



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MÉDICAS

Jorge Hamilton Soares Garcia

**Curvas de aprendizado em médicos residentes de anestesiologia: comparação
entre dois métodos de análise sequencial**

FLORIANÓPOLIS

2023

Jorge Hamilton Soares Garcia

**Curvas de aprendizado em médicos residentes de anestesiologia: comparação
entre dois métodos de análise sequencial**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Médicas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Médicas.

Orientador(a): Prof. Dr. Getúlio Rodrigues de Oliveira Filho

FLORIANÓPOLIS

2023

Garcia, Jorge Hamilton Soares

Curvas de aprendizado em médicos residentes de
anestesiologia entre dois métodos de análise sequencial / Jorge
Hamilton Soares Garcia ; orientador, Getúlio Rodrigues de
Oliveira Filho, 2023.

45 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências da Saúde, Programa de Pós-Graduação
em Ciências Médicas-Novo, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Ciências Médicas-Novo. 2. Ciências da saúde. I. Rodrigues
de Oliveira Filho, Getúlio. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Médicas-Novo.
III. Título.

Jorge Hamilton Soares Garcia

Curvas de aprendizado em médicos residentes de anestesiologia: comparação entre dois métodos de análise sequencial.

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 16 de maio de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Getúlio Rodrigues de Oliveira Filho
UFSC CLC/CCS

Prof. Alexandre Sherley Casimiro Onofre
UFSC ACL/CCS

Prof. Edevard José de Araújo
UFSC CLC/CCS

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Ciências Médicas

Insira neste espaço a
assinatura digital

Profa. Dra. Katia Lin

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Dr. Getúlio Rodrigues de Oliveira Filho
Orientador

Florianópolis, 2023

AGRADECIMENTOS

Aos professores e alunos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Médicas da Universidade Federal de Santa Catarina, por compartilharem seus conhecimentos, criando um ambiente perfeito de aprendizagem.

Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Getúlio Rodrigues de Oliveira Filho por toda a dedicação, proporcionando assim o meu crescimento científico e pessoal.

RESUMO

Introdução e objetivos: A aquisição de habilidades em bloqueios do plexo braquial exige treinamento sob supervisão regressiva. Monitorar o desempenho do residente ajuda a determinar quando a supervisão não é mais necessária porque ele já adquiriu o nível de habilidade desejado. O presente estudo visa comparar a acurácia do número estimado de procedimentos para obtenção da competência no bloqueio do plexo braquial pelos métodos da soma cumulativa para curvas de aprendizado (LC-CUSUM – do inglês “*Learning Curves Cumulative Sum*”) não ajustado e ajustado a probabilidade de falha (“*Risk-Adjusted*” - RA-LC-CUSUM) . **Método:** Dados de 1.713 bloqueios do plexo braquial realizados por 32 residentes de anestesia foram utilizados na construção de curvas de aprendizado individuais usando o método LC-CUSUM e sua versão ajustada ao risco. O ajuste para o risco de falha em cada bloqueio deriva de um modelo logístico. A acurácia de ambos os métodos foi comparada levando em consideração as taxas cumulativas de sucesso observadas, até o número de procedimentos definidos para cada um dos métodos. **Resultados:** Usando o método LC-CUSUM, 24 residentes (75%) atingiram a competência após uma mediana de 19 bloqueios (IQR = 14 – 24), enquanto sob o RA-LC-CUSUM, 15 residentes (47%) foram diagnosticados como competentes ($p= 0,02$) após mediana de 32 bloqueios (IQR= 27 – 53) ($p= 0,001$). A taxa média de sucesso em atingir a competência foi de 93% (IQR= 86% – 100%) sob o LC-CUSUM e 93% (IQR= 89% – 95%) para o método RA-LC-CUSUM ($p= 0,13$). Sensibilidade de LC-CUSUM (85%; 95% CI= 67,3% - 96%) foi significativamente maior do que a do RA-LC-CUSUM (53%; 95% CI= 33,9% - 72,5%) ($p = 0,0039$). As especificidades não diferiram LC-CUSUM (100%; IC 95%= 39,8% - 100%) e RA-LC-CUSUM (100%; IC 95%= 39,8% - 100%), ($p= 1$). **Conclusão:** O número de bloqueios que os médicos residentes realizaram até atingir o nível de competência foi menor quando analisados pelo método LC-CUSUM, permitindo diagnósticos confiáveis da competência do residente em anestesia do plexo braquial e sua acurácia é maior sem ajuste a probabilidade de falha, previsto por um modelo logístico moderadamente preditivo.

Palavras-chave: Bloqueio do plexo braquial; Curva de aprendizado; Soma cumulativa. Sensibilidade; Especificidade; Acurácia

ABSTRACT

Background and objectives: Skill acquisition in brachial plexus blocks demands training under regressive supervision. Monitoring resident performance helps determine when supervision is no longer needed because he has acquired the desired skill level. The present study aims to compare the accuracy of the estimated number of procedures to obtain competence in brachial plexus block using the unadjusted *Learning Curves Cumulative Sum (LC-CUSUM)* and *Risk Adjusted LC-CUSUM (RA-LC-CUSUM)* methods. **Methods:** Individual learning curves using data from 1713 brachial plexus blocks performed by 32 anesthesia residents were construct using the LC-CUSUM method and its risk-adjusted version. Adjustment for the risk of failure at each block derived from a logistic model. The accuracy of both methods was tested and compared against the observed cumulative success rates at the procedure number each method signaled. **Results:** Under the LC-CUSUM method, 24 residents (75%) attained competence after a median of 19 blocks (IQR= 14 – 24), while under the RA-LC-CUSUM, 15 residents (47%) were diagnosed as competent ($p= 0.02$) after a median of 32 blocks (IQR= 27 – 53) ($p= 0.001$). The median success rate at reaching competence was 93% (IQR = 86% – 100%) under the LC-CUSUM and 93% (IQR= 89% – 95% for the RA-LC-CUSUM method ($p= 0.13$). The sensitivity of LC-CUSUM (85%; 95% CI= 67.3% - 96%) was significantly higher than that of the RA-LC-CUSUM (53%; 95% CI= 33.9% - 72.5%) ($p= 0.0039$). Specificities did not differ LC-CUSUM (100%; 95% CI= 39.8% - 100%) and RA-LC-CUSUM (100%; 95% CI= 39.8% - 100%), ($p= 1$). **Conclusions:** The number of blocks that anesthesia residents performed until reaching the level of competence was lower when analyzed by the LC-CUSUM method, allowing diagnoses attended from the resident's competence in brachial plexus anesthesia and its accuracy is greater without adjusting probability of failure, predicted by a moderately predictive logistic model.

Keywords: Brachial plexus block; Learning curve; Cumulative sum; Sensitivity; Specificity; Accuracy

1. INTRODUÇÃO

Gráficos de soma cumulativa (CUSUM - do inglês "*Cumulative Sum*") combinados com testes de razão de probabilidade sequencial (SPRT – do inglês "*Sequential Probability Ratio Test*")¹⁻³ têm sido usados para descrever os padrões de desempenho de residentes de anestesia em procedimentos comuns⁴⁻⁷. No entanto, esses métodos foram projetados para monitorar processos estáveis e visam identificar desvios da estabilidade, por isso foram considerados mais adequados para monitorar o desempenho de indivíduos competentes.

Um novo método CUSUM, denominado de soma cumulativa para curvas de aprendizado (LC-CUSUM – do inglês "*Learning Curves Cumulative Sum*") foi projetado especificamente para acompanhar a fase de aprendizado de habilidades procedimentais. Este método foi desenvolvido com base no princípio de que na sequencia inicial de procedimentos ocorre uma instabilidade de desempenho refletida nos padrões difusos de sucesso e falhas, características estas da fase de aprendizado^{8,9}. Assim, o método LC-CUSUM visa identificar quando as taxas de sucesso ou falha se estabilizaram em um determinado valor. Uma vez detectado o fim da fase de aprendizagem, o monitoramento do desempenho continua com um método CUSUM unilateral tradicional, com o objetivo de detectar desvios da taxa de sucesso desejada, fornecendo assim evidências de que o aluno alcançou competência inequívoca no procedimento. Essa manutenção da competência pós-aprendizagem pode ser vista como um substituto para a acurácia do método soma cumulativa para curvas de aprendizado (LC-CUSUM), representando uma vantagem sobre os métodos mais antigos.

Por outro lado, a qualidade dos referenciais anatômicos, posicionamento¹⁰, orientação ultrassonográfica¹¹, bem como habilidades visuoespaciais individuais¹², podem afetar as curvas de desempenho do residente, modulando a probabilidade de falha em procedimentos individuais¹³. O ajuste de risco dos métodos CUSUM tem sido usado com sucesso para explorar variações nas taxas de desempenho individual e institucional. O ajuste do risco é feito incorporando a probabilidade de falha derivada dos modelos logísticos, no teste de log verossimilhança, que determina o peso a ser adicionado ao valor anterior da soma cumulativa¹⁴. Evidência estatística da eficácia

do ajuste de risco foi fornecida para o teste CUSUM tradicional ¹⁵⁻¹⁷, no entanto faltam evidências para os efeitos do ajuste de risco na acurácia do teste LC-CUSUM ⁸.

