ARTIGO ORIGINAL

Modelo Multicritério para Dimensionamento de Ações Municipais de Controle Vetorial Urbano: Integração de Variáveis Territoriais, Epidemiológicas e Operacionais

Multicriteria Model for Operational Planning of Municipal Urban Vector Control Actions: Integration of Territorial, Epidemiological and Operational Variables

Deivid Robert de Cresci Campos
[1] Movement Innovation Solutions / Gestão em Saúde Pública, Rio de Janeiro, Brasil
Correspondência: deivid.cresci.drcc@gmail.com

Submetido para: Cadernos de Saúde Pública / Revista de Saúde Pública

RESUMO

Introdução: As arboviroses urbanas representam desafio crescente para a saúde pública brasileira, especialmente em territórios marcados por urbanização acelerada, desigualdade socioambiental e fragilidades de saneamento básico. Modelos tradicionais de dimensionamento operacional, estruturados predominantemente sobre parâmetros populacionais homogêneos, apresentam limitações sistemáticas para representar a complexidade territorial e epidemiológica dos municípios brasileiros contemporâneos.

Objetivo: Desenvolver e validar um modelo multicritério para dimensionamento operacional das ações municipais de controle vetorial urbano, integrando variáveis demográficas, territoriais, epidemiológicas, entomológicas, socioambientais e operacionais em um índice composto quantitativo.

Métodos: Estudo metodológico aplicado, estruturado em cinco etapas: revisão integrativa técnico-científica e normativa; definição de domínios e variáveis; construção matemática do índice composto; validação conceitual por especialistas pelo método Delphi; e aplicação piloto em São João de Meriti e São Gonçalo, municípios da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Propôs-se o Índice Integrado de Necessidade Operacional Vetorial (IINOV), baseado em modelo aditivo ponderado multicritério.

Resultados: O modelo demonstrou sensibilidade operacional ampliada em relação aos modelos tradicionais. São João de Meriti apresentou maior peso relativo nos componentes de densidade e vulnerabilidade socioambiental, resultando em incremento estimado de 16,7% no quantitativo de Agentes de Combate às Endemias (ACE). São Gonçalo evidenciou maior influência das variáveis de complexidade territorial e logística, com incremento de 30,4% no dimensionamento proposto. Ambos os municípios apresentaram necessidade de ampliação estrutural relevante em supervisão, veículos, bombas costais e motocicletas operacionais; São João de Meriti demandou estimativa de 10 motocicletas em frota mista ou 13 em frota exclusiva; São Gonçalo demandou 15 motocicletas em frota mista ou aproximadamente 41 em frota exclusiva de veículos leves.

Conclusão: O modelo multicritério IINOV oferece estrutura metodológica promissora para aprimorar o planejamento municipal do controle vetorial urbano, superando limitações estruturais dos modelos exclusivamente populacionais. Recomenda-se validação multicêntrica prospectiva, análise espacial baseada em dados georreferenciados reais e calibração estatística rigorosa dos coeficientes de ponderação em estudos futuros.

Palavras-chave: controle vetorial; arboviroses; vigilância em saúde; manejo integrado de vetores; epidemiologia espacial; planejamento territorial; índice composto; saúde pública.

ABSTRACT

Background: Urban arboviruses represent a persistent and growing public health challenge in Brazil, particularly in areas affected by rapid urbanization, socio-environmental inequality, and sanitation deficits. Traditional operational planning models based primarily on homogeneous population parameters systematically fail to capture the territorial and epidemiological complexity of contemporary Brazilian municipalities.

Objective: To develop and validate a multicriteria model for operational planning of municipal urban vector control actions, integrating demographic, territorial, epidemiological, entomological, socio-environmental and operational variables into a quantitative composite index.

Methods: This applied methodological study comprised five stages: integrative technical-scientific and normative review; selection of domains and variables; mathematical construction of the composite index; Delphi-based expert validation; and pilot application in two municipalities in metropolitan Rio de Janeiro, Brazil. The Integrated Index of Vector Operational Need (IINOV) was proposed using a weighted additive multicriteria model.

Results: The model showed enhanced operational sensitivity compared to traditional approaches. São João de Meriti displayed greater influence of density and socio-environmental vulnerability, yielding an estimated 16.7% increase in the recommended number of endemic disease control agents. São Gonçalo showed greater influence of territorial complexity and logistics, with a 30.4% increase in the proposed staffing. Both municipalities required relevant structural reinforcement in supervision, vehicles, portable equipment, and operational motorcycles.

Conclusion: The IINOV multicriteria model offers a promising methodological framework to enhance municipal planning for urban vector control, overcoming structural limitations of population-only approaches. Prospective multicenter validation, real geospatial data-based spatial analysis, and rigorous statistical calibration of weighting coefficients are recommended in future studies.

Keywords: vector control; arboviruses; public health surveillance; integrated vector management; spatial epidemiology; territorial planning; composite index; public health.

1. INTRODUÇÃO

As arboviroses urbanas consolidaram-se como um dos principais desafios contemporâneos da saúde pública global, especialmente em países tropicais e subtropicais marcados por intensos processos de urbanização, desigualdade socioespacial e fragilidades estruturais relacionadas ao saneamento básico [1,2]. Nas últimas décadas, doenças como dengue, chikungunya e Zika passaram a apresentar comportamento epidemiológico persistente e crescente complexidade operacional, impondo elevados impactos sociais, econômicos e assistenciais aos sistemas públicos de saúde [5,6].

O Brasil ocupa posição central nesse cenário epidemiológico global. A ampla dispersão do Aedes aegypti em praticamente todo o território nacional, associada às condições climáticas favoráveis, à elevada densidade urbana e às dificuldades históricas de infraestrutura sanitária, favoreceu a consolidação de ciclos sustentados de transmissão viral em grande parte dos municípios brasileiros [5,6]. Em 2024, o país registrou a maior epidemia de dengue de sua história, com aproximadamente 6,5 milhões de casos notificados e mais de 4.000 óbitos confirmados, evidenciando a inadequação das estruturas operacionais vigentes para responder à magnitude do desafio contemporâneo. Adicionalmente, as mudanças climáticas contribuem para alterações importantes na dinâmica vetorial, ampliando períodos sazonais de transmissão e expandindo geograficamente as áreas favoráveis à proliferação dos vetores [7,10].

Historicamente, as estratégias brasileiras de controle vetorial foram estruturadas a partir de modelos verticalizados, centralizados e relativamente homogêneos, baseados predominantemente em parâmetros populacionais e em ações padronizadas de vigilância domiciliar, eliminação mecânica de criadouros e aplicação espacial de inseticidas [3]. Embora tais modelos tenham desempenhado papel relevante na organização das ações nacionais de combate às arboviroses, a crescente complexidade urbana brasileira passou a expor limitações estruturais dessas abordagens, particularmente diante da heterogeneidade territorial dos municípios, da fragmentação urbana e da diversidade de contextos epidemiológicos locais [2,4].

A heterogeneidade territorial dos municípios brasileiros tornou-se progressivamente incompatível com modelos operacionais uniformes. Municípios com populações demograficamente semelhantes frequentemente apresentam demandas operacionais completamente distintas, decorrentes de fatores como densidade demográfica, extensão territorial, verticalização urbana, vulnerabilidade socioambiental, presença de assentamentos precários, cobertura de saneamento básico, mobilidade urbana, condições climáticas locais e diferentes padrões de infestação vetorial [6,10,11]. Esse fenômeno configura o que a literatura contemporânea denomina de "paradoxo do planejamento homogêneo": a aplicação de parâmetros operacionais uniformes em territórios estruturalmente heterogêneos resulta sistematicamente em subdimensionamento ou superdimensionamento das estruturas de vigilância e controle vetorial.

As Diretrizes Nacionais para Prevenção e Controle das Arboviroses Urbanas [2] passaram a enfatizar conceitos como estratificação territorial de risco, vigilância entomológica qualificada, territorialização das ações e manejo integrado de vetores. Esse novo paradigma reconhece que os territórios urbanos não apresentam comportamento epidemiológico homogêneo e que as estratégias operacionais devem ser adaptadas às especificidades de cada realidade local. Paralelamente, observa-se expansão das tecnologias aplicadas ao controle vetorial urbano, incluindo ovitrampas, estações disseminadoras de larvicida, borrifação residual intradomiciliar, sistemas georreferenciados, drones, inteligência artificial aplicada à estratificação de risco, tecnologias biológicas como a plataforma Wolbachia e plataformas móveis leves de nebulização [1,4,8,9]. A incorporação racional dessas tecnologias ao planejamento operacional exige ferramentas quantitativas de suporte à decisão que superem as limitações dos modelos tradicionais.

Diante desse cenário, a construção de modelos multicritério capazes de integrar indicadores populacionais, epidemiológicos, entomológicos, territoriais, ambientais e operacionais em uma estrutura metodológica quantitativa e unificada representa avanço metodológico necessário e relevante para o campo da vigilância em saúde. O presente estudo propõe o desenvolvimento, a organização e a validação preliminar do Índice Integrado de Necessidade Operacional Vetorial (IINOV), instrumento multicritério destinado a subsidiar o planejamento estratégico das ações municipais de controle vetorial urbano no Brasil.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Evolução Histórica do Controle Vetorial no Brasil

O controle vetorial no Brasil passou por importantes transformações ao longo do último século, acompanhando mudanças epidemiológicas, urbanas e institucionais relacionadas às doenças transmissíveis. As primeiras grandes campanhas sanitárias organizadas no país ocorreram ainda no início do século XX, sob forte influência do modelo higienista e das ações de combate à febre amarela urbana, protagonizadas por figuras como Oswaldo Cruz e Emílio Ribas [12]. Esse período inaugurou no Brasil uma tradição de controle vetorial centralizado, hierárquico e baseado em ações verticais de erradicação ou eliminação dos vetores, tradição que persistiu nas décadas seguintes e moldou profundamente a cultura institucional das estruturas de vigilância em saúde.

