v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DE VANCOMICINA: PANORAMA CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO, TENDÊNCIAS EMERGENTES E PERSPECTIVAS DE INOVAÇÃO

ANALYTICAL DETERMINATION OF VANCOMYCIN: SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL LANDSCAPE, EMERGING TRENDS, AND INNOVATION PERSPECTIVES

DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE VANCOMICINA: PANORAMA CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO, TENDENCIAS EMERGENTES Y PERSPECTIVAS DE INNOVACIÓN

Ana Flávia Souto Figueiredo Nepomuceno[1], Mariana Souto Figueiredo[2], Murilo de Jesus Porto[3], Edna Santana de Sena[4], Samantha Serra Costa[5], Liz Oliveira dos Santos[6]

e7119520
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9520

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

A determinação de vancomicina é relevante para aplicações clínicas, farmacêuticas e tecnológicas, demandando métodos analíticos adequados às diferentes finalidades de uso. Este estudo teve como objetivo realizar uma prospecção científica e tecnológica dos métodos empregados na determinação de vancomicina, identificando tendências e oportunidades de inovação. A produção científica publicada entre 2016 e 2025 foi analisada nas bases Scopus, Web of Science, PubMed/MEDLINE e ScienceDirect, e a prospecção patentária foi realizada no Espacenet, PATENTSCOPE e Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Foram incluídos 140 artigos. LC-MS/MS e UHPLC-MS/MS constituíram as técnicas mais frequentes (40,0%), seguidas por sensores e biossensores (26,4%) e HPLC com detectores convencionais (16,4%). Plasma e soro foram as principais matrizes analisadas (61,4%), e a monitorização terapêutica e aplicação clínica representaram a principal finalidade dos métodos (60,7%). A prospecção tecnológica evidenciou o avanço de sensores eletroquímicos, aptâmeros e sistemas miniaturizados direcionados à monitorização contínua. Em contraste, métodos colorimétricos e ferramentas baseadas em imagens digitais permaneceram pouco explorados, indicando oportunidades para inovação, especialmente no controle de qualidade farmacêutico. Conclui-se que o campo avança tanto para tecnologias integradas de monitorização terapêutica quanto para o desenvolvimento de plataformas analíticas simplificadas, acessíveis e sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Vancomicina. Métodos analíticos. Prospecção tecnológica. Monitorização terapêutica. Biossensores. Colorimetria por imagem digital.

ABSTRACT

Vancomycin determination is relevant for clinical, pharmaceutical, and technological applications, demanding analytical methods suitable for different purposes. This study aimed to conduct a scientific and technological survey of methods used in vancomycin determination, identifying trends and innovation opportunities. Scientific production published between 2016 and 2025 was analyzed in the Scopus, Web of Science, PubMed/MEDLINE, and ScienceDirect databases, and patent prospecting was carried out in Espacenet, PATENTSCOPE, and the National Institute of Industrial Property.

[1],[3] Doutorandos pelo Programa de Pós-Graduação em Farmácia da Universidade Federal da Bahia (UFBA).
[2] Mestre em Saúde Coletiva pela Universidade Federal da Bahia (UFBA).
[4] Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos da Universidade Federal da Bahia (UFBA).
[5] Doutora em Biotecnologia pelo Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia da Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO), pela Universidade Federal da Bahia (UFBA).
[6] Doutora em Química pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) e professora da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

140 articles were included. LC-MS/MS and UHPLC-MS/MS were the most frequent techniques (40.0%), followed by sensors and biosensors (26.4%) and HPLC with conventional detectors (16.4%). Plasma and serum were the main matrices analyzed (61.4%), and therapeutic monitoring and clinical application represented the main purpose of the methods (60.7%). Technological prospecting has highlighted the advancement of electrochemical sensors, aptamers, and miniaturized systems aimed at continuous monitoring. In contrast, colorimetric methods and digital image-based tools have remained underexplored, indicating opportunities for innovation, especially in pharmaceutical quality control. It is concluded that the field is advancing both towards integrated therapeutic monitoring technologies and towards the development of simplified, accessible, and sustainable analytical platforms.

KEYWORDS: *Vancomycin. Analytical methods. Technological prospecting. Therapeutic monitoring. Biosensors. Digital image colorimetry.*

RESUMEN
La determinación de vancomicina es relevante para aplicaciones clínicas, farmacéuticas y tecnológicas, lo que exige métodos analíticos adecuados para diferentes propósitos. Este estudio tuvo como objetivo realizar una prospección científica y tecnológica de los métodos utilizados en la determinación de vancomicina, identificando tendencias y oportunidades de innovación. La producción científica publicada entre 2016 y 2025 se analizó en las bases de datos Scopus, Web of Science, PubMed/MEDLINE y ScienceDirect, y la prospección de patentes se llevó a cabo en Espacenet, PATENTSCOPE y el Instituto Nacional de la Propiedad Industrial. Se incluyeron 140 artículos. LC-MS/MS y UHPLC-MS/MS fueron las técnicas más frecuentes (40,0%), seguidas de sensores y biosensores (26,4%) y HPLC con detectores convencionales (16,4%). El plasma y el suero fueron las principales matrices analizadas (61,4%), y el monitoreo terapéutico y la aplicación clínica representaron el propósito principal de los métodos (60,7%). La prospección tecnológica ha resaltado el avance de sensores electroquímicos, aptámeros y sistemas miniaturizados orientados al monitoreo continuo. En contraste, los métodos colorimétricos y las herramientas digitales basadas en imágenes han permanecido poco explorados, lo que indica oportunidades de innovación, especialmente en el control de calidad farmacéutico. Se concluye que el campo avanza tanto hacia tecnologías integradas de monitorización terapéutica como hacia el desarrollo de plataformas analíticas simplificadas, accesibles y sostenibles.