O número de procedimentos disponíveis afeta as taxas de erro tipo I e II. Desde que longas sequências de procedimentos sejam analisadas, todos os residentes podem ser considerados competentes por acaso. Assim, à medida que o número de observações aumenta, a verdadeira taxa de erro tipo I tende a zero, de modo que menos residentes verdadeiramente competentes falharão em atingir a competência do teste. Em contraste, a verdadeira taxa de erro do tipo II tende a um, uma vez que mais residentes verdadeiramente não competentes eventualmente alcançarão a competência do teste ^{9,14}. Assim, a escolha dos parâmetros para monitorar o desempenho dos residentes em um determinado procedimento depende do número de procedimentos disponíveis, das taxas de falha aceitáveis sob as hipóteses nula (p_0) e alternativa (p_1) e, conseqüentemente, o limite de competência. A simulação computacional é utilizada para fornecer a melhor combinação desses parâmetros para o teste ⁹.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Competência em anestesia do plexo braquial

Bloqueios do plexo braquial são técnicas anestésicas largamente utilizadas e requerem treinamento intensivo sob supervisão até que a prática independente seja alcançada, mas exigem aquisição de habilidades e segundo as orientações da ACGME (*Accreditation Council for Graduate Medical Education*) ¹⁸ é necessário que sejam utilizadas medidas objetivas no monitoramento do aprendizado e evolução da performance dos médicos residentes. Os estágios da anestesia regional podem ser seguidos por avaliações semestrais dos marcos desenvolvidos pelo ACGME. Os marcos são: conhecimentos; habilidades; atitudes e outros atributos para cada uma das competências definidas, que representam metas a serem atingidas pelos residentes ao longo do período de treinamento. Os marcos são organizados em cinco níveis que descrevem o desenvolvimento dos residentes novatos em sua jornada em direção ao estado de especialista ¹⁹.

A aquisição de competência na realização de procedimentos depende de um número variável de tentativas. Esse número depende da complexidade, da qualidade

do ensino e das habilidades psicomotoras do residente. O termo competência foi utilizado, no presente estudo, baseado no modelo descrito pelos irmãos Dreyphus, Stuart e Hubert ²⁰, publicado na Universidade de Berkley em 1980, definindo que o indivíduo desenvolve suas habilidades passando por cinco níveis: novato; iniciante; competente; proficiente e expert. ²¹.

A competência em anestesia regional compreende habilidades não técnicas e técnicas. As habilidades não técnicas compreendem conhecimento teórico, indicação e planejamento da anestesia, reconhecimento e manejo de complicações e, no nível aspiracional, o desenvolvimento de protocolos institucionais de anestesia regional. As habilidades técnicas referem-se à capacidade de realizar bloqueios anestésicos regionais. Assim, o nível 1 é alcançado quando o residente é capaz de preparar o paciente e os equipamentos para as técnicas comuns de anestesia regional. Para atingir o nível 2, espera-se que o residente realize técnicas de anestesia regional sob supervisão direta. A realização de anestesia regional sob supervisão indireta indica que o residente atingiu o nível 3. O nível 4 é alcançado quando o residente executa independentemente as técnicas de anestesia regional. O nível aspiracional 5 é alcançado se o residente for capaz de desenvolver protocolo institucional para uso de anestesia regional e manejo de complicações. O nível 5 corresponde ao estado do consultor, um nível de especialização que exige o acúmulo de uma enorme quantidade de conhecimento e prática para ser alcançado. Por esse motivo, é considerado um nível aspiracional. Medidas objetivas são necessárias para fornecer evidências inequívocas de que o residente progrediu de um nível para o outro em cada ocasião de avaliação. A observação direta, o exame clínico objetivo estruturado (OSCE do inglês - *Objective Structured Clinical Examinations*) e a simulação são atualmente sugeridos como ferramentas de avaliação ²², mas as curvas de aprendizado representam uma alternativa que vem sendo utilizada com frequência ⁵.

2.2. Métodos de análise sequencial

Métodos de análises sequenciais emprestados da indústria, como os tradicionais gráficos Shewhart *p-chart*; *the exponentially weighted moving average (EWMA) chart*; *the cumulative sum CUSUM chart*, têm sido usados para acompanhar o aprendizado e o desempenho dos residentes. As características ideais de um gráfico

de controle é que leve pouco tempo para sinalizar uma mudança verdadeira no desempenho e um longo período para que uma sinalização falsa ocorra. Como exemplo os gráficos de *Shewhart* e EWMA, apresentam uma boa performance para sinalizar eventos que ocorram com maior frequência ($>10\%$), diferentemente os gráficos CUSUM que conseguem detectar eventos menos frequentes ($<10\%$)²³ e de forma mais rápida. De forma conjunta, diversos métodos estatísticos já foram utilizados na tentativa de monitorizar o aprendizado, entre eles as análises de regressão, diversos tipos de curvas ajustadas²³. Essa relação linear entre o experimento e o desfecho, não garante de forma precisa que o médico em treinamento tenha atingido o grau de competência exigido. Já os testes estatísticos de análise sequencial conseguem documentar a evolução da performance do médico residente de forma gráfica, objetiva e contínua, através da delimitação de taxas aceitáveis e inaceitáveis de falha e respectivos limites de decisão^{4,24}.

Por esses motivos os gráficos CUSUM combinados com testes de razão de probabilidade sequencial (SPRT)^{2,25} tem sido utilizados com maior frequência para descrever os padrões de desempenho de médicos residentes em procedimentos comuns. As curvas de desempenho baseadas no método CUSUM atendem aos requisitos de monitoramento de habilidades em procedimentos de forma individual, pois dependem de cálculos relativamente simples e podem ser facilmente incorporadas a aplicativos móveis ou baseados na Web. Uma vez que definições claras e simples de sucesso e falha em um determinado procedimento são disponibilizadas no aplicativo de coleta de dados, os residentes podem atribuir com acurácia sucesso ou falha ao resultado do procedimento. No entanto, a acurácia dos dados relatados pelos residentes podem ser afetados pelo comportamento individual e assim contribuir para a variabilidade entre os resultados²⁶. A acurácia dos dados autorrelatados pode ser garantida por amostragem aleatória periódica ou incorporando inteligência artificial ao aplicativo de coleta de dados²⁷. Além disso, estabelecer um ambiente sem julgamento e usar o registro de casos como ferramentas de feedback formativo resulta em altas taxas de adesão e acurácia nos resultados²⁸.

2.3. Método CUSUM

O método CUSUM ^{4,29,30} caracteriza-se por necessitar do cálculo de três parâmetros: o desvio sigma (s), o Limite Superior de controle (LSC) e o Limite Inferior de Controle (LIC)^(9, 10). O cálculo do LSC é feito a partir da taxa inaceitável de falhas (p_1) e do LIC a partir da taxa aceitável de falhas (p_0). Na construção da curva de aprendizado pelo método SPRT-CUSUM, inicia-se no ponto zero, o qual representa o primeiro procedimento, sucessivamente subtrai-se o valor de (s) para o sucesso e soma-se o valor de ($1-s$) no caso de falha, a cada procedimento. Dessa forma a curva ascende em direção ao LSC quando ocorrem falhas e descende em direção ao LIC com o sucesso. Quando a linha da curva de aprendizado se mantém entre os LSC e LIC, nenhuma decisão pode ser tomada e significa que precisa de um maior número de observações. Já quando a linha ultrapassa o LSC o desempenho é considerado inadequado, por não diferir da taxa inaceitável de falhas (p_1), da mesma forma quando a linha ultrapassa o LIC o desempenho é considerado adequado, agora por não diferir da taxa aceitável de falhas (p_0). O aprendizado ocorre quando o gráfico sinaliza por atingir o limite de competência, representando um ponto em que a taxa real de acerto não difere da taxa mínima de acerto pré-estabelecida, considerando as probabilidades dadas de erros estatísticos tipo I e II ^{4,5}. A curva de aprendizado através do método CUSUM é construída a partir das seguintes fórmulas (1 a 7) e ilustrada na figura 1:

$$h_0 = b/(P+Q) \quad (1)$$

$$h_1 = a/(P+Q) \quad (2)$$

$$a = \ln[(1-\beta) / \alpha] \quad (3)$$

$$b = \ln[(1- \alpha) / \beta] \quad (4)$$

$$P = \ln(p_1/p_0) \quad (5)$$

$$Q = \ln[(1-p_0)/(1-p_1)] \quad (6)$$

$$s = Q/(P + Q) \quad (7)$$

h_0 = define o limite inaceitável do gráfico CUSUM ou o Limite Superior de Controle (LSC)

h_1 = define o limite aceitável do gráfico CUSUM ou o Limite Inferior de Controle (LIC)

\ln = é o logaritmo natural da função designada

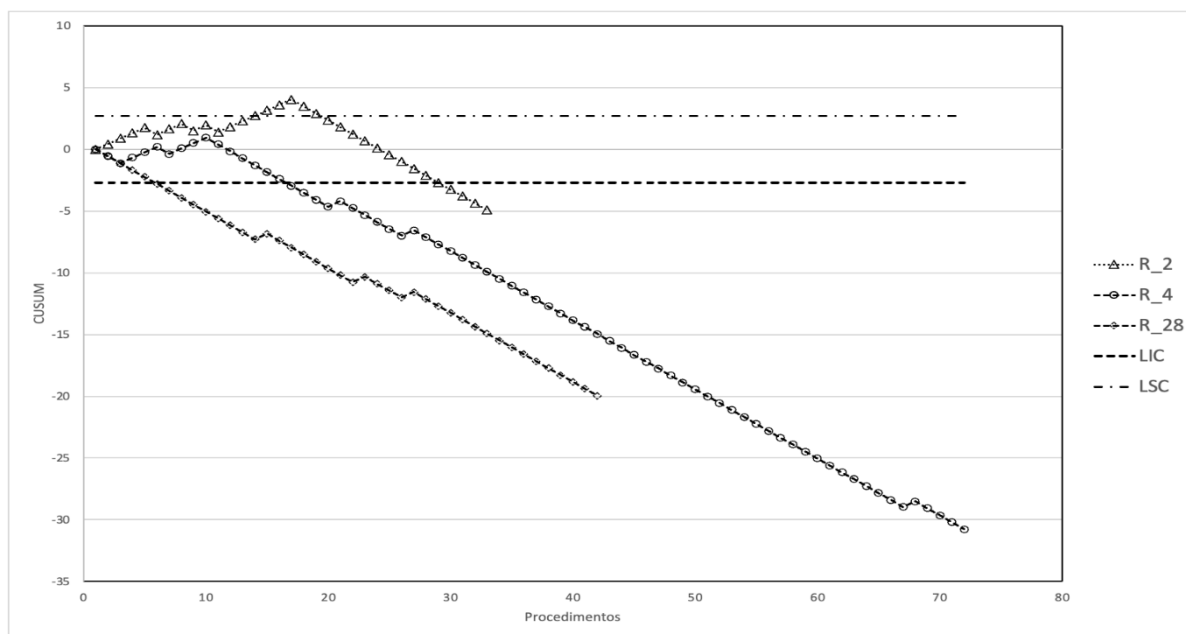
α = erro do Tipo I

β = erro do Tipo II

s = valor a ser subtraído do escore anterior em caso de sucesso no procedimento

$1-s$ = valor a ser somado ao escore anterior em caso de falha no procedimento

Figura 1: Representação da curva de aprendizado de três médicos residentes, em bloqueios de nervos periféricos pelo método CUSUM.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.4. Método LC-CUSUM

