARSE *et al.*, 2014).

Esse planejamento preventivo evita as transferências de emergência por deterioração clínica na enfermaria, as quais estão estatisticamente associadas a um aumento substancial da mortalidade pós-operatória (NEPOGODIEV *et al.*, 2019).

Ademais, os dados gerados pela predição de risco são o principal catalisador para a implementação de protocolos de otimização perioperatória, com destaque para as diretrizes de recuperação otimizada após a cirurgia, conhecidas globalmente pela sigla ERAS.

A identificação precoce do paciente de alto risco permite a estruturação de programas de pré-habilitação multimodal nas semanas que antecedem o procedimento (HATIB *et al.*, 2018).

Esse processo envolve a prescrição de exercícios físicos supervisionados para ganho de reserva cardiopulmonar, suporte nutricional específico para combater o catabolismo do estresse cirúrgico e o controle rigoroso de anemias e glicemias (MCISAAC *et al.*, 2022; MUSALLAM *et al.*, 2011).

No cenário intraoperatório, esses protocolos traduzem-se na aplicação de terapias guiadas por metas hemodinâmicas. Em vez de admi-

nistrar fluidos intravenosos com base em fórmulas fixas ou na pressão arterial sistêmica isolada, a equipe médica utiliza monitores minimamente invasivos para avaliar variáveis dinâmicas, como a variação do volume sistólico (HALVORSEN *et al.*, 2022).

Isso possibilita a individualização precisa da oferta de líquidos e vasopressores, mantendo a perfusão dos órgãos vitais sem causar sobrecarga hídrica, edema tecidual ou disfunção intestinal.

Dessa forma, a estratificação deixa de ser um mero exercício prognóstico e se consolida como uma ferramenta ativa de intervenção clínica, capaz de modificar diretamente a trajetória do paciente ao longo de toda a sua jornada perioperatória (PEARSE *et al.*, 2014).

DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

A transposição das ferramentas de estratificação de risco perioperatório da teoria científica para a prática médica diária enfrenta desafios multifacetados, que transitam desde a infraestrutura tecnológica até aspectos éticos e comportamentais das equipes de saúde (NENADIC *et al.*, 2026).

O primeiro grande obstáculo reside na fragmentação dos sistemas de informação hospitalar e na consequente sobrecarga de trabalho imposta aos profissionais de linha de frente.

Na maioria das instituições, as calculadoras de risco ainda operam de forma isolada, exigindo que o médico insira manualmente dezenas de variáveis clínicas em plataformas externas de suporte à decisão.

Esse processo analógico e repetitivo, além de consumir um tempo precioso em rotinas já saturadas, induz a erros de digitação e desestimula a adesão sistemática.

A verdadeira eficiência preditiva depende da interoperabilidade total, onde algoritmos

integrados diretamente ao prontuário eletrônico extraíam e processam os dados de forma automatizada e passiva, gerando alertas de risco sem demandar esforço cognitivo adicional da equipe (NENADIC *et al.*, 2026; RAJKOMAR; DEAN; KOHANE, 2019).

Um segundo desafio surge com a complexidade matemática dos modelos contemporâneos baseados em aprendizado de máquina, fenômeno frequentemente descrito como o problema da caixa preta.

Diferente dos índices de risco clássicos, cujas variáveis e pontuações são transparentes e facilmente auditáveis pelo clínico, as redes neurais profundas processam interações não lineares de alta dimensão para atingir uma determinada predição (KAMBALE; JADHAV, 2024).

Para o médico que assume a responsabilidade legal e ética pelo paciente, a incapacidade de compreender os fatores fisiológicos específicos que determinaram um alerta de alto risco gera insegurança e ceticismo.

Sem uma inteligência artificial explicável, que traduza as decisões do algoritmo em justificativas clínicas plausíveis, a tendência natural dos profissionais é desconsiderar os alertas tecnológicos, perpetuando a dependência do julgamento clínico intuitivo e subjetivo (KAMBALE; JADHAV, 2024).

Por fim, a questão da validação externa e da equidade dos algoritmos representa um gargalo epidemiológico e social severo. A imensa maioria dos modelos preditivos de alto desempenho é desenvolvida e testada a partir de bancos de dados pertencentes a grandes centros acadêmicos de países desenvolvidos (NENADIC *et al.*, 2026; RAJKOMAR; DEAN; KOHANE, 2019).

Quando essas ferramentas são transpostas para sistemas de saúde de realidades distintas, com perfis demográficos diversos, restrições

orçamentárias e padrões de prática locais variados, sua acurácia preditiva tende a sofrer uma degradação significativa.

Fatores como a prevalência de comorbidades não diagnosticadas, o acesso tardio ao tratamento cirúrgico e diferenças na infraestrutura de suporte pós-operatório geram vieses de calibração que podem subestimar ou superestimar drasticamente o risco real (FRONCZEK *et al.*, 2019; NEPOGODIEV *et al.*, 2019).