PALABRAS CLAVE: *Vancomicina. Métodos analíticos. Prospección tecnológica. Monitorización terapéutica. Biosensores. Colorimetría digital de imágenes.*

1. INTRODUÇÃO

A vancomicina é um antimicrobiano glicopeptídico amplamente empregado no tratamento de infecções graves causadas por bactérias Gram-positivas, especialmente *Staphylococcus aureus* resistente à meticilina (MRSA). Sua relevância clínica e a necessidade de garantir a qualidade dos produtos farmacêuticos tornam essencial o desenvolvimento de métodos analíticos confiáveis, seletivos e sensíveis para sua determinação em diferentes matrizes (RYBAK *et al.*, 2020).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Sua determinação analítica apresenta desafios relacionados à sua estrutura molecular, estabilidade e complexidade das matrizes investigadas. Diferentes técnicas têm sido empregadas, incluindo métodos cromatográficos, espectrofotométricos, espectrométricos, eletroquímicos, sensores e biossensores. Entre elas, destacam-se a cromatografia líquida e seu acoplamento à espectrometria de massas, especialmente em aplicações bioanalíticas. Entretanto, essas técnicas podem exigir infraestrutura especializada, equipamentos de elevado custo e consumo significativo de insumos (SERRI *et al.*, 2017; RYBAK *et al.*, 2020).

Nesse contexto, tecnologias emergentes, como sensores, biossensores, dispositivos miniaturizados e ferramentas digitais, têm despertado interesse por possibilitarem análises mais rápidas, acessíveis e potencialmente sustentáveis. A miniaturização pode reduzir o consumo de amostras, reagentes e a geração de resíduos, alinhando-se aos princípios da química analítica verde (PENA-PEREIRA; WOJNOWSKI; TOBISZEWSKI, 2020; AGRAWAL *et al.*, 2021).

Apesar dos avanços, a produção científica sobre determinação de vancomicina encontra-se distribuída entre diferentes técnicas, matrizes e finalidades analíticas. A integração entre prospecção científica e tecnológica permite identificar tendências, avanços e lacunas, contribuindo para o direcionamento de novas estratégias analíticas. Diante disso, este estudo objetivou realizar uma prospecção científica e tecnológica dos métodos empregados na determinação de vancomicina, caracterizando a evolução das publicações, as principais técnicas, matrizes e aplicações, além de identificar tendências e oportunidades de inovação voltadas ao desenvolvimento de metodologias mais simples, acessíveis, miniaturizadas e sustentáveis.

2. METODOLOGIA

Trata-se de um estudo descritivo, exploratório e documental de prospecção científica e tecnológica sobre métodos analíticos empregados na determinação de vancomicina, desenvolvido em duas etapas: levantamento da produção científica e análise de documentos de patentes.

A prospecção científica foi realizada nas bases Scopus, Web of Science, PubMed/MEDLINE e ScienceDirect, utilizando a estratégia *vancomycin AND (determination OR quantification OR assay OR detection) AND (HPLC OR UHPLC OR chromatography OR "LC-MS" OR spectrophotometry OR colorimetry OR fluorescence OR electrochemical OR sensor OR biosensor OR "digital image" OR electrophoresis)*. Foram considerados artigos originais publicados entre 2016 e 2025 que apresentassem desenvolvimento, validação ou aplicação de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

métodos analíticos para determinação de vancomicina em diferentes matrizes. Excluíram-se revisões, publicações sem dados originais, estudos fora do período delimitado e trabalhos sem determinação analítica do fármaco.

A seleção bibliográfica compreendeu a identificação dos registros, verificação de duplicatas, triagem por títulos e resumos e avaliação da elegibilidade conforme os critérios estabelecidos. Os registros foram organizados segundo sua identificação bibliográfica e pertinência temática, com classificação dos motivos de exclusão. O conjunto inicialmente reportado de 140 artigos deverá ser confirmado mediante conferência das referências, deduplicação e documentação da avaliação dos textos completos. O processo de seleção será apresentado em fluxograma, com os quantitativos correspondentes a cada etapa.

Os estudos foram caracterizados segundo ano de publicação, técnica analítica, matriz investigada e finalidade da determinação. Os resultados foram organizados em frequências absolutas e relativas, complementadas por análise crítica das tendências, aplicações e limitações das metodologias identificadas.

A prospecção tecnológica foi realizada em setembro de 2026 nas bases Espacenet, PATENTSCOPE e INPI, utilizando combinações dos termos *vancomycin AND (detection OR determination OR quantification OR monitoring OR sensor OR biosensor OR electrochemical OR aptamer OR colorimetric OR spectrophotometric)*, além de buscas complementares relacionadas à monitorização terapêutica e à colorimetria por imagem digital. A análise considerou códigos IPC/CPC, ano, técnica, matriz e finalidade tecnológica, adotando a família de patentes como unidade de análise para evitar duplicidades. Foram excluídos documentos sem aplicação direta à determinação analítica da vancomicina.

Durante a elaboração do manuscrito, o ChatGPT (OpenAI) foi utilizado exclusivamente como ferramenta auxiliar de revisão linguística e organização textual, sem participação autônoma na geração ou análise dos dados. Todo o conteúdo foi revisado e validado pelos autores, que assumem integral responsabilidade pelas informações apresentadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Seleção dos estudos