Esses métodos mais tradicionais foram projetados para monitorar processos estáveis e visam identificar desvios da estabilidade ³¹, de modo que foram considerados mais adequados para acompanhar o desempenho de indivíduos competentes ^{6,7}. Um novo método denominado soma cumulativa para curvas de aprendizado (LC-CUSUM – do inglês “*Learning Curves Cumulative Sum*”) foi projetado especificamente para seguir a fase de aprendizagem de habilidades procedimentais, partindo do princípio de que a instabilidade de desempenho na sequência inicial de procedimentos, refletida nos padrões difusos de sucessos e falhas é característica da fase de aprendizagem. Assim, o método LC-CUSUM visa identificar quando as taxas de sucesso ou falha se estabilizaram em um determinado valor ^{8,9}. Uma vez detectado o fim da fase de aprendizagem, o monitoramento do desempenho

continua com o método CUSUM unilateral tradicional ³², com o objetivo de detectar desvios da taxa de sucesso desejada, fornecendo assim evidências de que o aluno alcançou competência inequívoca no procedimento. Essa manutenção da competência pós-aprendizagem pode ser vista como um substituto para a acurácia do método CUSUM, representando uma significativa vantagem sobre os métodos mais antigos.

LC-CUSUM aplicado a resultados binários testa a probabilidade de rejeitar a hipótese nula (desempenho instável e inaceitável) em comparação com a aceitação da hipótese alternativa (competência). Os parâmetros para o método LC-CUSUM aplicado aos dados binários são a taxa de falha inaceitável (p_0) e a taxa de falha aceitável (p_1). A hipótese nula assume que taxas de reprovação mais altas são características da fase de aprendizagem, e que quando a competência é alcançada, taxas de reprovação mais baixas e mais rigorosas, correspondentes ao objetivo final do treinamento, são esperadas ^{8,9}. Assim, diz-se que os treinandos são competentes se, e somente se, a probabilidade de falha for igual ou menor que a taxa de falha aceitável (p_1), confirmando a hipótese alternativa (H_1). O LC-CUSUM é baseado na diferença de risco entre as duas taxas.

A construção de uma curva LC-CUSUM é baseada nas seguintes fórmulas: $S_t = \max(0, S_{t-1} + W_t)$ ou, se quisermos um CUSUM descendente graficamente, $S_t = \min(0, S_{t-1} - W_t)$. W_t depende do resultado do procedimento (X_t). $X_t = 0$ para um sucesso ou $X_t = 1$ para uma falha. O peso W_t correspondente ao procedimento atual representa uma razão logarítmica obtida da distribuição de Bernoulli, W_t é uma medida da evidência de que a taxa de falha real p é igual a p_0 (a taxa de falha inaceitável) em comparação com p_1 (a taxa de falha aceitável). Os valores de S_t são, de certo modo, as evidências acumuladas, tendendo a aumentar se a hipótese alternativa for verdadeira e a diminuir se a hipótese nula for verdadeira, em uma linha descendente⁸. Vale ressaltar que diferentemente do método CUSUM a LC-CUSUM a taxa inaceitável de falhas passa a ser p_0 e a taxa aceitável de falhas p_1 .

As curvas LC-CUSUM podem ser descendentes ou ascendentes, dependendo do resultado: a curva se dirige para baixo em caso de sucesso e para cima em caso de falha. De fato, substituir a adição pelo sinal de subtração na fórmula LC-CUSUM produz uma curva na direção oposta. A LC-CUSUM tem a particularidade da barreira de absorção, ou seja, uma vez tocada, permanece responsiva na linha

zero, até um novo procedimento com sucesso. O limite de competência (h) representado por uma linha horizontal indica quando a probabilidade da taxa de falha cumulativa real é igual ou menor que a taxa de falha máxima aceitável. Entretanto, diz-se que os residentes ainda não são competentes, até tocar esta linha, fórmulas (8 a 10) Figura 2.

$$S_t = \min(0, S_{t-1} - W_t) \quad (8)$$

$$WS = \ln[(1-p_0)/(1-p_1)] \quad (9)$$

$$Wf = \ln(p_0/p_1) \quad (10)$$

p_0 = taxa inaceitável de falhas

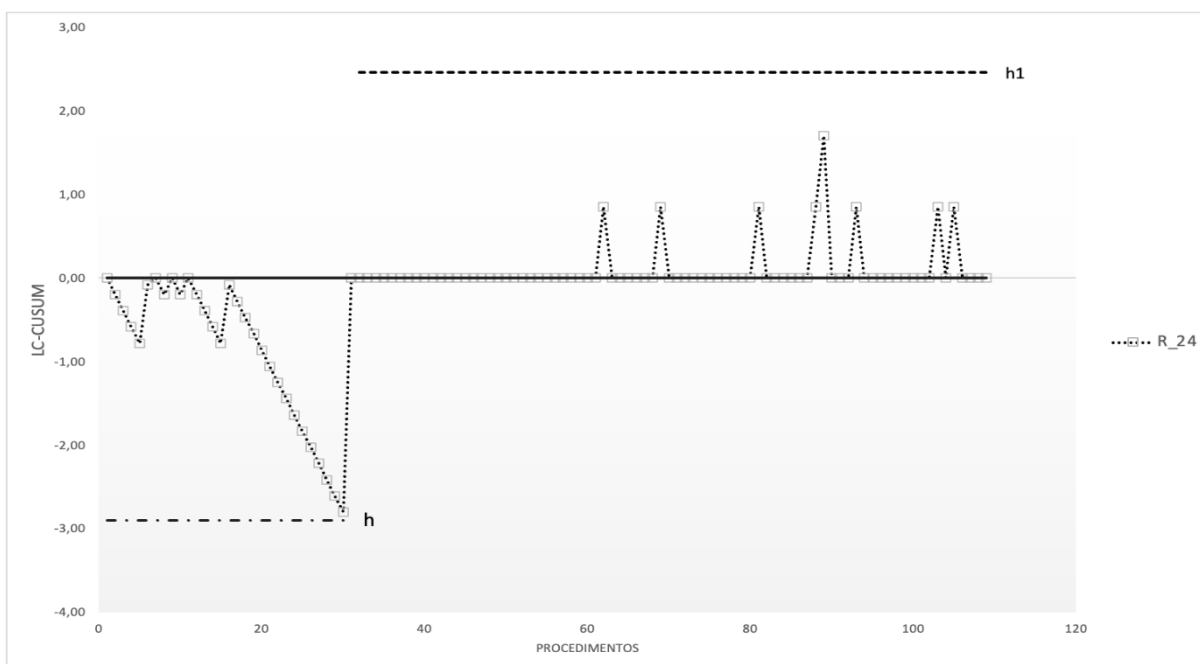
p_1 = taxa aceitável de falhas

S_t = fórmula da LC-CUSUM

WS = valor a ser subtraído do escore anterior (S_{t-1}) em caso de sucesso

Wf = valor a ser adicionado ao escore anterior (S_{t-1}) em caso de sucesso

Figura 2 : Exemplo de curva LC-CUSUM, identificando a barreira de absorção ou seja uma vez tocada, permanece responsiva na linha zero, até um novo procedimento com sucesso , no momento que o limite h é atingido o processo passa a ser monitorado pela curva CUSUM unilateral tradicional.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.5. Método ajustado RA-LC-CUSUM

Não apenas a complexidade do procedimento, a qualidade do ensino e as habilidades psicomotoras pessoais influenciam o desempenho do médico residente. Foi demonstrado que as características do paciente influenciam a probabilidade de falha ou sucesso em procedimentos anestésicos. Por exemplo, a qualidade dos pontos de referência anatômicos e o posicionamento do paciente demonstraram prever as taxas de sucesso de punções epidural e espinhal ³³. Da mesma forma, a orientação por ultrassom demonstrou aumentar as taxas de sucesso dos bloqueios do plexo braquial ¹¹. Por outro lado as habilidades visuoespaciais individuais podem influenciar o desempenho dos novatos na fase de aprendizado de imagens de ultrassom relevantes para anestesia regional ^{12,13}.

As taxas de sucesso no final do treinamento foram relatadas em estudos prévios variando entre 80 a 90% ^{34,35}, sendo que a orientação por ultrassom e o número de bloqueios afetam as taxas máximas de sucesso alcançadas e a inclinação das curvas de aprendizado dos residentes ^{4,6}. As taxas de sucesso também dependem da abordagem do plexo braquial e do número de injeções, que afetam a exposição de troncos, fascículos e nervos terminais à solução anestésica local ^{5,10}. Diferentes abordagens ao plexo braquial demandam um posicionamento específico do paciente ¹¹, embora nenhum estudo tenha abordado o efeito do posicionamento do paciente nas taxas de sucesso dos bloqueios do plexo braquial, o posicionamento é um preditor de sucesso ou falha na anestesia neuraxial ¹². Não existe razão para acreditar que o posicionamento incorreto do paciente não possa afetar a taxa de sucesso da anestesia do plexo braquial.