A reintrodução e expansão da dengue a partir da década de 1980 representaram marco epidemiológico crítico na reorganização das políticas públicas de controle vetorial. O surgimento de sucessivas epidemias urbanas de dengue, com progressiva diversificação sorológica e aumento da gravidade clínica, impulsionou a criação de programas nacionais específicos, culminando na estruturação do Programa Nacional de Controle da Dengue (PNCD) em 2002 e na definição de parâmetros operacionais padronizados para atuação municipal [3,13,14]. Embora essas estratégias

tenham possibilitado expansão da capacidade operacional municipal, o modelo permaneceu fortemente estruturado em lógica quantitativa homogênea, utilizando predominantemente parâmetros populacionais e razões fixas entre número de imóveis e quantitativo de agentes como critério principal de dimensionamento.

A consolidação do Sistema Nacional de Vigilância em Saúde (SNVS) e a descentralização das ações para os municípios, impulsionada pelo processo de implantação do Sistema Único de Saúde (SUS), ampliaram a responsabilidade operacional dos gestores municipais, sem que houvesse, no entanto, desenvolvimento proporcional de ferramentas metodológicas adequadas ao novo contexto de autonomia e heterogeneidade territorial [2,14]. Esse descompasso entre responsabilidade crescente e instrumentos metodológicos insuficientes representa parte substantiva do problema que o presente estudo busca endereçar.

2.2 Manejo Integrado de Vetores

O Manejo Integrado de Vetores (MIV) consolidou-se como estratégia internacional recomendada pela Organização Mundial da Saúde para prevenção e controle de doenças transmitidas por vetores [1]. O conceito surgiu como resposta às limitações observadas nos modelos tradicionais baseados predominantemente em controle químico e campanhas verticalizadas, que demonstraram sustentabilidade limitada diante do desenvolvimento de resistência aos inseticidas, dos impactos ambientais das aplicações indiscriminadas e da incapacidade de responder adequadamente à complexidade epidemiológica contemporânea.

O MIV fundamenta-se na integração coordenada de múltiplos componentes estratégicos: controle ambiental, vigilância entomológica, monitoramento epidemiológico contínuo, participação comunitária ativa, controle biológico, uso racional e criterioso de inseticidas, incorporação de tecnologias complementares e planejamento territorial baseado em estratificação de risco [1,4,15]. A efetividade do MIV depende, em larga medida, da qualidade das ferramentas de planejamento e dimensionamento utilizadas pelos gestores municipais, pois a integração entre diferentes componentes operacionais exige capacidade de priorização territorial, alocação racional de recursos e ajuste dinâmico das estratégias às condições epidemiológicas locais.

No contexto brasileiro, as Diretrizes Nacionais para Prevenção e Controle das Arboviroses Urbanas [2] reforçam princípios plenamente compatíveis com o MIV, destacando estratificação territorial, vigilância entomológica contínua, priorização de hotspots epidemiológicos, incorporação de tecnologias complementares e participação intersetorial como eixos estruturantes das ações municipais de controle vetorial. A tradução operacional desses princípios em ferramentas quantitativas de planejamento representa demanda metodológica explícita reconhecida nas próprias diretrizes.

2.3 Determinantes Socioambientais das Arboviroses Urbanas

A dinâmica epidemiológica das arboviroses urbanas está profundamente associada aos determinantes socioambientais que estruturam os territórios urbanos contemporâneos [10,11]. Urbanização desordenada, precariedade habitacional, armazenamento inadequado de água, falhas de saneamento básico e coleta irregular de resíduos sólidos influenciam diretamente a persistência e expansão dos vetores urbanos [5,10,11,16]. O Aedes aegypti apresenta elevada adaptação ao ambiente doméstico humano, utilizando predominantemente recipientes artificiais para oviposição, o que confere ao ambiente construído papel determinante na manutenção dos ciclos de transmissão.

A irregularidade no abastecimento de água frequentemente leva ao armazenamento domiciliar em recipientes improvisados, ampliando substancialmente a disponibilidade de criadouros peridomiciliares [16]. Esse fenômeno é particularmente prevalente em municípios metropolitanos com infraestrutura de saneamento deficiente, onde populações vulneráveis desenvolvem estratégias adaptativas de armazenamento hídrico que inadvertidamente favorecem a proliferação vetorial. A sobreposição espacial entre déficit de saneamento, vulnerabilidade social e alta densidade vetorial configura o que a literatura denomina de "hotspots de vulnerabilidade integrada", territórios que demandam intervenção operacional mais intensa e estratégias adaptadas.

As mudanças climáticas globais representam dimensão adicional de complexidade para o planejamento do controle vetorial. O aumento das temperaturas médias, alterações no regime de precipitações e expansão da umidade relativa do ar em determinadas regiões podem favorecer aceleração do ciclo de vida vetorial, expansão territorial dos vetores para novas áreas geográficas e prolongamento da sazonalidade epidemiológica [10,17,36]. Modelos preditivos sugerem que cenários climáticos futuros poderão ampliar significativamente as áreas de risco para transmissão de arboviroses no território brasileiro, reforçando a necessidade de instrumentos de planejamento adaptáveis e sensíveis às variações ambientais.

2.4 Vigilância Entomológica e Territorialização do Risco

A vigilância entomológica desempenha papel central nas estratégias contemporâneas de controle vetorial, permitindo monitorar a dinâmica populacional dos vetores e identificar áreas prioritárias para intervenção [1,2]. O arsenal metodológico disponível para vigilância entomológica inclui o Levantamento de Índice Rápido para Aedes aegypti (LIRAa), o Levantamento de Índice de Infestação por Aedes (LIA), o Índice de Infestação Predial (IIP), o Índice de Breteau, ovitrampas e sistemas de monitoramento georreferenciado integrado [2,8,18].

A utilização integrada desses instrumentos permite identificar padrões de persistência vetorial, mapear hotspots epidemiológicos, detectar áreas silenciosas de transmissão e estratificar territórios segundo grau de vulnerabilidade operacional [1,2,19]. Essa lógica de territorialização do risco aproxima o planejamento operacional das ações de controle vetorial dos princípios contemporâneos

de vigilância em saúde baseada em evidências e epidemiologia espacial [20,24]. A integração entre dados entomológicos, epidemiológicos e territoriais em plataformas georreferenciadas representa um dos avanços mais promissores para o aprimoramento do planejamento municipal das ações de controle vetorial.

2.5 Tecnologias Emergentes e Modernização da Vigilância

O avanço tecnológico promoveu transformação no ecossistema operacional do controle vetorial urbano. Estações disseminadoras de larvicida (EDL), a plataforma Wolbachia, a Técnica do Inseto Estéril (TIE), drones equipados com sistemas de dispersão de larvicidas ou nebulizadores, sistemas de informação geográfica (GIS), algoritmos de inteligência artificial aplicados à estratificação de risco, plataformas móveis leves de nebulização Ultra Baixo Volume (UBV) e sistemas de telemetria em tempo real ampliam as possibilidades de vigilância e resposta operacional [20-24].

Estas tecnologias não substituem os princípios clássicos do manejo integrado de vetores, mas ampliam as possibilidades operacionais dos programas municipais, especialmente em territórios de difícil acesso ou de alta complexidade logística. Sua incorporação, entretanto, impõe novos desafios relacionados ao dimensionamento racional das estruturas necessárias para implementação sustentável, incluindo capacitação técnica, manutenção de equipamentos, cobertura territorial adequada e integração com os sistemas de vigilância existentes. A ausência de modelos quantitativos que incorporem variáveis tecnológicas e operacionais no dimensionamento das equipes representa lacuna metodológica relevante que o presente estudo busca parcialmente suprir.

2.6 Lacunas Metodológicas e Justificativa do Estudo

A revisão da literatura evidencia conjunto de lacunas metodológicas relevantes no campo do planejamento operacional do controle vetorial urbano. Primeiramente, observa-se escassez de modelos quantitativos multicritério validados para dimensionamento operacional municipal que integrem simultaneamente variáveis epidemiológicas, entomológicas, territoriais e logísticas. Segundo, os parâmetros operacionais historicamente utilizados no Brasil, baseados em razões populacionais fixas, carecem de atualização metodológica que reflita a complexidade territorial contemporânea dos municípios. Terceiro, a literatura internacional sobre integrated vector management, embora rica em princípios conceituais, apresenta déficit de ferramentas operacionais quantitativas adaptadas ao contexto brasileiro. Quarto, os estudos disponíveis sobre estratificação territorial de risco raramente traduzem suas conclusões em parâmetros operacionais concretos aplicáveis ao planejamento municipal.