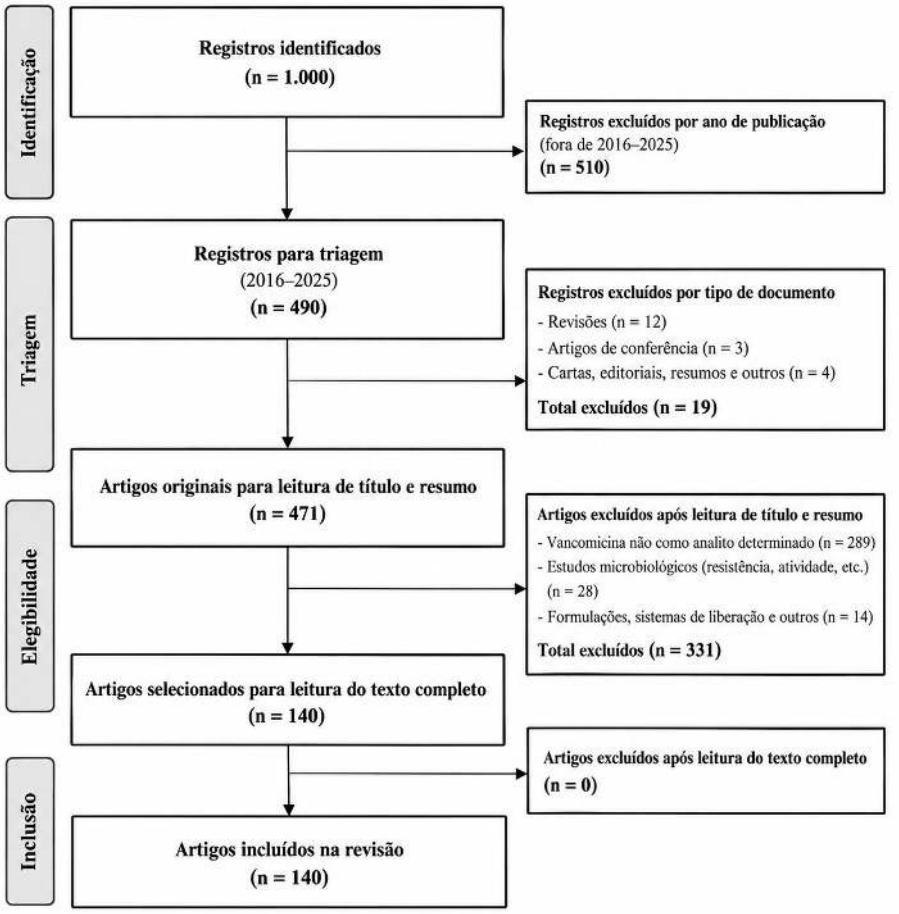
A busca bibliográfica identificou inicialmente 1.000 registros nas bases de dados consultadas, dos quais 490 permaneceram para a etapa de seleção após o processamento inicial. Destes, 19 foram excluídos pelo tipo de publicação, incluindo 12 revisões, três trabalhos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de conferência e quatro cartas, editoriais, resumos ou outros documentos, resultando em 471 registros submetidos à triagem por títulos e resumos.

Durante a triagem, foram excluídos 331 registros, sendo 289 por não apresentarem a vancomicina como analito determinado, 28 por abordarem predominantemente resistência bacteriana ou atividade microbiológica e 14 por tratarem de formulações, liberação de fármacos ou outras finalidades sem determinação analítica pertinente. Dessa forma, 140 artigos permaneceram após a triagem, constituindo o conjunto preliminar de estudos selecionados para a análise científica (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma do processo de identificação, triagem e seleção dos estudos sobre métodos analíticos para determinação de vancomicina.



Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.2. Caracterização geral e evolução temporal da produção científica

Os estudos incluídos evidenciaram diversidade quanto às técnicas analíticas empregadas, aos princípios de detecção, às matrizes avaliadas e às finalidades de aplicação. Foram identificadas desde abordagens instrumentais consolidadas, particularmente métodos cromatográficos, até estratégias mais recentes envolvendo sensores, biossensores, sistemas eletroquímicos, miniaturização e ferramentas digitais. A caracterização geral dos estudos segundo técnica analítica, matriz de aplicação e finalidade principal encontra-se apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos estudos de acordo com a técnica analítica empregada

Característica	Categoria	n	%
Técnica analítica	LC-MS/MS/UHPLC-MS/MS	56	40,0
	Sensores/biossensores	37	26,4
	HPLC/HPLC-UV/FLD e outros detectores	23	16,4
	Espectrofotometria/fluorimetria	13	9,3
	Eletroquímica	4	2,9
	Colorimetria/DIC	1	0,7
	Imunoensaios/métodos clínicos	1	0,7
	Outras técnicas	5	3,6
Matriz de aplicação	Plasma/soro	86	61,4
	Produtos farmacêuticos	26	18,6

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

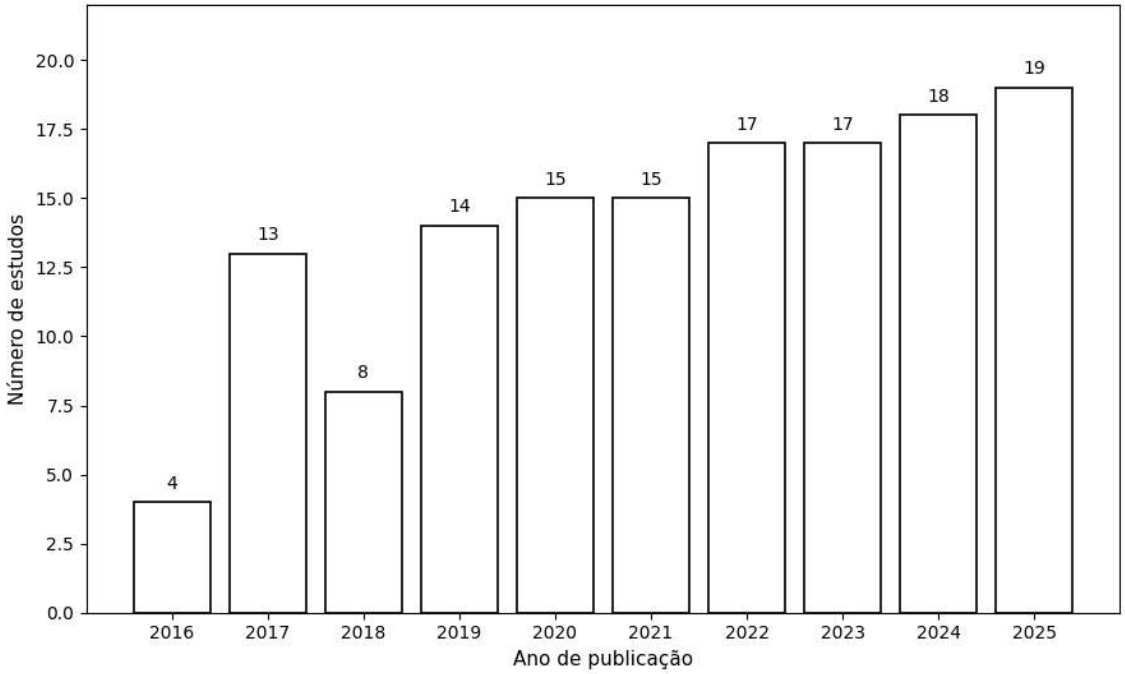
	Matrizes ambientais/alimentares	11	7,9
	Sangue total/DBS/DPS	5	3,6
	Urina	1	0,7
	Outras matrizes	11	7,9
Finalidade principal	Monitorização terapêutica/aplicação clínica	85	60,7
	Desenvolvimento/validação analítica	31	22,1
	Controle de qualidade farmacêutico	15	10,7
	Comparação de métodos	9	6,4