Os fatores acima mencionados que afetam as taxas de sucesso da anestesia do plexo braquial podem afetar as curvas de aprendizado dos novatos. Por esse motivo, o método da soma cumulativa da curva de aprendizado ajustada a probabilidade de falha RA-LC-CUSUM parece atraente como ferramenta de monitoramento durante a fase de aprendizado da anestesia do plexo braquial.

Os métodos ajustados a probabilidade de falha tem sido usado com sucesso para explorar variações nas taxas de desempenho individuais e institucionais ³⁶. O ajuste de risco é feito incorporando a probabilidade de falha derivada de modelos logísticos no teste de log verossimilhança que determina o peso a ser adicionado ao

valor anterior da soma cumulativa. Assim, altas probabilidades de falha diminuem o peso em caso de falha, evitando penalizações indevidas à curva de desempenho. No entanto, a baixa probabilidade de falha aumenta a penalização em caso de falha inesperada^{37,38}. Após definir a probabilidade de falha relacionado a esses fatores, a curva de aprendizado é construída através do método ajustado RA-LC-CUSUM, sendo o desvio da performance adequada expressado como razão de chances da falha (θ). Considerando que a performance foi considerada adequada (p_{0t}), o risco de falha para um determinado procedimento (t), pode ser definido como $(\theta p_{0t} / (1-p_{0t} + \theta p_{0t}))$, sendo (p_{0t}) o risco previsto de falha ou probabilidade. O valor do (p_{0t}) depende de ambos, se a performance foi adequada e das características de cada paciente ou procedimento. A construção de uma curva RA-LC-CUSUM é baseada nas seguintes fórmulas (11 e 12):

$$W_t = \log[(P_1^{X_t}(1-P_1)^{1-X_t})/(P_0^{X_t}(1-P_0)^{1-X_t})].$$

Rearranjando os termos:

$$\log(1 - p_{0t} + \theta p_{0t}), \text{ se } X_t = 0 \text{ (sucesso)} \quad (11)$$

$$\log(1 - p_{0t} + \theta p_{0t}) - \log \theta, \text{ se } X_t = 1 \text{ (falha)} \quad (12)$$

θ = razão de chances de falha

p_{0t} = probabilidade de falha

2.6. Condições para avaliar a acurácia do teste

O erro estatístico tipo I ocorre quando a taxa de falha cumulativa real é maior que a taxa de falha máxima aceitável no número de procedimentos em que a curva LC-CUSUM toca o limite de competência. Nesse caso, a curva LC-CUSUM sinalizou erroneamente, conferindo competência a um residente ainda não competente. Por outro lado, se a linha LC-CUSUM não atingir o limite de competência quando a taxa de reprovação real for igual ou menor que a taxa de reprovação máxima aceitável, um estado falso negativo, atribuído a condição de ainda não competente ao residente que cumpre o critério de competência.

O objetivo das linhas de soma cumulativa de ajuste de risco é minimizar as taxas de erro tipo I e II (probabilidades). A evidência estatística da eficácia do ajuste

de risco já foi fornecida para o teste CUSUM tradicional ¹⁵. Se o ajuste de risco aumenta a acurácia e afeta a probabilidade das taxas estatísticas de erros do tipo I ou II, do LC-CUSUM, ainda precisa ser estabelecido.

Como os residentes nunca são classificados como incompetentes, como no teste tradicional o SPRT-CUSUM, na LC-CUSUM apenas dois estados são atribuídos aos *residentes* durante a fase de aprendizagem: ainda não competente ou competente. A sensibilidade do teste (taxa de verdadeiro positivo) e especificidade (taxa de verdadeiro negativo) e as probabilidades reais de erro tipo I e II podem ser facilmente calculadas usando fórmulas padrão. As taxas de erro tipo I e II dependem do limite de competência (h) ⁹, assim como a acurácia do teste LC-CUSUM depende também da escolha adequada dos parâmetros p_0 (taxas inaceitáveis de falha) e p_1 (taxas aceitáveis de falha) ¹⁴.

Tabela 1: condições para avaliar a acurácia do método.

	Competente	Ainda não competente
Taxa de falha \leq taxa de falha alvo (p_1)	VP	FN
Taxa de falha $>$ taxa de falha desejada (p_1)	FP	VN

Fonte: Elaborado pelo autor

O número de procedimentos disponíveis também afeta as taxas de erro tipo I e II. Desde que longas sequências de procedimentos sejam analisadas, todos os residentes podem ser considerados competentes por acaso. Assim, à medida que o número de observações aumenta, a verdadeira taxa de erro tipo I tende a zero, de modo que menos residentes verdadeiramente competentes falharão em atingir a competência do teste. Em contraste, a verdadeira taxa de erro do tipo II tende a um, uma vez que mais treinandos verdadeiramente não competentes acabarão alcançando a competência do teste ¹⁴. Assim, a escolha de parâmetros para monitorar o desempenho dos residentes em um determinado procedimento depende de uma compensação entre o número de procedimentos disponíveis, as taxas de insucesso aceitáveis nas hipóteses nula (p_0) e alternativa (p_1) e, conseqüentemente, o limite de competência (h).

Em relação ao método LC-CUSUM, as taxas de falha alvo (p_1) são estabelecidas por consenso de especialistas, taxas de falha institucional, da literatura ou por simulação computacional 4,39. A taxa de falha inaceitável sob a hipótese nula

(p_0) e o limite de competência h são escolhidos como os valores relacionados ao número de procedimentos, associados às menores taxas de erros tipo I e II ⁴⁰⁻⁴².

2.7 Objetivo geral

Analisar as curvas de aprendizado individuais de médicos residentes de anestesiologia.

2.8 Objetivos específicos

Comparar os dois métodos de análise sequencial quanto a acurácia em determinar o número mediano de bloqueios de plexo braquial realizados por residentes em anestesia, até atingir uma meta mínima de taxa de sucesso.

2 MÉTODO

O presente estudo está em conformidade com a declaração *Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE)* e foi aprovado pela Comitê de Ética em Pesquisa em Humanos (CEPH) do Hospital Governador Celso Ramos sob o número de Certificado de Apresentação de Apreciação Ética (CAAE) 42224821.2.0000.5360. Após a liberação do CEPH e obtenção do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) dos participantes, os dados de 1.720 bloqueios do plexo braquial realizados por 35 residentes de anestesiologia do segundo (R2) e terceiro (R3) ano, foram coletados retrospectivamente de um banco de dados anônimo, que foi criado para monitorar o desempenho dos residentes durante o período de residência, no período de março de 2008 a outubro de 2013.

Os dados foram autorrelatados pelos próprios médicos residentes e usados para avaliação e *feedback* formativo e sem julgamento dos residentes de segundo e terceiro ano (R2 e R3), que estavam no programa de treinamento nesse período de 2008 a 2013. Eles foram totalmente instruídos sobre os critérios usados para classificar a qualidade das referências anatômicas, posicionamento do paciente e resultados do bloqueio (sucesso ou falha). Além disso, a qualidade dos dados foi assegurada pela verificação da consistência do software e verificada periodicamente durante as sessões de *feedback* individuais. Para este estudo, foram levantados os

seguintes dados dos procedimentos realizados pelos residentes: o número sequencial do bloqueio, a abordagem do plexo braquial (supraclavicular, infraclavicular ou axilar), o método de identificação das estruturas (neuroestimulação ou ultrassom), a qualidade dos referências anatômicas (facilmente ou dificilmente palpáveis para bloqueios realizados por neuroestimulação; sonoanatomia precisa ou imprecisa para bloqueios realizados por ultrassom), adequação do posicionamento do paciente para o bloqueio (adequado ou inadequado), tempo em meses desde a admissão do residente no programa de treinamento até a data do bloqueio e se houve ou não supervisão direta. O bloqueio foi classificado como um sucesso (resultado= 0) se a perda de sensibilidade aos estímulos de picada de agulha estivesse presente nos territórios cutâneos do nervo terminal antes da incisão da pele e nenhum bloqueio adicional do nervo ou anestesia geral fosse necessário para concluir a cirurgia. Caso contrário os bloqueios foram classificados como falha (resultado= 1), também foram considerados como falhas se complicações relacionadas ao bloqueio (por exemplo, toxicidade do anestésico local) causassem o adiamento do procedimento cirúrgico

Determinação do limite de proficiência para a curva LC-CUSUM:

Antes de construir as curvas de aprendizado dos residentes, o limite de proficiência (h) para o LC-CUSUM foi determinado por simulações matemáticas. Amostras simuladas de 10.000 residentes realizando 50 procedimentos cada, foram criadas usando uma rotina "*Visual Basic for Applications*" (VBA) no Microsoft Excel® (Microsoft Corporation, Redmond, VA, EUA). Para simular o desempenho foram observadas as Taxas de sucesso a cada 10 procedimentos durante os primeiros 50 realizados por residentes reais na amostra do estudo. Assim, as taxas de sucesso foram de 84% para os primeiros dez procedimentos, 90% para os procedimentos 11 a 20, 88% para os procedimentos 21 a 30, 93% para os procedimentos 31 a 40 e 95% para os procedimentos 41 a 50. Para estimar o limite h , as simulações foram repetidas interativamente ajustando as probabilidades de taxas de falha aceitáveis (p_1) em incrementos de 1% começando em $p_1 = 0,02$ com p_0 fixo= $2p_1$ e ajustando os valores h em incrementos de 0,05 começando em $h = -2$. Após cada execução, as taxas de erro tipo I e II foram estimadas comparando a taxa de sucesso real quando a curva LC-CUSUM do residente simulado individual cruzou o limite h partindo de cima. Conseqüentemente, a sequência LC-CUSUM recebeu erro tipo I se a taxa de sucesso cumulativa fosse menor que $(1-p_0)$ (desempenho inadequado) e a curva atingiu o

limite de decisão (h). O erro tipo II foi atribuído quando a taxa de sucesso cumulativa foi igual ou superior a $(1-p_0)$ ao final da sequência de Bernoulli (desempenho adequado), mas a curva não atingiu o limite de decisão h . As taxas de erro tipo I e II foram calculadas como o número médio de sequências LC-CUSUM designadas como casos de erro tipo I ou II. O valor final de (h) e o número médio de procedimentos até a proficiência, na construção das curvas LC-CUSUM, para os residentes da amostra do estudo foram definidos após a obtenção de taxas de erro tipo I e II iguais ou inferiores a 10%, dentro de uma duração média entre 20 e 30 procedimentos, o número de procedimentos necessários para uma decisão.