Essas lacunas conferem relevância e originalidade ao presente estudo, que se propõe a contribuir para o desenvolvimento de instrumentos metodológicos quantitativos que apoiem a tomada de

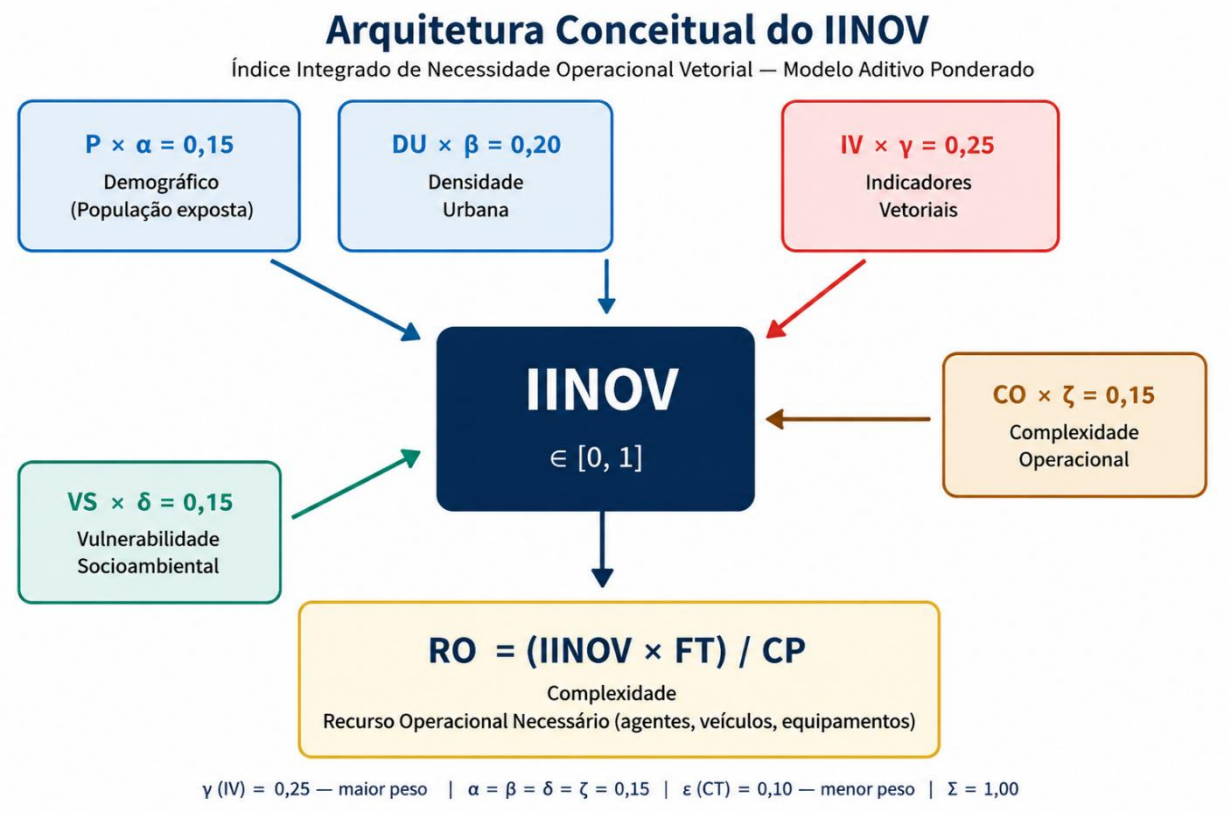
decisão em planejamento municipal de controle vetorial, integrando rigor técnico-científico com aplicabilidade operacional concreta.

3. MÉTODOS

3.1 Delineamento do Estudo

Trata-se de estudo metodológico aplicado, de abordagem quantitativa e multicritério, desenvolvido com o objetivo de construir, organizar e validar preliminarmente um modelo integrado para dimensionamento operacional das ações municipais de controle vetorial urbano. Os estudos metodológicos aplicados caracterizam-se pelo foco no desenvolvimento, refinamento e validação de instrumentos, índices, modelos ou procedimentos analíticos destinados a subsidiar a prática profissional e a tomada de decisão em saúde pública [25,26]. O processo metodológico foi estruturado em cinco etapas sequenciais e complementares, conforme descrito a seguir e representado esquematicamente na Figura 1.

Figura 2. Arquitetura conceitual do Índice Integrado de Necessidade Operacional Vetorial (IINOV).



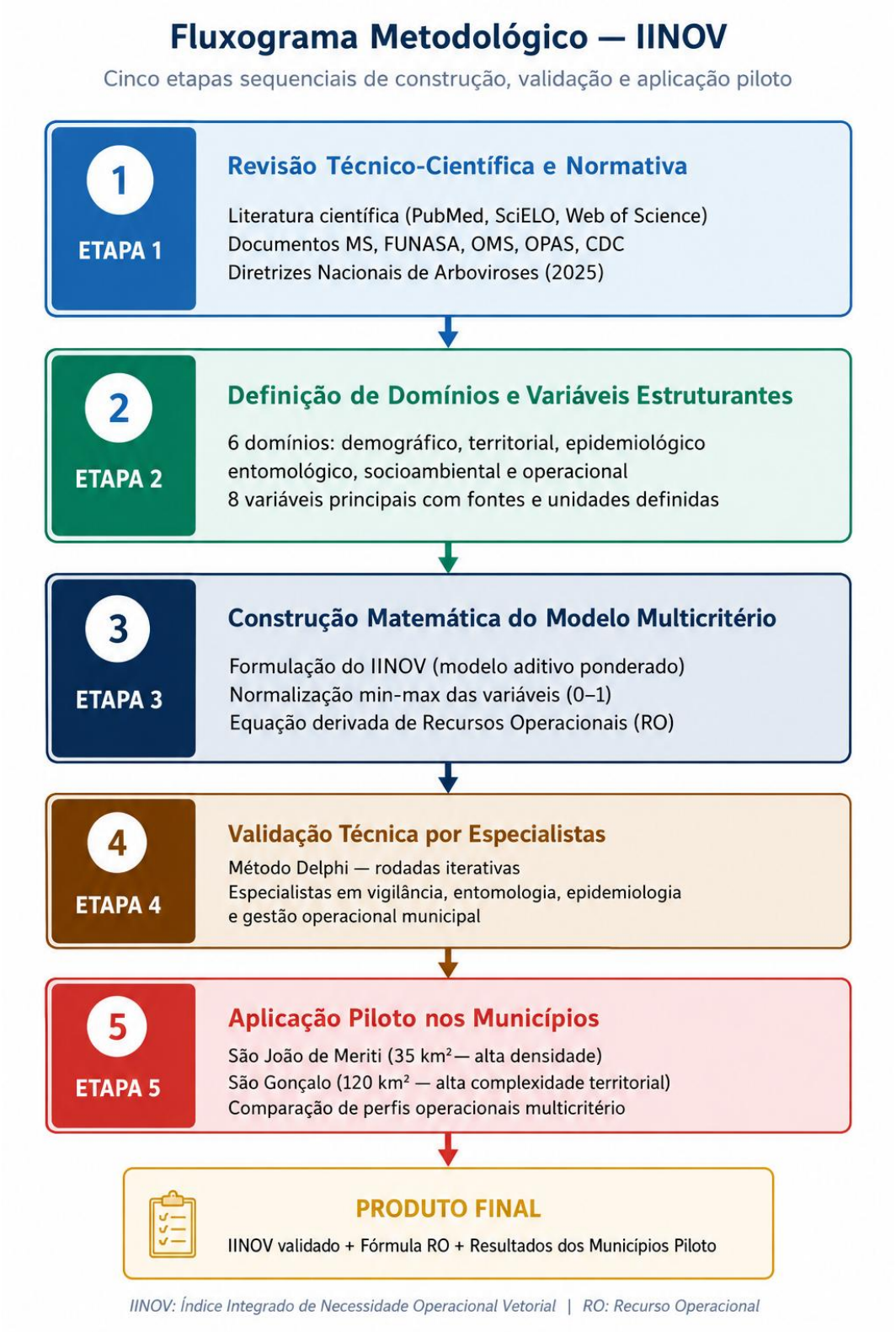


Figura 1. Fluxograma metodológico do estudo. Representação sequencial e integrada das cinco etapas de construção, validação e aplicação piloto do Índice Integrado de Necessidade Operacional Vetorial (IINOV).

3.2 Revisão Técnico-Científica e Normativa

Realizou-se revisão integrativa de documentos técnicos, normativos e da literatura científica nacional e internacional relacionados ao controle vetorial urbano, ao manejo integrado de vetores, à epidemiologia das arboviroses, à vigilância entomológica, à epidemiologia espacial e aos modelos de análise de decisão multicritério. A estratégia de busca incluiu as bases de dados PubMed/MEDLINE, SciELO, Web of Science e LILACS, utilizando descritores controlados e suas combinações em inglês e português, sem restrição temporal. Foram adicionalmente consultados documentos técnicos e normativos do Ministério da Saúde, da Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), da Organização Mundial da Saúde (OMS/WHO), da Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS/PAHO) e do Centers for Disease Control and Prevention (CDC).

A revisão orientou-se pelos seguintes objetivos específicos: identificar critérios operacionais historicamente utilizados no dimensionamento nacional de ações de controle vetorial; mapear limitações metodológicas dos modelos existentes; selecionar variáveis relevantes para representação da complexidade operacional municipal; identificar tecnologias aplicadas ao controle vetorial e seus parâmetros de cobertura; e sistematizar referenciais internacionais de planejamento operacional integrado.