O predomínio de métodos instrumentais consolidados demonstra que seletividade, sensibilidade e confiabilidade analítica permanecem requisitos centrais na determinação da vancomicina, particularmente em matrizes complexas. Técnicas cromatográficas associadas a sistemas de detecção altamente seletivos apresentam vantagens importantes para aplicações bioanalíticas, nas quais componentes endógenos podem interferir na determinação do fármaco. Essa característica é coerente com a importância da monitorização terapêutica da vancomicina e com a necessidade de obtenção de resultados confiáveis para avaliação da exposição ao antimicrobiano (RYBAK *et al.*, 2020).

Quanto à distribuição temporal das publicações, conforme apresentado na Figura 2, observou-se que o desenvolvimento de métodos para determinação de vancomicina permaneceu ativo durante todo o período analisado, embora com variações no número de estudos publicados anualmente.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Distribuição temporal dos estudos incluídos sobre métodos analíticos para determinação de vancomicina, segundo o ano de publicação, 2016–2025 (n = 140)



3.3. Panorama das técnicas analíticas empregadas na determinação de vancomicina

A análise dos estudos evidenciou diversidade de técnicas analíticas para determinação de vancomicina, com predomínio dos métodos cromatográficos, especialmente LC-MS/MS e UHPLC-MS/MS (40,0%; n = 56), seguidos por sensores e biossensores (26,4%; n = 37) e HPLC com detecção convencional (16,4%; n = 23), conforme apresentado na Figura 3. A predominância das técnicas cromatográficas está relacionada à elevada seletividade e sensibilidade, particularmente relevantes para análises em matrizes biológicas complexas e monitorização terapêutica. Por sua vez, a participação expressiva de sensores e biossensores evidencia o interesse por plataformas miniaturizadas, rápidas e potencialmente aplicáveis à monitorização descentralizada (RYBAK *et al.*, 2020; DAUPHIN-DUCHARME *et al.*, 2019; GABER; EMARA; ALLAM, 2025).

Os métodos espectrofotométricos e fluorimétricos representaram 9,3% (n = 13), enquanto as abordagens eletroquímicas convencionais corresponderam a 2,9% (n = 4). Embora menos frequentes, essas técnicas apresentam vantagens relacionadas à simplicidade operacional, ao custo instrumental e ao potencial de miniaturização, mas podem apresentar limitações de

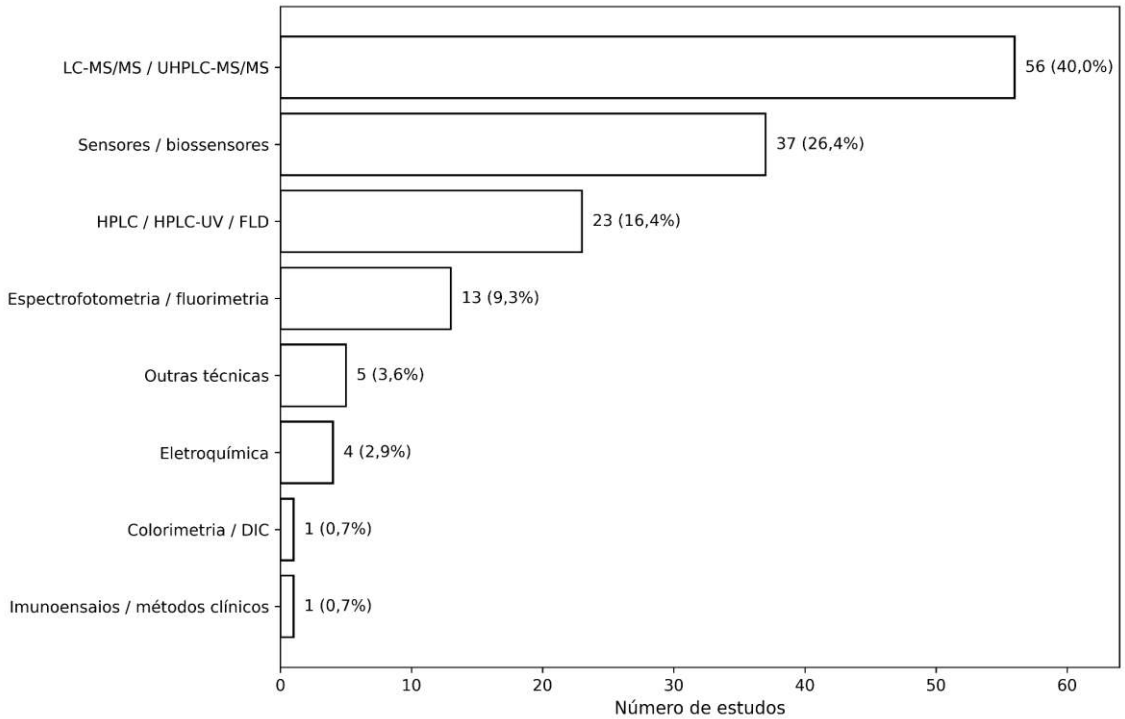
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

seletividade dependendo da matriz analisada (CETINKAYA *et al.*, 2022; MERMER; PALUCH; KOZAK, 2022).