Uma curva LC-CUSUM descendente foi construída para cada residente na amostra do estudo, calculando sequencialmente as pontuações $S_t = \min(0, S_{t-1} - W_t)$ com base nas sequências individuais de sucesso/falha do residente (X_t), sendo $X_t = 0$ para sucesso ou $X_t = 1$ para uma falha. Assim, S_t começava em 0 e diminuía se $X_t = 0$ ou aumentava $X_t = 1$ por um peso correspondente ao logaritmo da razão de verossimilhança (W_t), sendo $p_0 = 30\%$ a taxa de falha aceitável sob a hipótese nula (desempenho inadequado) e $p_1 = 15\%$ a taxa de falha esperada (a hipótese alternativa).

Para residentes cujas curvas LC-CUSUM atingiram a barreira de proficiência $h = -2,9$, foi iniciado um gráfico de controle SPRT CUSUM, a partir do zero, conforme a seguinte fórmula: $S_t = \max(0, S_{t-1} - s)$, para sucesso ou $S_t = \max(0, S_{t-1} + (1 - s))$, em caso de falha.

Os parâmetros para as curvas CUSUM-SPRT foram: p_0 (agora, a taxa de falha aceitável) = 0,15 e p_1 (agora, a taxa de falha inaceitável) = 0,3, taxa de erro tipo I (α) e taxa de erro tipo II (β) = 0,1. Esses parâmetros foram usados para estimar o peso (s) e o limite de redefinição de ineficiência (h_1). A curva foi mantida plana definindo uma barreira de absorção em zero para sucessos, de modo que apenas a deterioração do desempenho fosse detectada pelo monitoramento CUSUM-SPRT unilateral, após a proficiência ter sido alcançada de acordo com o método LC-CUSUM. Deslocamentos para cima detectariam a deterioração do desempenho na curva CUSUM-SPRT, atingindo um limite de redefinição de ineficiência (h_1) definido em 2,47. As fórmulas para cálculos LC-CUSUM e CUSUM-SPRT estão disponíveis no Apêndice A e B.

Definição de parâmetros para ajuste de risco RA-LC-CUSUM:

Os preditores de falha da anestesia do plexo braquial foram identificados através de regressão logística com eliminação retrógrada começando com as seguintes variáveis independentes: número sequencial do bloqueio do residente, abordagem do plexo braquial (variáveis binárias para abordagem supraclavicular, infraclavicular ou axilar), método para identificação de estruturas neurais (neuroestimulação ou ultrassom), qualidade dos referências anatômicas (boa ou ruim), adequação do posicionamento do paciente para o bloqueio (adequado ou inadequado) e dias desde a admissão do residente até a data do bloqueio. O resultado do bloqueio (falha) foi utilizado como variável dependente para o modelo. O ajuste do modelo foi avaliado de acordo com o teste de Hosmer & Lemeshaw. As previsões baseadas no modelo final foram usadas como a probabilidade prevista de falha para cada bloqueio e inseridas nos cálculos de soma cumulativa da curva de aprendizado ajustada a probabilidade de falha. A razão de chances para falha (2,43) foi estimada a partir das taxas de falha aceitáveis ($p_1 = 0,15$) e não aceitáveis ($p_0 = 0,30$) assumidas neste estudo. Para permitir a comparação direta, o limite (h) foi definido com o mesmo valor estimado para o método LC-CUSUM. As fórmulas para RA-LC-CUSUM estão disponíveis no Apêndice C.

Comparações entre os métodos LC-CUSUM e RA-LC-CUSUM:

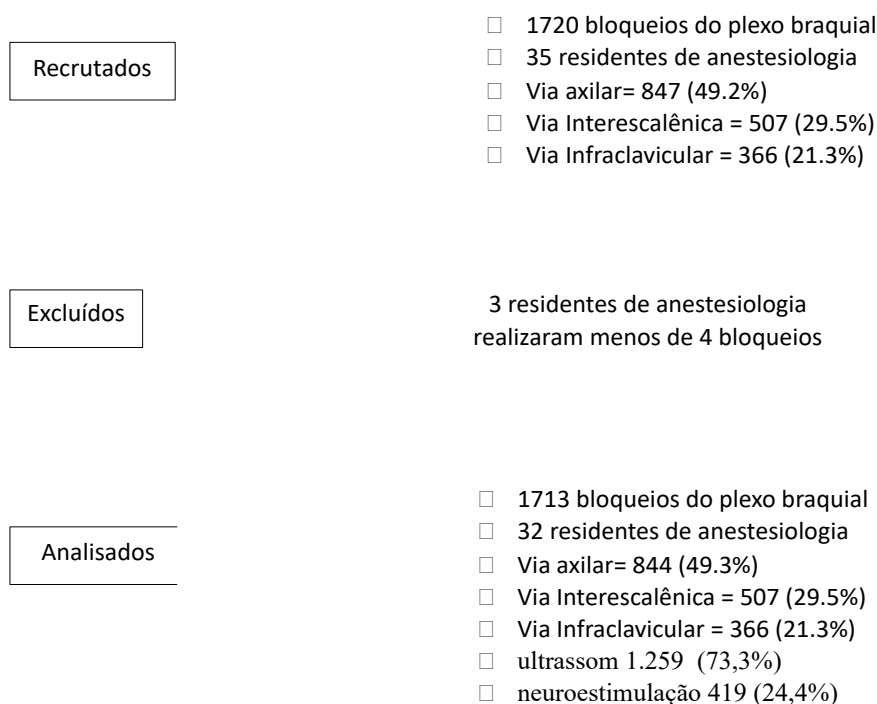
Os parâmetros derivados de ambos os métodos, como: o número de residentes que atingiram a competência, o número de bloqueios até atingir o limite de competência (h) e taxas reais de sucesso ao atingir o limite de competência. Foram comparados usando o teste de posto sinalizado de pares combinados de Wilcoxon.

Para comparar a acurácia diagnóstica entre os testes em relação à competência do residente, LC-CUSUM e RA-LC-CUSUM foram comparados com a taxa de sucesso cumulativa real ao cruzar o limite de competência (h), para residentes diagnosticados como competentes ou a taxa de falha real no final da sequência de procedimentos, para aqueles diagnosticados como ainda não competentes. Assim, para residentes cujas linhas CUSUM cruzaram o limite de competência, verdadeiro positivo foi atribuído ao caso se a taxa de sucesso real fosse igual ou maior que a taxa de sucesso alvo ($1-p_0$) ou um falso positivo se a taxa de sucesso real fosse menor que ($1-p_0$). Para residentes cujas curvas não atingiram o limite de competência, verdadeiro negativo foi atribuído ao caso se a taxa real de sucesso no final da sequência do bloco fosse menor que ($1-p_0$) ou um falso negativo se a taxa real de sucesso fosse igual ou

maior que $(1-p_0)$, dentro do comprimento mínimo estimado para evitar a atribuição de competência após um pequeno número de sucessos consecutivos, o que pode ter ocorrido por acaso. As razões de log-verossimilhança de sensibilidade e especificidade para diagnósticos positivos e negativos foram comparadas usando o teste exato de McNemar-Mosteller.

3 RESULTADOS

Figura 3: Fluxograma



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram recrutados 35 médicos residentes que realizaram 1720 bloqueios do plexo braquial, sendo que 3 médicos residentes realizaram menos do que 4 bloqueios, sendo assim foram analisados 1.713 Bloqueios do Plexo Braquial, realizados por 32 Médicos, um total de 844 (49,2%) por via axilar, 507 (29,5%) por via interescalênica e 366 (21,3%) por via infraclavicular. As taxas de falha diferiram entre as abordagens (axilar = 6,6%, interescalênico = 9,3% e infraclavicular = 17,2%) (qui-quadrado (2 d.f.) = 33,06; $p < 0,001$). A taxa geral de falha foi de 9,7%, a orientação por ultrassom foi usada em 1.259 bloqueios (73,3%) e neuroestimulação em 419 (24,4%). A taxa de

supervisão direta foi de 96%, a mediana do número de bloqueios por MR foi de 48 com (IQR = 26 – 78). A mediana do período em meses desde a admissão na residência foi de 23 meses (IQR=17– 28).

Aplicando o método LC-CUSUM, 24/32 residentes (75%) atingiram a competência após uma mediana de 19 bloqueios (IQR = 14 – 24). A taxa mediana de sucesso ao atingir o limite de competência foi de 93% (IQR = 86% – 100%). As curvas de oito residentes não atingiram o limite de competência (h) após uma mediana de 26 bloqueios (IQR = 17,25 – 34,75). Com ajuste para a probabilidade de falha (RA-LC-CUSUM), 15 residentes (47%) foram diagnosticados como competentes após uma mediana de 32 bloqueios (IQR = 27 – 53). A taxa mediana de sucesso ao atingir o limite de competência foi de 93% (IQR = 89% – 95%) (Tabela 2).