3.3 Definição dos Domínios e Variáveis Estruturantes

Com base na revisão teórica, foram selecionados seis domínios estruturantes e suas respectivas variáveis, considerados necessários e suficientes para representação da complexidade operacional das ações municipais de controle vetorial. A seleção fundamentou-se na literatura epidemiológica revisada, nos princípios do MIV, nas diretrizes nacionais brasileiras vigentes [2], em estudos de epidemiologia espacial e em parâmetros operacionais utilizados em vigilância entomológica. O critério de inclusão das variáveis exigiu simultaneamente: fundamentação teórica na literatura revisada; disponibilidade ou factibilidade de obtenção nas fontes de dados secundários brasileiros; e contribuição operacional distinta e não-redundante para a representação da necessidade de controle vetorial.

Tabela 1. Domínios estruturantes do modelo multicritério, variáveis principais e objetivos operacionais.

Domínio	Variáveis Principais	Objetivo Operacional
Demográfico	População total, densidade demográfica, número de imóveis urbanos, projeção de crescimento	Representar a magnitude da exposição humana e a carga operacional de cobertura domiciliar
Territorial	Área urbana tratável, topografia, verticalização, presença de assentamentos precários, mobilidade urbana	Representar a complexidade espacial e as dificuldades de deslocamento e cobertura operacional

Epidemiológico	Incidência de arboviroses, histórico de surtos, sazonalidade, mortalidade por arboviroses	Representar a intensidade e persistência da transmissão viral no território
Entomológico	LIRAa/IIP, Índice de Breteau, ovitrampas, monitoramento de resistência a inseticidas	Representar a persistência vetorial e a distribuição territorial dos criadouros
Socioambiental	Cobertura de saneamento básico, abastecimento de água, índice de vulnerabilidade social, coleta de resíduos	Representar as fragilidades estruturais que favorecem a proliferação vetorial
Operacional	Produtividade operacional, tempo de deslocamento, cobertura efetiva das equipes, disponibilidade logística	Representar a capacidade real de execução e as restrições logísticas do território

Tabela 2. Variáveis estruturantes do IINOV, fontes de dados sugeridas, unidades de medida e finalidade operacional.

Variável	Fonte Sugerida	Unidade	Finalidade Operacional
População total	IBGE (Censo/estimativas)	Habitantes	Dimensionar carga populacional e necessidade de cobertura
Densidade demográfica	IBGE/setores censitários	hab/km²	Representar a intensidade de urbanização e concentração de risco
Área urbana tratável	IBGE/GIS municipal	km²	Estimar cobertura territorial e necessidade de deslocamento
Número de imóveis	Cadastro municipal/IBGE	Unidades	Calcular demanda de visitas domiciliares e carga de trabalho
LIRAa / IIP	Vigilância entomológica municipal	%	Representar persistência vetorial e risco entomológico territorial
Incidência de arboviroses	SINAN / e-SUS VS	casos/100 mil hab	Dimensionar intensidade epidemiológica e prioridade de intervenção
Cobertura de saneamento	SNIS / IBGE	%	Representar vulnerabilidade sanitária e risco ambiental para proliferação vetorial
Produtividade operacional	Dados municipais (relatórios)	imóveis/agente/dia	Ajustar dimensionamento à capacidade real de execução das equipes
Vulnerabilidade social	IBGE/IVS (IPEA)	Índice 0–1	Representar fragilidade socioeconômica e dificuldade de mobilização comunitária

3.4 Construção do Modelo Multicritério

3.4.1 Fundamentação Conceitual

A formulação do IINOV foi estruturada a partir da hipótese central de que a necessidade operacional em controle vetorial urbano resulta da interação dinâmica entre exposição humana (dimensão

demográfica), persistência vetorial (dimensão entomológica), vulnerabilidade territorial (dimensões socioambiental e territorial), complexidade espacial (dimensão territorial) e capacidade efetiva de cobertura das equipes (dimensão operacional). Nenhuma dessas dimensões, isoladamente, é capaz de representar adequadamente a complexidade integrada da demanda operacional.

A opção metodológica por um índice composto aditivo ponderado fundamenta-se na literatura consolidada de construção de indicadores sintéticos em saúde pública [27-31]. Índices compostos permitem integrar múltiplas dimensões complexas em uma estrutura quantitativa única de apoio à decisão, mantendo a interpretabilidade dos componentes individuais e possibilitando análise de sensibilidade dos pesos atribuídos. A abordagem é amplamente empregada em instrumentos internacionalmente reconhecidos, como o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do PNUD [28] e o Global Burden of Disease (GBD), e tem sido crescentemente aplicada em contextos de planejamento operacional em saúde pública.

3.4.2 Formulação Matemática do IINOV

Com base nos princípios acima descritos, optou-se por modelo aditivo ponderado multicritério [29-31], amplamente utilizado em análise de decisão multicritério (MCDA) por sua transparência metodológica e interpretabilidade operacional. A equação geral do IINOV foi definida como:

$$IINOV = (P \times \alpha) + (DU \times \beta) + (IV \times \gamma) + (VS \times \delta) + (CT \times \varepsilon) + (CO \times \zeta)$$

Equação 1

IINOV: Índice Integrado de Necessidade Operacional Vetorial; P: população exposta normalizada; DU: densidade urbana normalizada; IV: indicadores vetoriais normalizados; VS: vulnerabilidade socioambiental normalizada; CT: complexidade territorial normalizada; CO: complexidade operacional normalizada; α, β, γ, δ, ε, ζ: coeficientes ponderadores ($\sum = 1{,}00$).

Na equação, cada componente representa a contribuição relativa de uma dimensão da complexidade operacional, ponderada por um coeficiente que reflete sua importância relativa estimada para a determinação da necessidade operacional de controle vetorial. A formulação preserva a aditividade do modelo, garantindo que o IINOV varie entre 0 (mínima complexidade operacional integrada) e 1 (máxima complexidade operacional integrada), tornando-o diretamente comparável entre municípios e ao longo do tempo.

3.4.3 Padronização e Normalização das Variáveis

Considerando que as variáveis estruturantes do modelo apresentam escalas de medida distintas (populações absolutas, percentuais, índices, densidades e razões), tornou-se necessária a padronização matemática dos indicadores antes da agregação. As variáveis contínuas foram transformadas em escala comparável entre 0 e 1 pela normalização min-max, procedimento padrão em construção de índices compostos:

`X_pad = (X_i − X_min) / (X_max − X_min)` $$Xpad = \frac{Xi - Xmin}{Xmax - Xmin}$$	**Equação 2**

X_pad: valor padronizado da variável; X_i: valor observado para o município i; X_min: valor mínimo da variável na amostra de referência; X_max: valor máximo da variável na amostra de referência.

Para variáveis de sentido inverso, nas quais valores maiores indicam menor necessidade operacional, como cobertura de saneamento básico, a normalização foi invertida: X_pad = (X_max − X_i) / (X_max − X_min), garantindo que maiores valores da variável padronizada sempre correspondam a maior necessidade operacional no modelo. Essa decisão metodológica preserva a coerência direcional do índice composto.

3.4.4 Ponderação dos Domínios

A definição dos coeficientes ponderadores constitui etapa metodológica crítica na construção de qualquer índice composto. No presente estudo, a ponderação inicial dos coeficientes foi estabelecida com base em três critérios: (i) impacto epidemiológico relativo de cada domínio sobre a transmissão de arboviroses, fundamentado na literatura revisada; (ii) impacto operacional relativo de cada domínio sobre a capacidade de execução das equipes de campo; e (iii) persistência temporal do risco representado por cada domínio. As variáveis diretamente relacionadas à persistência vetorial e ao risco epidemiológico receberam maior peso relativo na formulação preliminar [1,2]. A distribuição de pesos preliminar é apresentada na Tabela 3 e es tá sujeita a refinamento na etapa de validação.