A colorimetria e a colorimetria por imagem digital apresentaram baixa representatividade (0,7%; n = 1), assim como os imunoensaios e métodos clínicos (0,7%; n = 1), enquanto outras abordagens corresponderam a 3,6% (n = 5). Destaca-se o estudo de Mermer, Paluch e Kozak (2022), que demonstrou a aplicabilidade da colorimetria por smartphone na determinação de vancomicina em produtos farmacêuticos. A reduzida frequência dessas metodologias no conjunto analisado sugere oportunidades de investigação voltadas ao desenvolvimento de procedimentos analíticos acessíveis, portáteis e de menor complexidade instrumental.

Em conjunto, os resultados demonstram a consolidação das técnicas cromatográficas e o interesse por tecnologias sensoras, ao mesmo tempo que evidenciam oportunidades de inovação em métodos colorimétricos e baseados em imagens digitais, especialmente para aplicações em controle de qualidade farmacêutico.

Figura 3. Distribuição dos estudos incluídos segundo a principal técnica analítica empregada na determinação de vancomicina (n = 140).



Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.4. Princípios de detecção e estratégias analíticas

Os estudos analisados evidenciaram diferentes princípios de detecção para determinação de vancomicina, incluindo espectrometria de massas, absorção molecular no ultravioleta/visível, fluorescência, detecção eletroquímica e sistemas colorimétricos. Essa diversidade reflete a necessidade de adequação dos métodos às características das matrizes, à seletividade, à sensibilidade e à finalidade analítica.

A espectrometria de massas, especialmente associada à LC-MS/MS e UHPLC-MS/MS, destacou-se pela elevada seletividade e sensibilidade, sendo particularmente relevante para análises em matrizes biológicas complexas e monitorização terapêutica. Em contrapartida, métodos espectrofotométricos e fluorimétricos oferecem alternativas instrumentais potencialmente mais acessíveis, embora possam apresentar limitações relacionadas à seletividade e às interferências da matriz (RYBAK *et al.*, 2020; MERMER; PALUCH; KOZAK, 2022).

As estratégias eletroquímicas apresentaram relevância no desenvolvimento de sensores e biossensores, frequentemente associados a nanomateriais, aptâmeros e polímeros molecularmente impressos, visando aprimorar a seletividade e a sensibilidade. Essas plataformas permitem integrar mecanismos específicos de reconhecimento molecular a diferentes formas de transdução do sinal, favorecendo a miniaturização e o desenvolvimento de dispositivos para análises rápidas e descentralizadas (CETINKAYA *et al.*, 2022).

Embora menos frequentes, as abordagens colorimétricas e baseadas em imagens digitais representam alternativas promissoras pela simplicidade operacional e menor dependência de instrumentação complexa. Mermer, Paluch e Kozak (2022) demonstraram a viabilidade da determinação de vancomicina em produtos farmacêuticos por colorimetria de imagem digital utilizando smartphones e reação com íons cobre(II), evidenciando o potencial dessa estratégia para aplicações analíticas acessíveis.

Em conjunto, os resultados demonstram que a escolha do princípio de detecção depende das exigências analíticas e da matriz investigada, destacando-se a consolidação da espectrometria de massas e o potencial de inovação das plataformas sensoras e dos sistemas colorimétricos digitais.

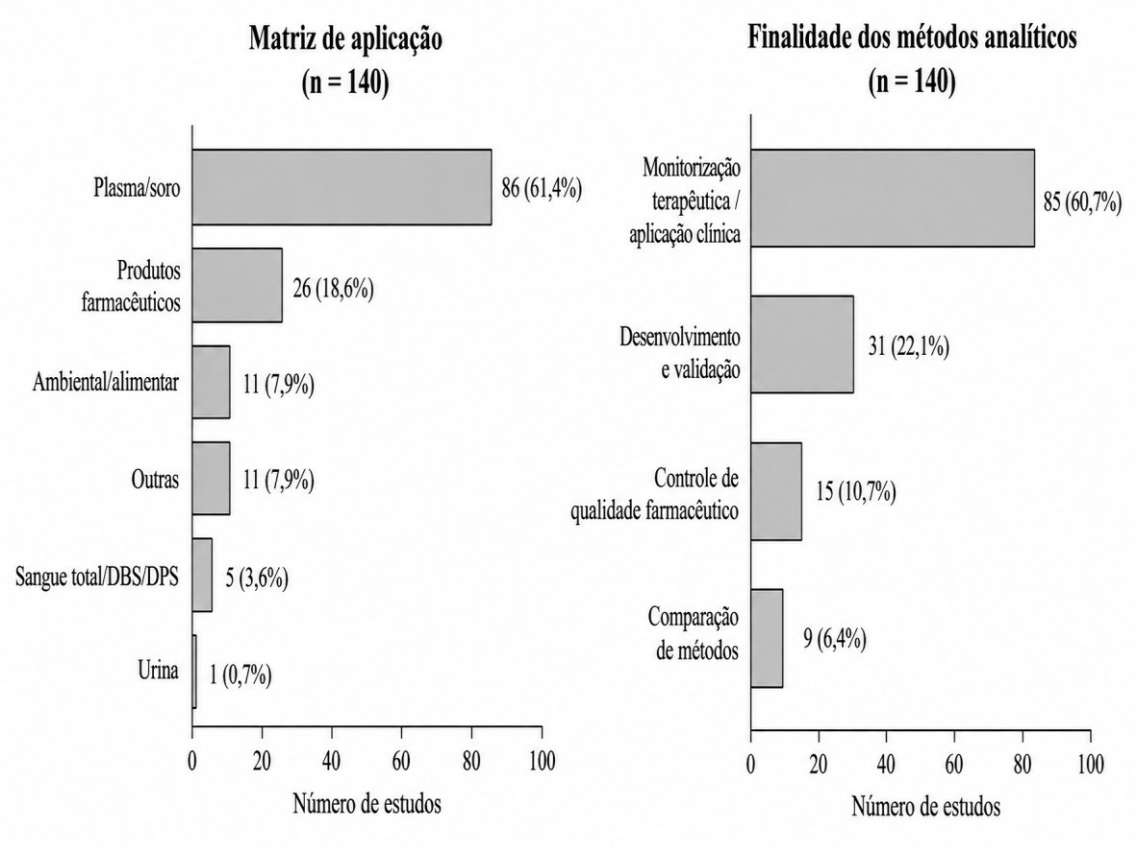
3.5. Matrizes de aplicação e finalidade dos métodos analíticos