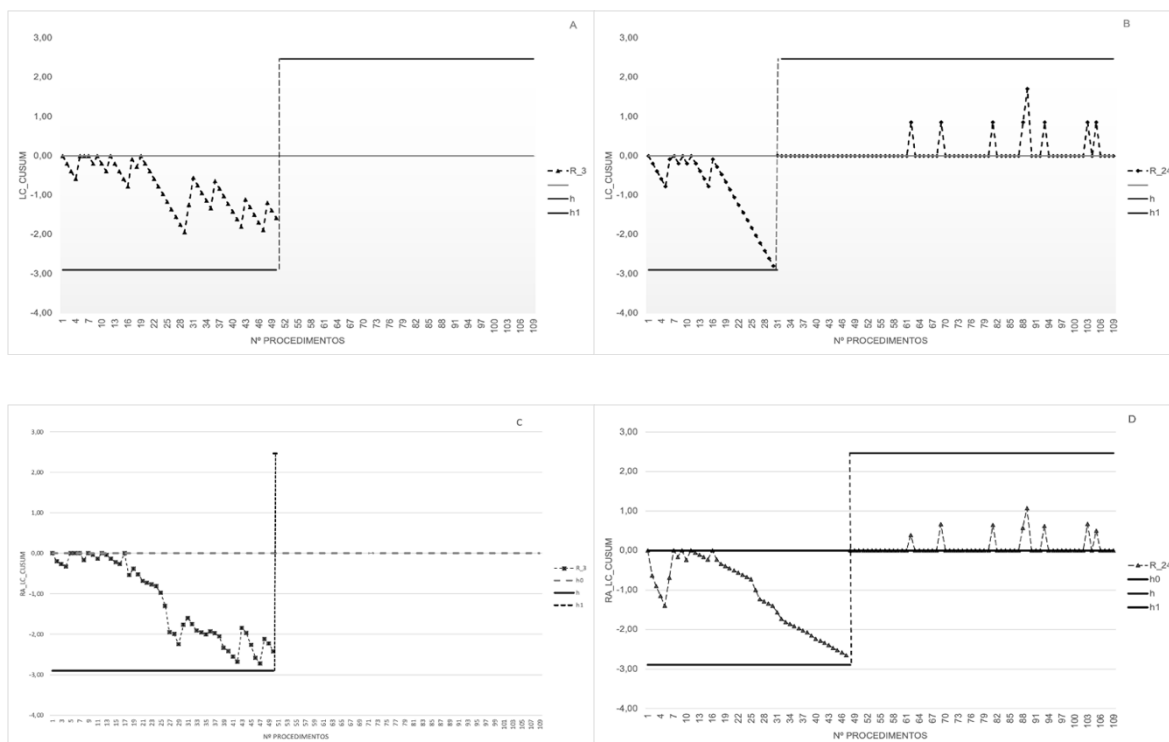
Tabela 2: Comparando os métodos na identificação de residentes competentes, taxa de sucesso e nº de bloqueios até atingir a competência, considerando o nível de significância $p < 0,05$.

	LC-CUSUM	RA-LC-CUSUM	p
<i>Atingiram a competência</i>	24 (75%)	15 (47%)	0,021
<i>Número de bloqueios até atingir a competência – mediana (IQR)</i>	19 (14 - 24)	32 (27 - 53)	0,001
<i>Taxa de sucesso até atingir a competência – mediana (IQR)</i>	0,93 (0,86 – 1,0)	0,93 (0,89 – 0,95)	0,136

Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas de 17 residentes não atingiram o limite de competência após uma mediana de 29 bloqueios (IQR = 21 – 32). Na figura 3 estão ilustradas as curvas de aprendizado de dois médicos residentes pelos métodos LC_CUSUM e RA_LC_CUSUM. O residente de número 3 (R3) não atingiu o nível de competência pré-determinado, mesmo tendo realizado 50 procedimentos (gráficos A e C). Já o residente de número 24 (R24), atingiu a competência no 31º procedimento quando monitorado pelo método LC_CUSUM e no 49º procedimento quando monitorado pelo método RA_LC_CUSUM, realizando o total de 108 procedimentos e foi possível identificar que ele não perdeu o seu nível de performance (gráficos B e D).

Figura 4: Ilustração das curvas de aprendizado de dois médicos residentes, quando monitorado pelo método LC-CUSUM o residente (R_3) não atinge a competência com 50 procedimentos gráfico (A) e o residente (R_24) atinge a competência com 31 procedimentos gráfico (B). Pelo método RA-LC-CUSUM o residente (R_3) novamente não atinge a competência gráfico (C) e o residente (R_24) atinge a competência agora com 49 procedimentos, conseguindo manter a sua performance até o 108º procedimento.



Fonte: Elaborado pelo autor

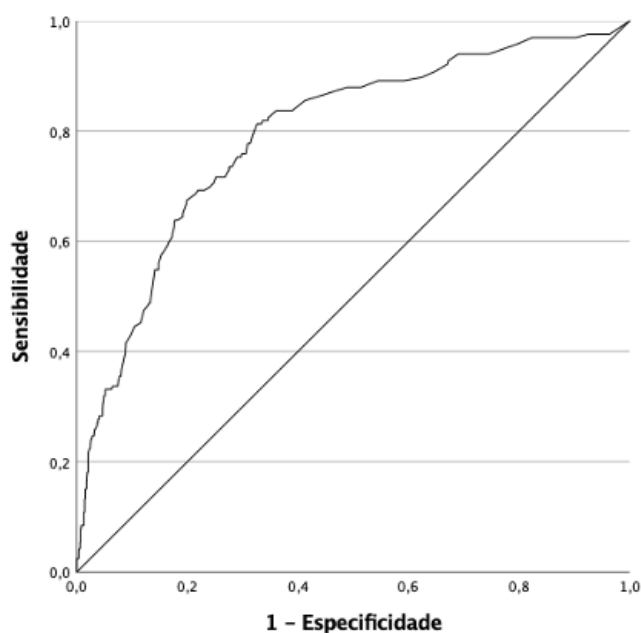
O modelo logístico usado para ajustar os pesos para o método RA-LC-CUSUM incluiu os seguintes preditores independentes de falha no bloqueio do plexo braquial: número de meses em treinamento (OR 0,97; IC 95% 0,95 a 0,99; $p = 0,01$); neuroestimulação versus orientação por ultrassom (OR 3,66; IC 95% 2,5 a 5,37 $p < 0,001$); o número de punções cutâneas (OR 2,02; IC 95% 1,56 a 2,61; $p < 0,001$); referências anatômicas imprecisas (OR 3,89; IC 95% 2,41 a 6,32; $p < 0,001$) e posição inadequada do paciente (OR 2,35; IC 95% 1,18 a 4,7; $p = 0,01$) e acesso infraclavicular (OR 1,47; IC 95% 1 a 2,18; $p = 0,05$). Os dados se ajustaram ao modelo (Hosmer & Lemeshaw qui-quadrado (8 d.f.) = 14,87; $p = 0,06$) e a área sob a curva ROC foi de 79% (IC 95% = 76% – 83%; $p < 0,001$), Tabela 3; Figura 4.

Tabela 3: Preditores independentes de falha em bloqueios do plexo braquial.
Nível de significância $p < 0,05$.

Preditores de falha	OR (IC 95%)	P
Número de meses em treinamento	0,97 (0,95 – 0,99)	P=0,01
Neuroestimulação versus ultrassom	3,66 (2,5 – 5,37)	$p < 0,001$
Número de punções na pele	2,02 (1,56 – 2,61)	$p < 0,001$
Referencias anatômicas imprecisas	3,89 (2,41 – 6,32)	$p < 0,001$
Posicionamento inadequado do paciente	2,35 (1,18 – 4,7)	P= 0,01
Acesso infraclavicular	1,47 (1 – 2,18)	P= 0,05

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5: Área sob a curva de ROC (AUC) para o modelo ajustado RA-LC-CUSUM foi de 79% IC95% (75% a 83%); $p < 0,001$



Fonte: Elaborado pelo autor

A sensibilidade estimada de LC-CUSUM foi de 85% com (IC 95% de 67,3% a 96%) comparada a do RA-LC-CUSUM que foi de 53% (IC 95% de 33,9% a 72,5%), uma diferença proporcional de 32% resultando em um $p = 0,0039$. Ao comparar a especificidade estimada de LC-CUSUM de 100% com (IC 95% de 39,8% a 100%) e pelo método RA-LC-CUSUM foi de 100% com (IC 95% de 39,8% a 100%), resultando em um $p = 1$.

A mediana das taxas de sucesso dos bloqueios realizados pelos residentes após a sinalização de competência no LC-CUSUM foi de 93,66% com (IQR de 87,85% a 96,75%) e no método RA-LC- CUSUM, a taxa mediana de sucesso foi de 94,88% com (IQR de 89,3% a 97,34%) resultando em um valor de $p = 1$, Tabela 4.