Sem políticas rigorosas de validação local e reajuste dos algoritmos para as populações específicas de cada instituição, corre-se o risco de aprofundar as disparidades assistenciais e de comprometer a segurança dos pacientes que mais necessitam de uma estratificação precisa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A consolidação da predição de complicações pós-operatórias como um pilar fundamental da segurança do paciente reflete uma mudança profunda na própria filosofia do cuidado perioperatório (GROCOTT *et al.*, 2019; SANKAR; BEATTIE; WIJEYSUNDERRA, 2015).

A transição de modelos de avaliação eminentemente estáticos e subjetivos para ferramentas quantitativas, dinâmicas e baseadas em dados representa um salto qualitativo na capacidade de mitigar danos e otimizar recursos hospitalares (NENADIC *et al.*, 2026).

Ao integrar escores clássicos consagrados à monitorização contínua de biomarcadores e à análise preditiva por inteligência artificial, a medicina perioperatória contemporânea aproxima-se do ideal de uma assistência personalizada de alta precisão, na qual o risco não é apenas estimado em um momento isolado, mas gerenciado ativamente ao longo de toda a jornada do paciente (RAJKOMAR; DEAN; KOHANE, 2019).

Contudo, é imperativo reconhecer que a proliferação de tecnologias preditivas avançadas e o refinamento dos algoritmos de aprendizado de máquina não substituem o papel soberano do julgamento clínico e da relação médico-paciente (KAMBALE; JADHAV, 2024).

As ferramentas de estratificação de risco, por mais precisas que se tornem, devem ser compreendidas como instrumentos de suporte à decisão clínica, e não como determinantes absolutos de conduta (HALVORSEN *et al.*, 2022).

A eficácia prática dessas inovações depende intrinsecamente da capacidade da equipe multidisciplinar de interpretar os dados gerados à luz do contexto psicossocial, das preferências e dos valores de cada paciente.

A segurança no ambiente cirúrgico, portanto, continuará a repousar no equilíbrio exato entre a precisão científica dos dados e a sensibilidade humana do cuidado, garantindo que o avanço tecnológico sirva, primordialmente, para qualificar e proteger a vida (GROCOTT *et al.*, 2019; KAMBALE; JADHAV, 2024).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELLOMO, R.; KELLUM, J. A.; RONCO, C. Acute kidney injury. *The Lancet*, v. 380, n. 9843, p. 756-766, 2012. DOI: 10.1016/S0140-6736(11)61454-2.
- BILIMORIA, K. Y. *et al.* Development and evaluation of the universal ACS NSQIP surgical risk calculator: a decision aid and informed consent tool for patients and surgeons. *Journal of the American College of Surgeons*, v. 217, n. 5, p. 833-842.e3, 2013. DOI: 10.1016/j.jamcollsurg.2013.07.385.
- CANET, J. *et al.* Prediction of postoperative pulmonary complications in a population-based surgical cohort. *Anesthesiology*, v. 113, n. 6, p. 1338-1350, 2010. DOI: 10.1097/ALN.0b013e3181fc6e0a.
- CLEGG, A. *et al.* Frailty in elderly people. *The Lancet*, v. 381, n. 9868, p. 752-762, 2013. DOI: 10.1016/S0140-6736(12)62167-9.
- COPELAND, G. P.; JONES, D.; WALTERS, M. POSSUM: a scoring system for surgical audit. *The British Journal of Surgery*, v. 78, n. 3, p. 355-360, 1991. DOI: 10.1002/bjs.1800780327.
- DESBOROUGH, J. P. The stress response to trauma and surgery. *British Journal of Anaesthesia*, v. 85, n. 1, p. 109-117, 2000. DOI: 10.1093/bja/85.1.109.
- DUCEPPE, E. *et al.* Canadian Cardiovascular Society guidelines on perioperative cardiac risk assessment and management for patients who undergo noncardiac surgery. *The Canadian Journal of Cardiology*, v. 33, n. 1, p. 17-32, 2017. DOI: 10.1016/j.cjca.2016.09.008.
- FORD, M. K.; BEATTIE, W. S.; WIJEYSUNDERA, D. N. Systematic review: prediction of perioperative cardiac complications and mortality by the revised cardiac risk index. *Annals of Internal Medicine*, v. 152, n. 1, p. 26-35, 2010. DOI: 10.7326/0003-4819-152-1-201001050-00007.
- FRONCZEK, J. *et al.* External validation of the Revised Cardiac Risk Index and National Surgical Quality Improvement Program Myocardial Infarction and Cardiac Arrest calculator in noncardiac vascular surgery. *British Journal of Anaesthesia*, v. 123, n. 4, p. 421-429, 2019. DOI: 10.1016/j.bja.2019.05.029.
- GROCOTT, M. P. W. *et al.* Peri-operative care pathways: re-engineering care to achieve the 'triple aim'. *Anaesthesia*, v. 74, suppl. 1, p. 90-99, 2019. DOI: 10.1111/anae.14513.
- HALVORSEN, S. *et al.* 2022 ESC guidelines on cardiovascular assessment and management of patients undergoing non-cardiac surgery. *European Heart Journal*, v. 43, n. 39, p. 3826-3924, 2022. DOI: 10.1093/eurheartj/ehac270.
- HATIB, F. *et al.* Machine-learning algorithm to predict hypotension based on high-fidelity arterial pressure waveform analysis. *Anesthesiology*, v. 129, n. 4, p. 663-674, 2018. DOI: 10.1097/ALN.0000000000002300.
- HENDRIX, J. M.; GARMON, E. H. American Society of Anesthesiologists Physical Status Classification System. In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2026.
- KAMBALE, M.; JADHAV, S. Applications of artificial intelligence in anesthesia: a systematic review. *Saudi Journal of Anaesthesia*, v. 18, n. 2, p. 249-256, 2024. DOI: 10.4103/sja.sja_955_23.
- KIETAIBL, S. *et al.* Management of severe peri-operative bleeding: guidelines from the European Society of Anaesthesiology and Intensive Care: second update 2022. *European Journal of Anaesthesiology*, v. 40, n. 4, p. 226-304, 2023. DOI: 10.1097/EJA.0000000000001803.
- LEE, T. H. *et al.* Derivation and prospective validation of a simple index for prediction of cardiac risk of major noncardiac surgery. *Circulation*, v. 100, n. 10, p. 1043-1049, 1999. DOI: 10.1161/01.CIR.100.10.1043.
- LEVETT, D. Z. H. *et al.* Perioperative cardiopulmonary exercise testing (CPET): consensus clinical guidelines on indications, organization, conduct, and physiological interpretation. *British Journal of Anaesthesia*, v. 120, n. 3, p. 484-500, 2018. DOI: 10.1016/j.bja.2017.10.020.