A análise das matrizes empregadas demonstrou predomínio de aplicações em amostras biológicas. Conforme apresentado na Figura 4, plasma e soro foram utilizados em 86 estudos (61,4%), constituindo a principal categoria identificada. Em menor frequência, foram observadas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

aplicações em sangue total e sistemas de amostragem de sangue ou plasma seco, como *dried blood spots* (DBS) e *dried plasma spots* (DPS), correspondendo a 5 estudos (3,6%), enquanto a urina foi identificada em 1 estudo (0,7%).

Figura 4. Distribuição dos estudos incluídos segundo a matriz de aplicação e a finalidade dos métodos analíticos empregados na determinação de vancomicina (n = 140).



A predominância de plasma e soro está diretamente relacionada à importância da determinação das concentrações de vancomicina no contexto clínico. A variabilidade farmacocinética do antimicrobiano, particularmente em pacientes críticos e indivíduos com alterações da função renal, torna a monitorização da exposição uma importante aplicação dos métodos bioanalíticos. As recomendações atuais para monitorização terapêutica da vancomicina priorizam a avaliação da exposição pela área sob a curva concentração-tempo, especialmente no tratamento de infecções graves por MRSA, reforçando a necessidade de determinações analíticas confiáveis em matrizes biológicas (RYBAK *et al.*, 2020).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Embora menos frequentes, os estudos envolvendo DBS e DPS merecem destaque por sua relação com a simplificação da etapa pré-analítica. A utilização de amostras secas possibilita trabalhar com pequenos volumes e pode apresentar vantagens relacionadas à coleta, ao armazenamento e ao transporte. No caso da vancomicina, métodos por LC-MS/MS utilizando DBS já foram desenvolvidos e validados, demonstrando a aplicabilidade dessa estratégia à determinação do antimicrobiano (BAHMANY *et al.*, 2024). De modo mais amplo, a utilização de DBS na monitorização terapêutica acompanha a tendência de miniaturização da amostragem bioanalítica, embora sua implementação exija validação específica e avaliação de fatores pré-analíticos capazes de afetar os resultados (CAPIAU *et al.*, 2019).

Os produtos farmacêuticos constituíram a segunda principal categoria de matriz, correspondendo a 26 estudos (18,6%). Nesse grupo foram identificadas aplicações relacionadas à determinação quantitativa da vancomicina, ao desenvolvimento e validação de métodos e à avaliação da estabilidade. Embora menos frequentes que as aplicações bioanalíticas, esses estudos permanecem relevantes para o controle de qualidade, no qual a disponibilidade de métodos adequados é fundamental para assegurar o atendimento às especificações do produto. Além das técnicas instrumentais convencionais, abordagens alternativas vêm sendo investigadas nesse contexto, incluindo a determinação de vancomicina em medicamentos por colorimetria baseada em imagens digitais obtidas por smartphone (MERMER; PALUCH; KOZAK, 2022).

As matrizes ambientais e alimentares corresponderam a 11 estudos (7,9%), evidenciando aplicações da determinação de vancomicina para além dos contextos clínico e farmacêutico. A investigação de resíduos de antimicrobianos no ambiente tem adquirido relevância diante da preocupação com sua presença em diferentes compartimentos ambientais e sua relação com a seleção e disseminação da resistência antimicrobiana. A ocorrência de antimicrobianos em concentrações reduzidas e em matrizes complexas também impõe desafios analíticos relacionados à sensibilidade, seletividade e preparo da amostra (LARSSON; FLACH, 2022). Outras matrizes representaram 7,9% dos estudos (n = 11).

Por outro lado, a menor participação de estudos direcionados ao controle de qualidade farmacêutico (10,7%) evidencia que a produção científica recente analisada esteve mais concentrada em demandas clínicas e bioanalíticas. Esse achado não implica ausência de métodos consolidados para medicamentos, mas revela espaço para o desenvolvimento de novas estratégias destinadas ao controle de qualidade que incorporem atributos como simplicidade, miniaturização, menor consumo de reagentes e solventes e redução da geração de resíduos. Esses aspectos são coerentes com os princípios atuais da química analítica verde e com a busca

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

por métodos que conciliem desempenho analítico, viabilidade operacional e sustentabilidade (PENA-PEREIRA; WOJNOWSKI; TOBISZEWSKI, 2020).

3.6. Prospecção tecnológica dos métodos para determinação de vancomicina

A prospecção tecnológica complementou a análise da produção científica, permitindo avaliar a evolução dos métodos para determinação de vancomicina em direção a soluções com potencial de aplicação prática e transferência tecnológica. Enquanto a literatura científica apresentou predomínio das técnicas cromatográficas, as abordagens emergentes concentraram-se principalmente em sensores, biossensores, microamostragem e sistemas miniaturizados, indicando uma tendência de redução da complexidade operacional e aproximação das análises ao local de cuidado (DAUPHIN-DUCHARME *et al.*, 2019; GABER; EMARA; ALLAM, 2025).

Entre essas tecnologias, conforme apresentado na Tabela 2, destacam-se os biossensores eletroquímicos, capazes de integrar elementos de reconhecimento molecular, como aptâmeros e polímeros molecularmente impressos, a sistemas miniaturizados de aquisição do sinal. Estudos experimentais já demonstraram a determinação de vancomicina em matrizes biológicas utilizando sensores baseados em aptâmeros e polímeros molecularmente impressos, evidenciando seu potencial para aplicações rápidas e descentralizadas (DAUPHIN-DUCHARME *et al.*, 2019; CETINKAYA *et al.*, 2022).