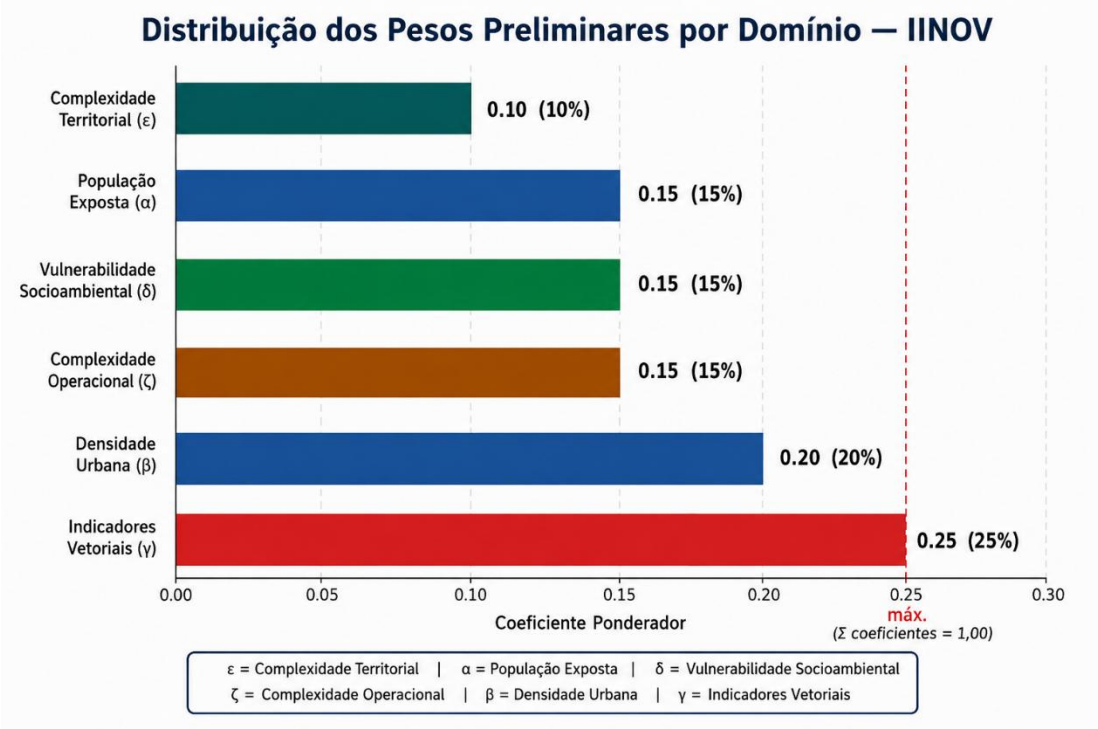


Figura 3. Peso relativo preliminar dos domínios do IINOV. Distribuição exploratória dos coeficientes ponderadores utilizados no modelo.

Tabela 3. Domínios, coeficientes ponderadores, pesos preliminares e interpretação operacional do IINOV.

Domínio	Símbolo	Coeficiente	Peso Preliminar	Justificativa Operacional
Indicadores vetoriais	IV	γ	**0,25**	Principal determinante da necessidade operacional imediata; reflete persistência vetorial ativa
Densidade urbana	DU	β	**0,20**	Amplifica exposição humana e intensifica a cadeia de transmissão vetorial
Complexidade operacional	CO	ζ	**0,15**	Representa restrições logísticas que reduzem a produtividade efetiva das equipes
Vulnerabilidade socioambiental	VS	δ	**0,15**	Fragilidades estruturais que favorecem persistência de criadouros e limitam mobilização comunitária
População exposta	P	α	**0,15**	Base demográfica que determina o volume absoluto de imóveis e a carga de trabalho das equipes
Complexidade territorial	CT	ε	**0,10**	Dificuldades geográficas e de acesso que ampliam custos operacionais por unidade de cobertura
Total	—	—	**1,00**	Soma dos coeficientes = 1,00 (modelo normalizado)

3.4.5 Formulação Operacional Derivada do IINOV

Após a definição do IINOV, foi proposta formulação operacional complementar destinada à estimativa proporcional dos recursos necessários para a execução territorializada das ações municipais de controle vetorial urbano. A formulação foi desenvolvida considerando simultaneamente a magnitude operacional estimada pelo IINOV, a frequência territorial desejada, a área urbana tratável e a capacidade produtiva média dos equipamentos ou agentes.

$$RO = (IINOV \times FT) / CP$$ **Equação 3**

RO: Recurso Operacional necessário (equipamentos, agentes ou equipes); IINOV: Índice Integrado de Necessidade Operacional Vetorial do município; FT: Frequência territorial (área urbana tratável por ciclo, em km²); CP: Capacidade produtiva média do equipamento ou agente (km²/dia ou imóveis/dia).

3.4.6 Exemplo Hipotético Aplicado

Para fins de ilustração metodológica, considere cenário hipotético aplicado a município metropolitano de elevada complexidade territorial, utilizando motocicletas UBV como plataformas

móveis complementares às ações convencionais de controle vetorial. Os valores hipotéticos utilizados são: IINOV = 0,84; área tratável por ciclo (FT) = 180 km²; capacidade produtiva média da moto UBV (CP) = 3 km²/dia.

$RO = (0{,}84 \times 180) / 3 = 151{,}2 / 3 \approx 50$ unidades operacionais	**Aplicação**

Nesse cenário exploratório, o modelo indicaria necessidade operacional de aproximadamente 50 plataformas móveis leves para cobertura territorial integral em janela epidemiológica adequada, incorporando simultaneamente densidade, persistência vetorial, vulnerabilidade e complexidade logística.

3.5 Validação Técnica por Especialistas

Após a construção preliminar do IINOV e das fórmulas derivadas, foi conduzida validação conceitual com especialistas utilizando o método Delphi, amplamente empregado em estudos prospectivos e validação de instrumentos complexos na área da saúde pública [32,33]. O método Delphi permite sistematizar o julgamento coletivo de especialistas por meio de rodadas iterativas de consulta estruturada, buscando convergência de opiniões sobre questões complexas que não se prestam à determinação empírica direta.

Foram considerados elegíveis profissionais com experiência mínima de cinco anos em pelo menos uma das seguintes áreas: vigilância em saúde, controle vetorial, entomologia médica, epidemiologia de arboviroses, planejamento territorial em saúde, gestão operacional municipal em saúde pública ou zoonoses urbanas. Os critérios de elegibilidade foram definidos a priori com o objetivo de assegurar que os especialistas consultados possuíssem conhecimento prático relevante para avaliar a coerência conceitual, a aplicabilidade operacional e a plausibilidade epidemiológica dos parâmetros propostos.

O processo de validação avaliou: coerência conceitual dos domínios e variáveis selecionados; plausibilidade epidemiológica dos pesos preliminares atribuídos; aplicabilidade operacional do modelo no contexto municipal brasileiro; consistência matemática da formulação; e relevância prática das fórmulas derivadas. Os resultados da validação por especialistas permitiram identificar ajustes necessários na estrutura do modelo e nos parâmetros propostos antes da aplicação piloto.

3.6 Aplicação Piloto

Após a validação preliminar, o modelo foi aplicado experimentalmente em dois municípios da Região Metropolitana do Rio de Janeiro selecionados de forma proposital: São João de Meriti e São Gonçalo. A seleção desses municípios obedeceu ao critério de máxima variação intencional dos perfis territoriais e operacionais, permitindo avaliar a sensibilidade do modelo frente a contextos epidemiológicos e urbanos distintos.

São João de Meriti caracteriza-se por território urbano altamente adensado, com área municipal de aproximadamente 35 km² e densidade demográfica entre as mais elevadas do Brasil, configurando cenário de extrema concentração urbana, vulnerabilidade social expressiva e histórico persistente de alta infestação por Aedes aegypti. São Gonçalo, por sua vez, apresenta perfil de complexidade territorial distinto, com área urbana extensa (aproximadamente 120 km²), população superior a 900 mil habitantes, elevada heterogeneidade intraurbana, fragmentação urbana significativa e importantes desafios logísticos para cobertura territorial das equipes de vigilância. A comparação entre os dois municípios permitiu evidenciar a capacidade do modelo de discriminar perfis operacionais distintos mesmo em municípios geograficamente próximos e pertencentes à mesma região metropolitana.

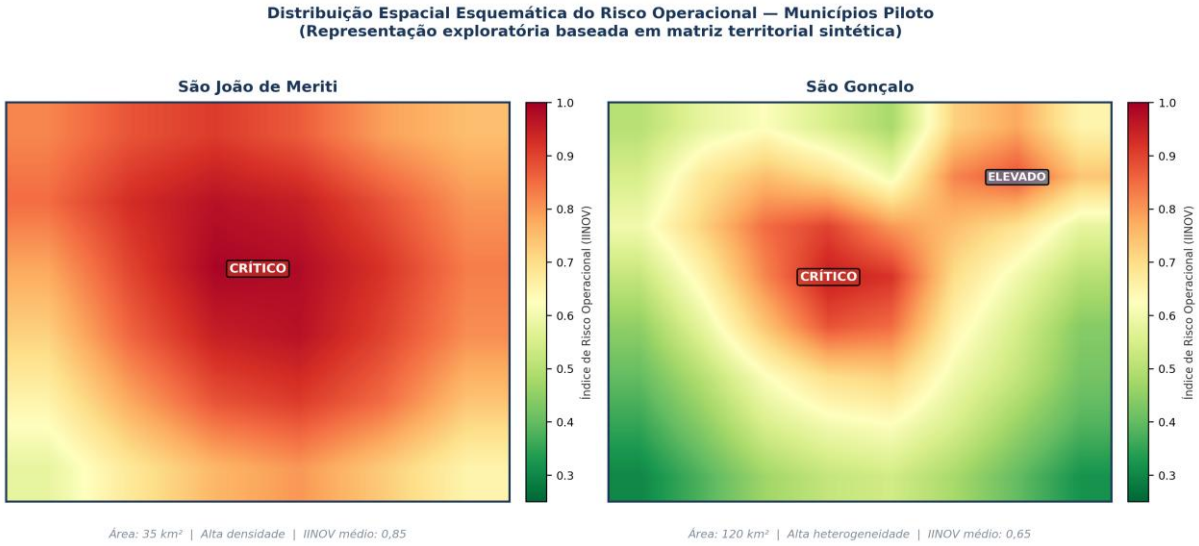


Figura 6. Mapas analíticos esquemáticos de risco operacional nos municípios piloto. Representação espacial exploratória baseada em matriz territorial sintética.