MCISAAC, D. I. *et al.* Prehabilitation in adult patients undergoing surgery: an umbrella review of systematic reviews. *British Journal of Anaesthesia*, v. 128, n. 2, p. 244-257, 2022. DOI: 10.1016/j.bja.2021.11.014.

MUSALLAM, K. M. *et al.* Preoperative anaemia and postoperative outcomes in non-cardiac surgery: a retrospective cohort study. *The Lancet*, v. 378, n. 9800, p. 1396-1407, 2011. DOI: 10.1016/S0140-6736(11)61381-0.

NENADIC, I. *et al.* The role of biomarkers in personalized anesthesia: from physiological parameters to molecular diagnostics. *Biomedicines*, v. 14, n. 2, p. 300, 2026. DOI: 10.3390/biomedicines14020300.

NEPOGODIEV, D. *et al.* Global burden of postoperative death. *The Lancet*, v. 393, n. 10170, p. 401, 2019. DOI: 10.1016/S0140-6736(19)30048-3.

PEARSE, R. M. *et al.* Effect of a perioperative, cardiac output-guided hemodynamic therapy algorithm on outcomes following major gastrointestinal surgery: a randomized clinical trial and systematic review. *JAMA*, v. 311, n. 21, p. 2181-2190, 2014. DOI: 10.1001/jama.2014.5305.

RAJKOMAR, A.; DEAN, J.; KOHANE, I. Machine learning in medicine. *The New England Journal of Medicine*, v. 380, n. 14, p. 1347-1358, 2019. DOI: 10.1056/NEJMra1814259.

SANKAR, A. BEATTIE, W. S.; WIJEYSUNDERA, D. N. How can we identify the high-risk patient? *Current Opinion in Critical Care*, v. 21, n. 4, p. 328-335, 2015. DOI: 10.1097/MCC.0000000000000216.

SHAMLIYAN, T. *et al.* Association of frailty with survival: a systematic literature review. *Ageing Research Reviews*, v. 12, n. 2, p. 719-736, 2013. DOI: 10.1016/j.arr.2012.03.001.

SMILOWITZ, N. R. *et al.* Myocardial injury after non-cardiac surgery: a systematic review and meta-analysis. *Cardiology in Review*, v. 27, n. 6, p. 267-273, 2019. DOI: 10.1097/CRD.0000000000000253.

VASCULAR EVENTS IN NONCARDIAC SURGERY PATIENTS COHORT EVALUATION (VISION) STUDY INVESTIGATORS *et al.* Association between postoperative troponin levels and 30-day mortality among patients undergoing noncardiac surgery. *JAMA*, v. 307, n. 21, p. 2295-2304, 2012. DOI: 10.1001/jama.2012.5502.

WEISER, T. G. *et al.* Estimate of the global volume of surgery in 2012: an assessment supporting improved health outcomes. *The Lancet*, v. 385, suppl. 2, p. S11, 2015. DOI: 10.1016/S0140-6736(15)60806-6.

WIJEYSUNDERA, D. N. *et al.* Assessment of functional capacity before major non-cardiac surgery: an international, prospective cohort study. *The Lancet*, v. 391, n. 10140, p. 2631-2640, 2018. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)31131-0.