Tabela 4: Comparação dos testes em relação a acurácia. Considerando nível de significância $p < 0,05$

	LC-SUSUM	RA-LC-CUSUM	p
<i>Sensibilidade estimada</i>	85 % IC 95% (67,3 – 96)	53% IC 95%(33,9 – 72.5)	0,0039
<i>Especificidade estimada</i>	100 % IC 95% (39,8 – 100)	100 % IC 95% (39,8 – 100)	1
<i>Mediana da taxa de sucesso após atingir a competência</i>	93,66% (IQR = 87,85% - 96,75%)	94,88% (IQR=89,3– 97,34)	1

Fonte: Elaborado pelo autor

4 DISCUSSÃO

Este estudo teve como objetivo comparar a acurácia do método da soma cumulativa para curvas de aprendizado (LC-CUSUM) em relação ao método ajustado pela probabilidade de falha (RA-LC-CUSUM), em determinar o número mediano de bloqueios de plexo braquial necessário para que residentes de anestesiologia atinjam taxa de falha menor ou igual a 15% . Os principais achados foram que o número de bloqueios até que os residentes atingissem a competência foi menor quando estimado pelo método LC-CUSUM do que quando estimado pelo método RA-LC-CUSUM. Além disso, embora compartilhando especificidade semelhante, o método LC-CUSUM foi associado a maior sensibilidade do que sua contraparte ajustada ao risco.

Poucos estudos abordaram as curvas de aprendizado em bloqueios do plexo braquial, embora controverso curvas de aprendizado mais curtas (10 a 25 bloqueios) foram descritas para o bloqueio do nervo axilar guiado por ultrassom, em comparação com a neuroestimulação (25 a 30 bloqueios) para atingir uma taxa de sucesso cumulativa de 80% ^{43,44}. Além disso, para os anestesiológicos já familiarizados com os bloqueios do plexo braquial guiados por neuroestimulação, foram necessários 15 bloqueios para produzir taxas de sucesso acima de 85% ^{35,43}. A maioria dos bloqueios nesta série foi guiada por ultrassom, sendo a abordagem axilar a mais utilizada, de modo que a mediana do número de bloqueios até a proficiência se aproximou dos valores publicados, quando extraídos das curvas LC-CUSUM³⁵. Embora as taxas de sucesso tenham diferido entre os bloqueios axilar, interescalênico e infraclavicular, apenas o acesso infraclavicular ao plexo braquial foi identificado como um preditor de falha com significância marginal, mas contribuiu para o ajuste do modelo logístico.

De qualquer forma, os residentes que obtiveram competência mantiveram altas taxas de sucesso durante o acompanhamento pós-competência. Esta descoberta fornece mais evidências para a confiabilidade dos métodos LC e RA-LC-CUSUM na identificação do ponto a partir do qual nenhuma deterioração adicional do desempenho é esperada.

Em estudos prévios as taxas de sucesso no final do treinamento em bloqueios do plexo braquial variaram entre 80 e 90% e a orientação por ultrassom e o número de bloqueios afetaram as taxas máximas de sucesso alcançadas e a inclinação das curvas de aprendizado dos residentes^{10,13}, coincidindo com os achados no presente

estudo. As taxas de sucesso também dependem da abordagem do plexo braquial e do número de injeções, que impactam na exposição de troncos, fascículos e nervos terminais à solução de anestésico local ^{10,45}. Diferentes abordagens para o plexo braquial demandam posicionamento específico do paciente ^{46,47}. Embora nenhum estudo tenha abordado o efeito do posicionamento nas taxas de sucesso dos bloqueios do plexo braquial, o posicionamento demonstrou ser um preditor de sucesso ou falha na anestesia neuroaxial ²⁹. No presente estudo foram identificados como preditores de falha na realização dos bloqueios de plexo: a baixa experiência do residente definido pelo número de meses em treinamento; uso da neuroestimulação no lugar da ultrassonografia como método de identificação das estruturas; número de punções na pele; referências anatômicas imprecisas e posicionamento inadequado do paciente.

Como o ajuste de risco afeta a inclinação do gráfico LC-CUSUM, podem ocorrer diferenças substanciais entre as curvas de aprendizado não ajustadas e ajustadas a riscos de falha, impactando a quantidade de erros do tipo I e II na atribuição de competência aos residentes. Os métodos da soma cumulativa da curva de aprendizado ajustada ao risco de falha tem sido enfatizado em estudos prévios, possibilitando uma estratégia de monitorização mais realística⁴⁸⁻⁵⁰. No entanto, a acurácia do ajuste de risco depende da robustez do modelo logístico utilizado para estimar as probabilidades de insucesso de cada procedimento, o que deve ser incluído na estimativa cumulativa de peso.

Neste estudo a capacidade preditiva do modelo logístico utilizado para ajustar os pesos de LC-CUSUM na sequência de bloqueios de cada residente, embora significativa, situou-se na faixa moderada. É possível que tenha ocorrido sub ou superestimação nas taxas de falha previstas, causando pesos espúrios. Além disso, o valor da barreira de competência (h) foi baseado em simulações LC-CUSUM não ajustadas. Esta decisão foi propositalmente tomada para permitir a comparação direta entre os métodos, conforme sugerido em outro artigo ¹⁴.

Os resultados deste estudo devem ser interpretados levando em consideração suas limitações. Em primeiro lugar, os dados referem-se a residentes em uma única instituição podem ter causado as altas taxas de sucesso observadas neste estudo. Em segundo lugar, os dados autorrelatados podem estar contaminados por viés de informação. Por outro lado, na instituição em que o estudo foi realizado, o

feedback formativo periódico com base na análise da curva de aprendizado foi uma estratégia de ensino característica do programa. Os residentes foram instruídos sobre os critérios para classificar todos os atributos do paciente (por exemplo, a qualidade dos pontos anatômicos e o posicionamento do paciente) e critérios claros para sucesso e falha eram amplamente conhecidos, essas entradas características situacionais podem ter diminuído a chance de viés de autorrelato ter contaminado nossos dados.

6 CONCLUSÃO

O número de bloqueios que os médicos residentes realizaram até atingir o nível de competência foi menor quando analisados pelo método LC-CUSUM, permitindo diagnósticos confiáveis da competência do residente em anestesia do plexo braquial e sua acurácia é maior sem ajuste ao risco de falha previsto por um modelo logístico moderadamente preditivo.

REFERÊNCIAS

1. Kestin IG. A statistical approach to measuring the competence of anaesthetic trainees at practical procedures. *Br J Anaesth*. 1995 Dec;75(6):805–9.
2. Wald A. Sequential Tests of Statistical Hypotheses. In: Kotz S, Johnson NL, editors. *Breakthroughs in Statistics: Foundations and Basic Theory* [Internet]. New York, NY: Springer New York; 1992. p. 256–98. Available from: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0919-5_18
3. Bould MD, Crabtree NA, Naik VN. Assessment of procedural skills in anaesthesia. *Br J Anaesth*. 2009 Oct 1;103(4):472–83.
4. de Oliveira Filho GR. The construction of learning curves for basic skills in anesthetic procedures: an application for the cumulative sum method. *Anesth Analg*. 2002 Aug;95(2):411–6, table of contents.
5. Dexter F, Ledolter J, Hindman BJ. Bernoulli Cumulative Sum (CUSUM) control charts for monitoring of anesthesiologists' performance in supervising anesthesia residents and nurse anesthetists. *Anesth Analg*. 2014 Sep;119(3):679–85.
6. Norris A, McCahon R. Cumulative sum (CUSUM) assessment and medical education: a square peg in a round hole: Editorial. *Anaesthesia*. 2011 Apr;66(4):250–4.
7. Biau DJ, Porcher R, Salomon LJ. CUSUM: a tool for ongoing assessment of performance. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2008;31(3):252–5.
8. Biau D, Porcher R. LC-CUSUM test. *Anaesthesia*. 2010 Jul;65(7):755–6.
9. Biau DJ, Williams SM, Schlup MM, Nizard RS, Porcher R. Quantitative and individualized assessment of the learning curve using LC-CUSUM. *Br J Surg*. 2008 Jul;95(7):925–9.
10. de Filho GR, Gomes HP, da Fonseca MH, Hoffman JC, Pederneiras SG, Garcia JH. Predictors of successful neuraxial block: a prospective study. *Eur J Anaesthesiol*. 2002 Jun;19(6):447–51.
11. Ranganath A, Srinivasan KK, Iohom G. Ultrasound guided axillary brachial plexus block. *Med Ultrason*. 2014 Sep;16(3):246–51.
12. Duce NA, Gillett L, Descallar J, Tran MT, Siu SCM, Chuan A. Visuospatial ability and novice brachial plexus sonography performance. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2016 Sep;60(8):1161–9.

13. Luyet C, Constantinescu M, Waltenspul M, Luginbuhl M, Vogelín E. Transition from nerve stimulator to sonographically guided axillary brachial plexus anesthesia in hand surgery: block quality and patient satisfaction during the transition period. *J Ultrasound Med*. 2013 May;32(5):779–86.
14. Sims AJ, Keltie K, Burn J, Robson SC. Assessment of competency in clinical measurement: comparison of two forms of sequential test and sensitivity of test error rates to parameter choice. *Int J Qual Health Care*. 2013;25(3):322–30.
15. Steiner SH, Cook RJ, Farewell VT, Treasure T. Monitoring surgical performance using risk-adjusted cumulative sum charts. *Biostatistics*. 2000 Dec;1(4):441–52.
16. Jin R, Grunkemeier GL, Furnary AP. Continuous Monitoring of Risk-Adjusted Outcomes: Excess Deaths vs Lives Saved. *Ann Thorac Surg*. 2021 Aug;112(2):368–72.
17. Wittenberg P. Modeling the patient mix for risk-adjusted CUSUM charts. *Stat Methods Med Res*. 2022 May;31(5):779–800.
18. Swing SR. The ACGME outcome project: retrospective and prospective. *Med Teach*. 2007 Jan;29(7):648–54.
19. Ambardekar AP, Walker KK, McKenzie-Brown AM, Brennan K, Jackson C, Edgar L, et al. The Anesthesiology Milestones 2.0: An Improved Competency-Based Assessment for Residency Training. *Anesth Analg*. 2021 Aug;133(2):353–61.
20. Dreyfus SE, Dreyfus HL. A Five-Stage Model of the Mental Activities Involved in Directed Skill Acquisition: [Internet]. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center; 1980 Feb [cited 2023 Feb 6]. Available from: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA084551>
21. Peña A. The Dreyfus model of clinical problem-solving skills acquisition: a critical perspective. *Med Educ Online*. 2010 Jun 14;15. doi: 10.3402/meo.v15i0.4846. PMID: 20563279; PMCID: PMC2887319.
22. The Accreditation Council for Graduate Medical Education. Anesthesiology Milestones [Internet]. The Accreditation Council for Graduate Medical Education; 2020 [cited 2023 Mar 18]. Available from: <https://www.acgme.org/globalassets/PDFs/Milestones/AnesthesiologyMilestones2.0.pdf>