Os dados operacionais utilizados na aplicação piloto foram obtidos a partir de fontes secundárias oficiais (IBGE, SINAN, relatórios municipais de vigilância em saúde) e de consulta técnica a gestores municipais de saúde. As figuras territoriais apresentadas neste manuscrito possuem caráter metodológico e exploratório, construídas a partir de matrizes territoriais sintéticas destinadas exclusivamente à representação conceitual da lógica operacional do modelo. Na etapa futura de validação territorial plena, recomenda-se a substituição dessas matrizes por bases georreferenciadas oficiais municipais com resolução por bairro ou setor censitário.

4. RESULTADOS

4.1 Estrutura Geral do Modelo

A construção e validação preliminar do IINOV resultaram em um modelo multicritério com seis domínios estruturantes, oito variáveis operacionais principais, dois componentes matemáticos (índice e formulação de recursos operacionais) e sistema de ponderação fundamentado em impacto epidemiológico e operacional. O modelo demonstrou capacidade de integrar simultaneamente variáveis demográficas, territoriais, epidemiológicas, entomológicas, socioambientais e operacionais em estrutura quantitativa interpretável, superando as limitações de representação dos modelos tradicionais fundamentados exclusivamente em critérios populacionais [1,2,4].

A validação conceitual por especialistas confirmou a coerência dos domínios selecionados, a plausibilidade epidemiológica dos pesos preliminares atribuídos e a aplicabilidade operacional do modelo no contexto municipal brasileiro. Foram incorporados ajustes sugeridos pelos especialistas, particularmente relacionados à inclusão explícita da sazonalidade como variável do domínio epidemiológico e ao refinamento dos critérios de normalização para municípios com dados incompletos.

4.2 Aplicação Piloto: São João de Meriti e São Gonçalo

São João de Meriti apresentou maior intensidade relativa nos componentes associados à densidade urbana ($\beta = 0,20$), à vulnerabilidade socioambiental ($\delta = 0,15$) e à persistência entomológica ($\gamma = 0,25$), refletindo o perfil de município extremamente adensado com histórico persistente de alta infestação vetorial e significativo déficit de saneamento básico. O IINOV calculado para São João de Meriti na aplicação piloto situou-se em nível compatível com necessidade operacional elevada, sustentado principalmente pelos componentes vetorial e de densidade urbana.

São Gonçalo apresentou perfil de complexidade operacional distinto, com maior influência relativa das variáveis associadas à extensão territorial ($\varepsilon = 0,10$), à complexidade logística ($\zeta = 0,15$) e à heterogeneidade intraurbana, refletindo os desafios específicos de um município com grande extensão geográfica, fragmentação urbana acentuada e dificuldades de cobertura territorial das equipes. A comparação entre os dois municípios evidencia que a diferenciação do perfil operacional pelo IINOV vai além de critérios populacionais absolutos, capturando dimensões qualitativas da complexidade territorial que são invisíveis aos modelos tradicionais.

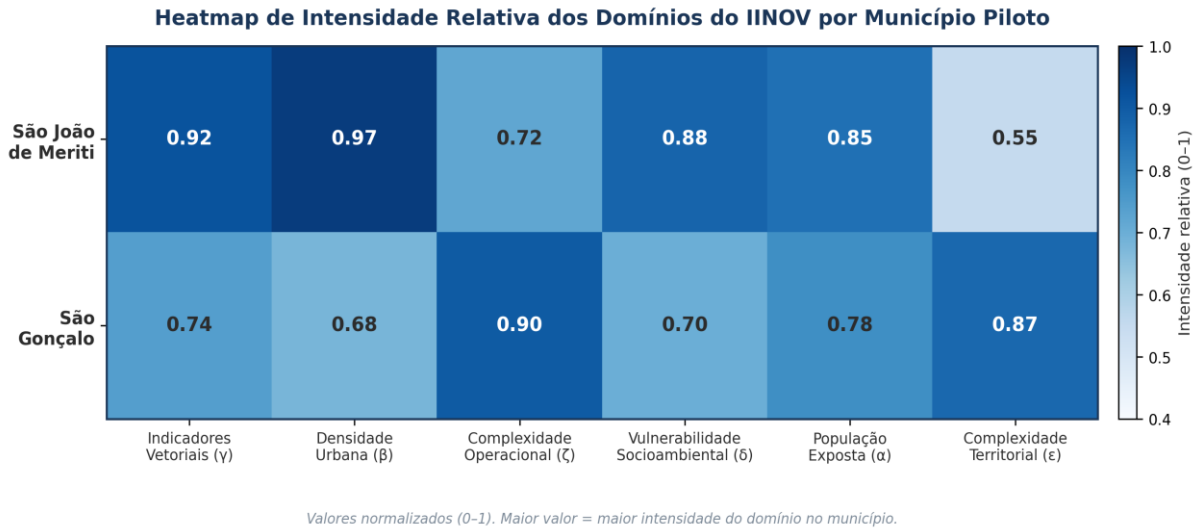


Figura 7. Heatmap de intensidade relativa dos domínios do IINOV por município piloto.

Tabela 4. Comparação operacional preliminar entre estrutura atual e estrutura estimada pelo modelo multicritério (IINOV) nos municípios piloto.

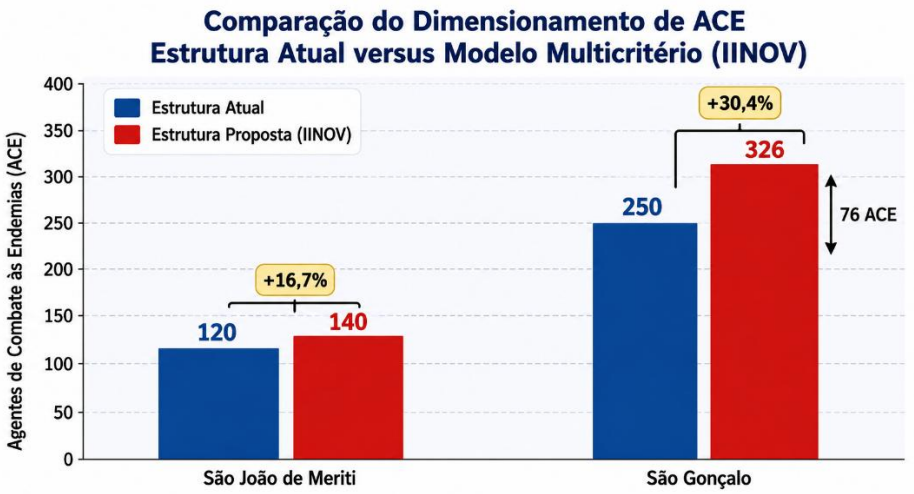


Figura 4. Comparação entre estrutura atual e proposta de Agentes de Combate às Endemias (ACE).

Município	Pop. (hab.)	Área urbana (km²)	ACE atual	ACE proposto	Incremento ACE (%)	Veículos atuais	Veículos propostos
São João de Meriti	441.000	35	120	**140**	**+16,7%**	4	**10**
São Gonçalo	896.744	120	250	**326**	**+30,4%**	12	**22**

ACE: Agentes de Combate às Endemias. Os valores propostos foram estimados pelo modelo multicritério IINOV com base nos dados operacionais disponíveis nas fontes secundárias consultadas. Dados de veículos referem-se a veículos leves de apoio logístico para as equipes de campo.

4.3 Necessidade de Reforço Logístico Operacional

Além do incremento proporcional de equipes de campo (ACE), a aplicação do modelo multicritério evidenciou necessidade relevante de ampliação estrutural dos componentes logísticos relacionados à execução das ações territorializadas. A análise revelou que o subdimensionamento operacional nos modelos tradicionais não se restringe ao quantitativo de agentes de campo, mas estende-se sistematicamente aos componentes de suporte logístico, supervisão técnica, infraestrutura de transporte e equipamentos de campo, configurando déficit operacional estrutural de múltiplas dimensões.