A análise da produção científica foi complementada por uma prospecção patentária exploratória, considerando tecnologias nas quais a vancomicina constituía efetivamente o analito ou um dos principais fármacos-alvo. Foram excluídos documentos direcionados exclusivamente à síntese, formulação, uso terapêutico ou detecção microbiológica de resistência à vancomicina. A busca revelou uma trajetória tecnológica distinta daquela observada na literatura científica: enquanto os artigos apresentaram forte participação dos métodos cromatográficos, os documentos patentários recentes identificados concentraram-se em sensores eletroquímicos, aptâmeros, monitorização contínua e integração dos dados analíticos com sistemas de controle da farmacoterapia.

A proteção tecnológica relacionada à determinação de vancomicina não é recente. A família WO2000023806, com prioridade em 1998, descreve reagentes e métodos baseados em reconhecimento por anticorpos para determinação de vancomicina em fluidos biológicos. Entretanto, documentos mais recentes indicam uma mudança em direção a dispositivos miniaturizados e sistemas de monitorização contínua.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Essa tendência foi particularmente evidente nas famílias WO2024124303 e WO2024124304, com prioridade em 2022 e associadas à Nutromics Technology Pty Ltd. Os documentos descrevem sensores eletroquímicos baseados em aptâmeros, capazes de gerar dados farmacocinéticos de alta resolução a partir da determinação de fármacos em matrizes como soro e fluido intersticial. As tecnologias incluem microeletrodos, sistemas portáteis de aquisição e comunicação sem fio, além da possibilidade de integração entre os dados analíticos e sistemas de suporte à individualização da farmacoterapia.

Outras famílias evidenciam esforços para superar limitações necessárias à translação desses sensores. A WO2024145480, originalmente depositada pela Dexcom Inc., descreve materiais destinados a aumentar a estabilidade de biossensores baseados em aptâmeros em matrizes biológicas, enquanto a WO2025123084, da Nutromics, protege aptâmeros específicos para vancomicina e sua aplicação em sensores eletroquímicos destinados à monitorização contínua. Também foi identificado o documento CN117126251A, que descreve um sensor eletroquímico baseado em peptídeo para determinação de vancomicina.

As classificações IPC/CPC associadas a esses documentos concentraram-se principalmente nas famílias G01N, A61B, A61M e C12N, relacionadas, respectivamente, à análise de materiais, monitorização médica, dispositivos de administração de medicamentos e componentes biotecnológicos. Esse perfil reforça o caráter interdisciplinar das tecnologias recentes e sua convergência entre química analítica, biossensoriamento, biotecnologia e dispositivos médicos.

A comparação entre produção científica e tecnológica evidencia que os sensores e biossensores representam não apenas uma tendência acadêmica, mas também um importante eixo de translação tecnológica. Entretanto, para sua aplicação efetiva, aspectos como estabilidade, reprodutibilidade, fabricação em escala, desempenho em amostras reais e comparação com métodos de referência ainda precisam ser considerados (GABER; EMARA; ALLAM, 2025).

Em contraste, não foi documentada, na amostra patentária exploratória descrita, presença comparável de tecnologias especificamente direcionadas à colorimetria por imagem digital para determinação de vancomicina. Esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois uma busca exploratória não permite afirmar inexistência de proteção patentária. Ainda assim, associado à baixa frequência dessa abordagem na literatura científica, o achado sugere um espaço tecnológico pouco explorado para métodos simples, portáteis e de menor custo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Principais famílias e documentos patentários identificados na prospecção tecnológica de métodos e dispositivos para determinação e monitorização de vancomicina.

Família/documento representativo	Prioridade	Depositante	Tecnologia principal	Aplicação à vancomicina
WO2000023806	1998	—	Reagentes/ensaio baseado em anticorpos	Quantificação em fluidos biológicos
WO2024124303	2022	Nutromics Technology Pty Ltd	Sensor EAB + farmacocinética + controle de dose	Monitorização contínua/TDM
WO2024124304	2022	Nutromics Technology Pty Ltd	Sensor EAB + identificação de concentração/pico	Monitorização contínua/TDM
WO2024145480	2022	Dexcom Inc.	Material protetor para biossensor de aptâmero	Monitorização contínua; vancomicina entre os analitos
CN117126251	2023	Kunming University of Science and Technology e Yunnan Zhadian Dairy Co. Ltd.	Sensor eletroquímico baseado em peptídeo	Determinação de vancomicina
WO2025123084	2023	Nutromics Technology Pty Ltd	Aptâmeros específicos + sensor eletroquímico	Detecção/quantificação de vancomicina

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.7. Interface entre produção científica e desenvolvimento tecnológico

A análise conjunta da produção científica e da prospecção tecnológica evidenciou diferentes níveis de maturidade dos métodos para determinação de vancomicina. Enquanto a literatura científica permaneceu predominantemente sustentada por métodos cromatográficos, que corresponderam a 56,4% dos estudos (n = 79), os documentos patentários recentes concentraram-se em sensores eletroquímicos, aptâmeros, miniaturização e monitorização contínua. Esse contraste indica que o avanço tecnológico tem priorizado não apenas o desempenho analítico, mas também novas formas de obtenção e utilização da informação.

Os sensores e biossensores representam a principal convergência entre produção científica e desenvolvimento tecnológico. Essas plataformas corresponderam a 26,4% dos estudos (n = 37) e também apresentaram destaque nos documentos patentários identificados. Particularmente, sistemas baseados em aptâmeros têm avançado da demonstração experimental para tecnologias que integram sensores miniaturizados, monitorização contínua e processamento de dados, indicando potencial para aplicações em monitorização terapêutica (DAUPHIN-DUCHARME *et al.*, 2019).