23. Neuburger J, Walker K, Sherlaw-Johnson C, van der Meulen J, Cromwell DA. Comparison of control charts for monitoring clinical performance using binary data. *BMJ Qual Saf.* 2017 Nov;26(11):919–28.
24. Van Der Vleuten C. The assessment of professional competence: Developments, research and practical implications. *Adv Health Sci Educ Theory Pract.* 1996 Jan;1(1):41—67.
25. Wald A, Wolfowitz J. Optimum Character of the Sequential Probability Ratio Test. *Ann Math Stat.* 1948;19(3):326–39.
26. Cairo SB, Craig W, Gutheil C, Han PKJ, Hyrkas K, Macken L, et al. Quantitative Analysis of Surgical Residency Reform: Using Case-Logs to Evaluate Resident Experience. *J Surg Educ.* 2019;76(1):25–35.
27. Thanawala R, Jesneck J, Shelton J, Rhee R, Seymour NE. Overcoming Systems Factors in Case Logging with Artificial Intelligence Tools. *J Surg Educ.* 2022;79(4):1024–30.
28. Fitzpatrick R, Paterson NR, Watterson J, Seabrook C, Roberts M. Development and implementation of a mobile version of the O-SCORE assessment tool and case log for competency-based assessment in urology residency training: An initial assessment of utilization and acceptance among residents and faculty. *Can Urol Assoc J J Assoc Urol Can.* 2019 Feb;13(2):45–50.
29. Oliveira Filho GR de, Pederneiras SG, Garcia JHS. Uso da soma cumulativa dos desvios para avaliação da proficiência no ensino do bloqueio subaracnóideo. *Rev Bras Anesthesiol.* 2001 Jun;51(3):208–17.
30. Altun D, Ozkan-Seyhan T, Camci E, Sivrikoz N, Orhan-Sungur M. Learning Curves for Two Fiberscopes in Simulated Difficult Airway Scenario With Cumulative Sum Method. *Simul Healthc J Soc Simul Healthc.* 2019 Jun;14(3):163–8.
31. Biau DJ, Porcher R. A method for monitoring a process from an out of control to an in control state: Application to the learning curve. *Stat Med.* 2010 Aug 15;29(18):1900–9.
32. Woodall WH. The Distribution of the Run Length of One-Sided CUSUM Procedures for Continuous Random Variables. *Technometrics.* 1983;25(3):295–301.
33. Grau T, Bartussek E, Conradi R, Martin E, Motsch J. Ultrasound imaging improves learning curves in obstetric epidural anesthesia: a preliminary study. *Can J Anesth.*

34. Rueda Rojas VP, Meléndez Flórez HJ, Orozco Galvis E. Análisis del entrenamiento previo con modelos simulados en el porcentaje de éxito del bloqueo supraclavicular guiado por ultrasonido. Estudio de cohorte prospectivo. *Rev Esp Anesthesiol Reanim.* 2019 May;66(5):241–9.

35. da Conceição DB, Helayel PE, de Oliveira Filho GR. A Comparative Study between Ultrasound and Neurostimulation Guided Axillary Brachial Plexus Block. *Braz J Anesthesiol.* 2009 Sep;59(5):585–91.

36. Grigg OA, Farewell VT, Spiegelhalter DJ. Use of risk-adjusted CUSUM and RSPRT charts for monitoring in medical contexts. *Stat Methods Med Res.* 2003 Apr;12(2):147–70.

37. Collins G, Le Manach Y. Multivariable risk prediction models: it's all about the performance. *Anesthesiology.* 2013 Jun;118(6):1252–3.

38. Chen TT, Chung KP, Hu FC, Fan CM, Yang MC. The use of statistical process control (risk-adjusted CUSUM, risk-adjusted RSPRT and CRAM with prediction limits) for monitoring the outcomes of out-of-hospital cardiac arrest patients rescued by the EMS system. *J Eval Clin Pr.* 20100830th ed. 2011 Feb;17(1):71–7.

39. Kestin IG. A statistical approach to measuring the competence of anaesthetic trainees at practical procedures. *Br J Anaesth.* 1995 Dec;75(6):805–9.

40. Durban M, Garcia D, Obradors A, Vernaev V, Vassena R. Are we ready to inject? Individualized LC-CUSUM training in ICSI. *J Assist Reprod Genet.* 20160316th ed. 2016 Aug;33(8):1009–15.

41. Biau DJ, Resche-Rigon M, Godiris-Petit G, Nizard RS, Porcher R. Quality control of surgical and interventional procedures: a review of the CUSUM. *Qual Saf Health Care.* 2007 Jun 1;16(3):203–7.

42. Sims AJ, Keltie K, Burn J, Robson SC. Assessment of competency in clinical measurement: comparison of two forms of sequential test and sensitivity of test error rates to parameter choice. *Int J Qual Health Care.* 2013 Jul 1;25(3):322–30.

43. Morros C, Perez-Cuenca MD, Sala-Blanch X, Cedo F. [Ultrasound-guided axillary brachial plexus block: learning curve and results]. *Rev Esp Anesthesiol Reanim.* 2011 Feb;58(2):74–9.

44. Barrington MJ, Gledhill SR, Kluger R, Clarke AL, Wong DM, Davidson H, et al. A Randomized Controlled Trial of Ultrasound Versus Nerve Stimulator Guidance for Axillary Brachial Plexus Block. *Reg Anesth Pain Med.* 2016 Dec;41(6):671–7.

45. Shmueli G, Cohen A. Run-Length Distribution for Control Charts with Runs and Scans Rules. *Commun Stat Theory Methods* Vol 32. 2003 Jan;No. 2:475–95.
46. Mian A, Chaudhry I, Huang R, Rizk E, Tubbs RS, Loukas M. Brachial plexus anesthesia: A review of the relevant anatomy, complications, and anatomical variations. *Clin Anat N Y N*. 2014 Mar;27(2):210–21.
47. Sk P, Sy L, Wh K, Hs P, Yj L, Jh B. Comparison of Supraclavicular and Infraclavicular Brachial Plexus Block: A Systemic Review of Randomized Controlled Trials. *Anesth Analg* [Internet]. 2017 Feb [cited 2023 Apr 5];124(2). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27828793/>
48. Poloniecki J, Valencia O, Littlejohns P. Cumulative risk adjusted mortality chart for detecting changes in death rate: observational study of heart surgery. *BMJ*. 1998 Jun 6;316(7146):1697–700.
49. Lovegrove J, Valencia O, Treasure T, Sherlaw-Johnson C, Gallivan S. Monitoring the results of cardiac surgery by variable life-adjusted display. *Lancet Lond Engl*. 1997 Oct 18;350(9085):1128–30.
50. Lovegrove J, Valencia O, Treasure T, Sherlaw-Johnson C, Gallivan S. Monitoring the results of cardiac surgery by variable life-adjusted display. *Lancet Lond Engl*. 1997 Oct 18;350(9085):1128–30.

APÊNDICE-A

Fórmulas para cálculo do SPRT-CUSUM:

$$h_0 = b/(P+Q) \quad (1)$$

$$h_1 = a/(P+Q) \quad (2)$$

$$a = \ln[(1 - \beta) / \alpha] \quad (3)$$

$$b = \ln[(1 - \alpha) / \beta] \quad (4)$$

$$P = \ln(p_1/p_0) \quad (5)$$

$$Q = \ln[(1-p_0)/(1-p_1)] \quad (6)$$

$$s = Q/(P + Q) \quad (7)$$

h_0 = define o limite inaceitável do gráfico CUSUM ou o Limite Superior de Controle (LSC)

h_1 = define o limite aceitável do gráfico CUSUM ou o Limite Inferior de Controle (LIC)

\ln = é o logaritmo natural da função designada

α = erro do Tipo I

β = erro do Tipo II

s = valor a ser subtraído do escore anterior em caso de sucesso no procedimento

$1-s$ = valor a ser somado ao escore anterior em caso de falha no procedimento

APÊNDICE-BFórmulas para cálculo do LC-CUSUM

$$S_t = \min(0, S_{t-1} - W_t) \quad (8)$$

$$W_S = \ln[(1-p_0)/(1-p_1)] \quad (9)$$

$$W_f = \ln(p_0/p_1) \quad (10)$$

p_0 = taxa inaceitável de falhas

p_1 = taxa aceitável de falhas

S_t = fórmula da LC-CUSUM

W_S = valor a ser subtraído do escore anterior (S_{t-1}) em caso de sucesso

W_f = valor a ser adicionado ao escore anterior (S_{t-1}) em caso de sucesso

APÊNDICE – C

Fórmulas para cálculo do RA LC CUSUM

$$W_t = \log[(P_1^{X_t}(1-P_1)^{1-X_t})/(P_0^{X_t}(1-P_0)^{1-X_t})].$$

Rearranjando os termos:

$$\log(1 - p_{0t} + \theta p_{0t}), \text{ se } X_t = 0 \text{ (sucesso)} \quad (11)$$

$$\log(1 - p_{0t} + \theta p_{0t}) - \log\theta, \text{ se } X_t = 1 \text{ (falha)} \quad (12)$$

θ = razão de chances de falha

p_{0t} = probabilidade de falha