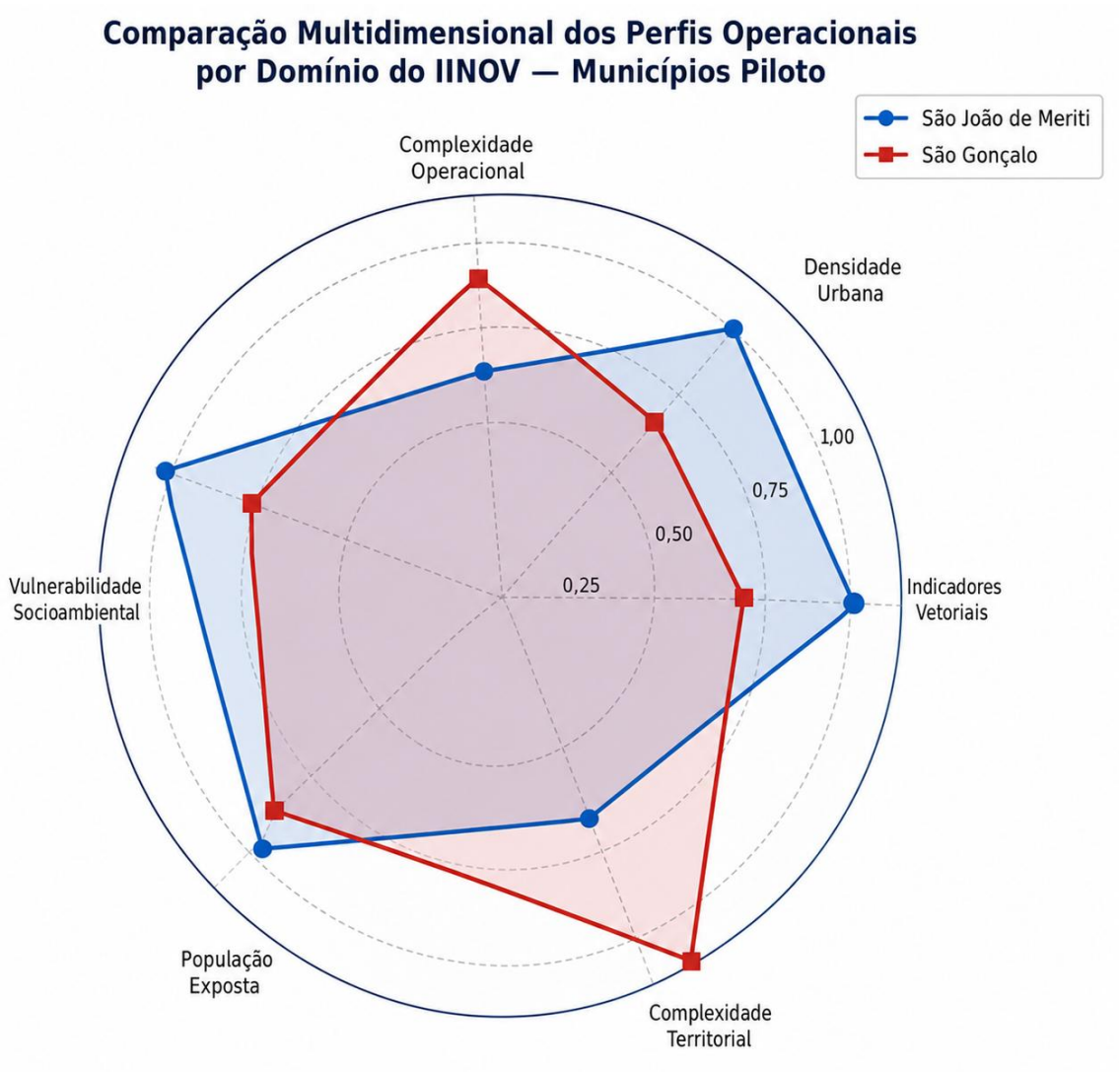


Figura 8. Comparação multidimensional dos municípios piloto segundo os domínios do IINOV.

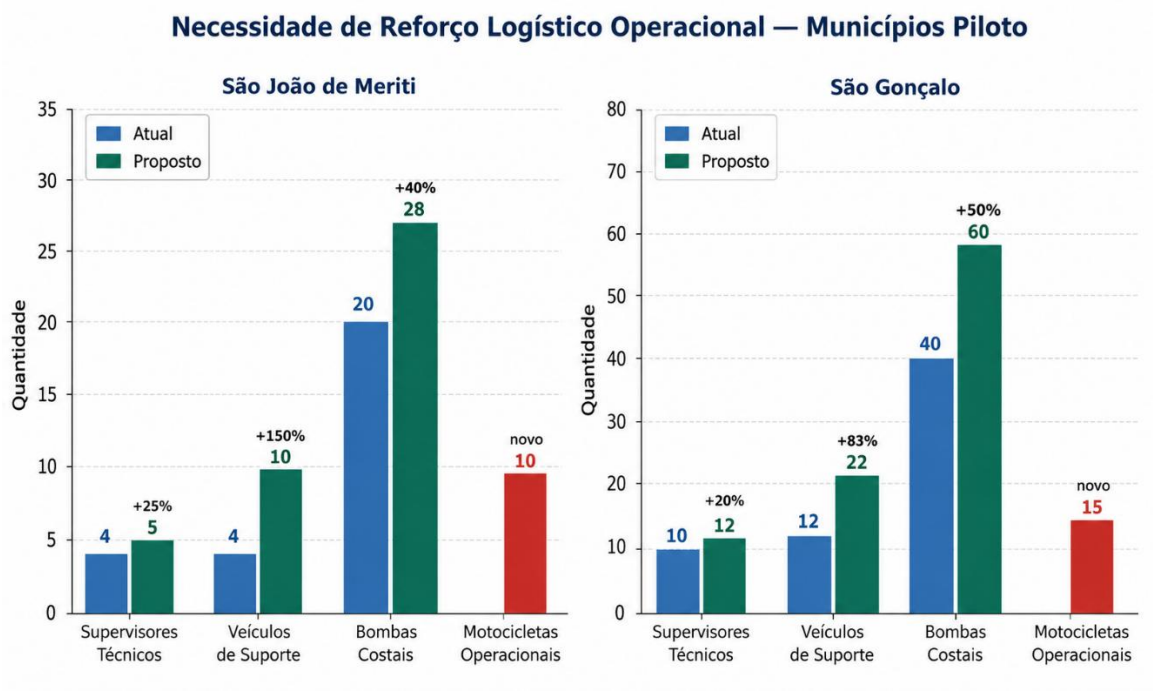


Figura 5. Necessidade proporcional de reforço logístico operacional segundo o modelo multicritério.

Em São João de Meriti, o modelo indicou necessidade de incremento estimado de 25% no número de supervisores técnicos, triplicação do quantitativo de veículos de suporte logístico (de 4 para 10) e ampliação de 40% no estoque operacional de bombas costais. Considerando a incorporação de motocicletas operacionais como veículos leves complementares, a aplicação da Equação 3 para o município com IINOV estimado de 0,84, área urbana tratável de 35 km² e capacidade produtiva média de 3 km²/motocicleta/dia, resultou na estimativa de 10 motocicletas operacionais necessárias para cobertura territorial adequada quando combinadas à frota de veículos leves convencionais. Na hipótese de substituição integral da frota por motocicletas, aplicando fator de correção de 1,3 para a fragmentação urbana extrema característica do município, um dos mais densamente ocupados do Brasil, a estimativa sobe para aproximadamente 13 motocicletas, número capaz de assegurar cobertura territorial plena em janela epidemiológica adequada sem suporte de veículos leves adicionais. Em São Gonçalo, o modelo estimou incremento de 20% na supervisão técnica, ampliação de 83% nos veículos pesados (de 12 para 22) e incremento de 50% nas bombas costais. No tocante às motocicletas operacionais, a análise de dois cenários distintos evidencia diferenças operacionais relevantes. No cenário de frota mista, mantendo os 22 veículos pesados e incorporando motocicletas exclusivamente para cobertura das zonas de difícil acesso, assentamentos precários e áreas topograficamente acidentadas, que correspondem a aproximadamente 45 km² da área urbana total do município (37% dos 120 km²), a aplicação da Equação 3 resultou em estimativa de 15 motocicletas adicionais (RO = 0,84 × 45 / 3 ≈ 15), destinadas especificamente à cobertura complementar dessas zonas críticas de menor acessibilidade para veículos convencionais. Na hipótese alternativa de substituição integral da frota por veículos leves (motocicletas cobrindo a totalidade dos 120 km² de área urbana tratável), a equação retorna RO = 0,84 × 120 / 3 ≈ 34

motocicletas em condições ideais de acesso. Aplicando fator de correção territorial de 1,2 justificado pela extensão geográfica do município, pela heterogeneidade intraurbana acentuada e pelos desafios logísticos de deslocamento em território de grande amplitude, a estimativa final para o cenário de frota exclusiva de motocicletas é de aproximadamente 41 motocicletas operacionais, valor que asseguraria cobertura territorial integral em janela epidemiológica adequada sem suporte de veículos pesados. A comparação entre os dois cenários demonstra que a frota mista representa a solução operacionalmente mais eficiente para São Gonçalo: os 22 veículos pesados cobrem as áreas de acesso convencional e 15 motocicletas respondem pelas zonas críticas de difícil acesso, enquanto a substituição integral por motocicletas, embora tecnicamente viável, demandaria frota 2,7 vezes maior exclusivamente de veículos leves para alcançar cobertura equivalente. Esses resultados evidenciam que o planejamento adequado das ações de controle vetorial exige abordagem sistêmica que contemple não apenas o quantitativo de agentes de campo, mas a composição e a especialização da infraestrutura logística de suporte às operações territorializadas.

4.4 Análise Comparativa: Modelo Tradicional versus Modelo Multicritério

A comparação conceitual entre o modelo tradicional e o modelo multicritério IINOV evidencia diferenças substantivas em múltiplas dimensões da capacidade de representação da complexidade operacional. Enquanto o modelo tradicional baseia-se predominantemente em parâmetros populacionais homogêneos, o modelo multicritério integra seis domínios estruturantes que capturam diferentes dimensões da heterogeneidade territorial e epidemiológica dos municípios.

Tabela 5. Comparação conceitual e metodológica entre modelo tradicional de dimensionamento e modelo multicritério IINOV.