Essa tendência acompanha o predomínio das aplicações clínicas na produção científica (60,7%; n = 85) e aponta para uma transição da determinação laboratorial pontual para sistemas capazes de fornecer informações farmacocinéticas de forma mais frequente ou contínua. Essa perspectiva é especialmente relevante para a vancomicina, considerando a importância da monitorização da exposição ao antimicrobiano e as recomendações atuais baseadas em AUC (RYBAK *et al.*, 2020). Entretanto, a translação dessas tecnologias requer avanços em robustez, estabilidade, reprodutibilidade, fabricação em escala e validação frente a métodos de referência.

Em contraste, a colorimetria e a colorimetria por imagem digital apresentaram baixa representação científica (0,7%; n = 1) e não mostraram presença comparável na busca patentária exploratória. Embora já tenha sido demonstrada a viabilidade da determinação de vancomicina em medicamentos utilizando imagens obtidas por smartphone (MERMER; PALUCH; KOZAK, 2022), essa abordagem permanece pouco explorada. Assim, os resultados revelam dois eixos potenciais de inovação: sistemas tecnologicamente avançados voltados à monitorização clínica contínua e métodos simplificados, acessíveis e potencialmente mais sustentáveis direcionados, entre outras aplicações, ao controle de qualidade farmacêutico (PENA-PEREIRA; WOJNOWSKI; TOBISZEWSKI, 2020).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prospecção científica e tecnológica permitiu caracterizar o panorama dos métodos analíticos empregados na determinação de vancomicina entre 2016 e 2025, evidenciando o predomínio das técnicas cromatográficas, especialmente LC-MS/MS e UHPLC-MS/MS, e sua aplicação em matrizes biológicas, principalmente plasma e soro. Esses resultados refletem a importância da monitorização terapêutica e a necessidade de métodos analíticos seletivos, sensíveis e confiáveis.

Paralelamente, a participação expressiva de sensores e biossensores, associada aos avanços identificados na prospecção patentária, evidencia o potencial de tecnologias miniaturizadas, portáteis e direcionadas à monitorização contínua. Em contrapartida, a baixa representatividade da colorimetria por imagem digital aponta oportunidades de investigação, especialmente no controle de qualidade farmacêutico, considerando seu potencial para o desenvolvimento de métodos mais simples, acessíveis e sustentáveis.

Conclui-se que as perspectivas de inovação envolvem tanto o aprimoramento de tecnologias destinadas à monitorização clínica quanto o desenvolvimento de alternativas analíticas de menor complexidade instrumental. Nesse contexto, a escolha dos métodos deve considerar o desempenho analítico, a finalidade de aplicação, a viabilidade operacional e a sustentabilidade, contribuindo para soluções adequadas às diferentes demandas clínicas e farmacêuticas.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, A.; KEÇILI, R.; GHORBANI-BIDKORBEH, F.; HUSSAIN, C. M. Green miniaturized technologies in analytical and bioanalytical chemistry. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 143, art. 116383, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116383.

BAHMANY, S.; HASSANZAI, M.; FLINT, R. B.; VAN ONZENOORT, H. A. W.; DE WINTER, B. C. M.; KOCH, B. C. P. Dried blood spot analysis for the quantification of vancomycin and creatinine using liquid chromatography-tandem mass spectrometry: method development and validation. **Clinica Chimica Acta**, v. 553, art. 117689, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cca.2023.117689.

CAPIAU, S. *et al.* Official International Association for Therapeutic Drug Monitoring and Clinical Toxicology guideline: development and validation of dried blood spot-based methods for therapeutic drug monitoring. **Therapeutic Drug Monitoring**, v. 41, n. 4, p. 409–430, 2019. DOI: https://doi.org/10.1097/FTD.0000000000000643.

CETINKAYA, A.; YILDIZ, E.; KAYA, S. I.; ÇORMAN, M. E.; UZUN, L.; OZKAN, S. A. A green synthesis route to develop molecularly imprinted electrochemical sensor for selective detection of vancomycin from aqueous and serum samples. **Green Analytical Chemistry**, v. 2, art. 100017, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100017.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

DAUPHIN-DUCHARME, P. *et al.* Electrochemical aptamer-based sensors for improved therapeutic drug monitoring and high-precision, feedback-controlled drug delivery. **ACS Sensors**, v. 4, n. 10, p. 2832–2837, 2019. DOI: https://doi.org/10.1021/acssensors.9b01616.

GABER, A. M.; EMARA, H. M.; ALLAM, N. K. Electrochemical biosensors for vancomycin monitoring in blood: advances, strategies, and future perspectives. **RSC Advances**, v. 15, p. 41418–41431, 2025. DOI: https://doi.org/10.1039/D5RA07262J.

LARSSON, D. G. J.; FLACH, C.-F. Antibiotic resistance in the environment. **Nature Reviews Microbiology**, v. 20, p. 257–269, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41579-021-00649-x.

MERMER, K.; PALUCH, J.; KOZAK, J. Smartphone-based digital image colorimetry for the determination of vancomycin in drugs. **Monatshefte für Chemie – Chemical Monthly**, v. 153, p. 801–809, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s00706-022-02964-2.

PENA-PEREIRA, F.; WOJNOWSKI, W.; TOBISZEWSKI, M. AGREE—Analytical GREEnness Metric Approach and Software. **Analytical Chemistry**, v. 92, n. 14, p. 10076–10082, 2020. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01887.

RYBAK, M. J. *et al.* Therapeutic monitoring of vancomycin for serious methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* infections: a revised consensus guideline and review by the American Society of Health-System Pharmacists, the Infectious Diseases Society of America, the Pediatric Infectious Diseases Society, and the Society of Infectious Diseases Pharmacists. **American Journal of Health-System Pharmacy**, v. 77, n. 11, p. 835–864, 2020. DOI: https://doi.org/10.1093/ajhp/zxaa036.

SERRI, A.; MOGHIMIPOUR, H. R.; MAHBOUBI, A.; ZARGHI, A. Stability-indicating HPLC method for determination of vancomycin hydrochloride in the pharmaceutical dosage forms. **Acta Poloniae Pharmaceutica**, v. 74, n. 1, p. 73–79, 2017.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.