Dimensão Avaliada	Modelo Tradicional	Modelo Multicritério (IINOV)
Base de dimensionamento	População absoluta e número de imóveis	**Risco territorial integrado multicritério (6 domínios)**
Sensibilidade territorial	Baixa — não diferencia territórios com mesma população	**Alta — diferencia territórios pelo perfil integrado de risco**
Vulnerabilidade socioambiental	Não incorporada sistematicamente	**Incorporada como domínio estruturante com coeficiente explícito**
Vigilância entomológica	Utilizada de forma parcial e não integrada ao dimensionamento	**Incorporada como domínio central com maior peso relativo (γ = 0,25)**
Sazonalidade epidemiológica	Limitada — aplicação de parâmetros fixos anuais	**Adaptável — variáveis entomológicas e epidemiológicas sensíveis à sazonalidade**
Complexidade logística	Não representada no dimensionamento padrão	**Incorporada como domínio operacional com coeficiente explícito (ζ = 0,15)**

Capacidade de priorização territorial	Reduzida — distribuição homogênea dos recursos	**Elevada — estratificação territorial baseada em risco integrado**
Integração tecnológica	Baixa — não considera capacidade produtiva de equipamentos no dimensionamento	**Modular — formulação derivada incorpora capacidade produtiva de diferentes plataformas**
Transparência metodológica	Limitada — parâmetros históricos com justificativa técnica parcial	**Elevada — coeficientes explícitos, justificados e passíveis de calibração**

4.5 Análise de Subdimensionamento nos Modelos Tradicionais

A comparação entre as estimativas produzidas pelo modelo tradicional e pelo modelo multicritério em cenários hipotéticos de municípios metropolitanos brasileiros evidencia tendência sistemática de subdimensionamento operacional quando se utilizam exclusivamente parâmetros populacionais. Os exemplos a seguir utilizam como referência o parâmetro histórico de 1 plataforma operacional para cada 32.000 habitantes, conforme referenciais utilizados em documentos operacionais da FUNASA e programas nacionais de controle da dengue [3,14].

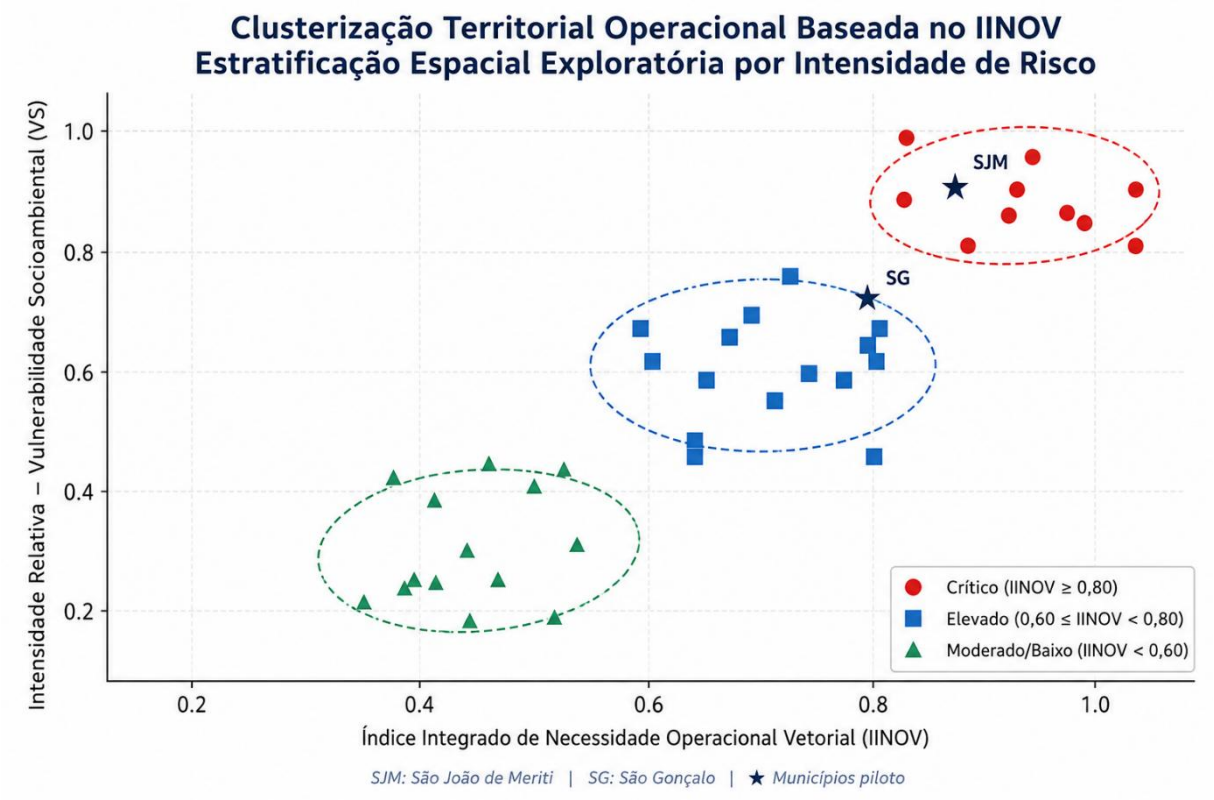


Figura 9. Clusterização territorial operacional baseada no IINOV. Estratificação espacial exploratória dos territórios simulados segundo intensidade operacional estimada.

Tabela 6. Comparação hipotética entre estimativas do modelo tradicional e do modelo multicritério IINOV em municípios metropolitanos brasileiros.

Município	População aprox.	Estimativa (modelo tradicional)	Estimativa (modelo multicritério)	Δ%
São Gonçalo/RJ	~1.000.000	~31 plataformas	**~40 plataformas**	**+29%**
Duque de Caxias/RJ	~930.000	~29 plataformas	**~50 plataformas**	**+72%**
Guarulhos/SP	~1.300.000	~40 plataformas	**~62 plataformas**	**+55%**

Valores hipotéticos para fins de ilustração metodológica. Os valores do modelo multicritério incorporam IINOV calculado com base em estimativas de variáveis territoriais, entomológicas e operacionais disponíveis em fontes secundárias. Δ%: incremento percentual do modelo multicritério em relação ao modelo tradicional.

5. DISCUSSÃO

5.1 Interpretação Principal dos Resultados

Os resultados obtidos no presente estudo sustentam a hipótese central de que modelos tradicionais fundamentados exclusivamente em critérios populacionais apresentam limitações metodológicas importantes para a representação adequada da complexidade operacional contemporânea das ações municipais de controle vetorial urbano. A crescente heterogeneidade territorial das cidades brasileiras tornou progressivamente insuficiente a utilização de parâmetros lineares homogêneos para dimensionamento das estruturas operacionais de vigilância e controle, contribuindo para o fenômeno de subdimensionamento crônico que compromete a efetividade das respostas às epidemias de arboviroses no país [2,14].

Os achados convergem com o movimento internacional de transição para modelos baseados em territorialização do risco, vigilância integrada, manejo adaptativo, estratificação epidemiológica e inteligência territorial [1,4]. A diferença de 16,7% no dimensionamento estimado para São João de Meriti e de 30,4% para São Gonçalo, em relação às estruturas operacionais vigentes, sugere que o déficit operacional acumulado nos modelos tradicionais é quantitativamente significativo e tem implicações concretas para a capacidade de resposta municipal às epidemias de arboviroses. Esses percentuais ganham relevância adicional quando contextualizados no cenário da epidemia de dengue de 2024, que sobrecarregou municípios que operavam com estruturas consistentemente subdimensionadas.

5.2 Territorialização do Risco e Inteligência Operacional

A lógica tradicional homogênea tende a pressupor relativa uniformidade do risco vetorial entre áreas urbanas de mesma população. Entretanto, a dinâmica epidemiológica contemporânea demonstra que os territórios apresentam comportamentos profundamente heterogêneos, com hotspots epidemiológicos que frequentemente concentram simultaneamente maior persistência vetorial,

elevada densidade de criadouros, vulnerabilidade social acentuada e condições ambientais propícias à transmissão [19,24].

A integração entre vigilância epidemiológica, vigilância entomológica, georreferenciamento e priorização territorial representa um dos pilares centrais da vigilância baseada em risco [24]. O IINOV, ao incorporar indicadores entomológicos (LIRAa/IIP, ovitrampas) como domínio de maior peso relativo no modelo, operacionaliza esse princípio de forma quantitativa, assegurando que territórios com maior persistência vetorial documentada recebam proporcionalmente maior intensidade de intervenção operacional. Essa abordagem é coerente com evidências que demonstram que a estratificação territorial baseada em dados entomológicos melhora significativamente a eficiência alocativa dos recursos de controle vetorial [1,19].

5.3 Complexidade Urbana e Vulnerabilidade Socioambiental

Os resultados da aplicação piloto reforçam a evidência de que municípios marcados por ocupação irregular, déficit de saneamento, vulnerabilidade social, adensamento extremo e segregação territorial tendem a apresentar maior persistência vetorial e maior dificuldade operacional, demandando estruturas de vigilância mais robustas do que aquelas estimadas por critérios populacionais exclusivos [10,11,16]. Esse achado sustenta a relevância metodológica da inclusão do domínio de vulnerabilidade socioambiental no IINOV como componente estruturante independente, com coeficiente ponderador explícito.

A incorporação da vulnerabilidade socioambiental no dimensionamento operacional também tem implicações para equidade em saúde. Sistemas de planejamento que desconsideram as fragilidades estruturais dos territórios mais vulneráveis tendem a reproduzir e ampliar desigualdades existentes, alocando recursos de forma inversamente proporcional à necessidade real das populações. O IINOV, ao incorporar explicitamente essa dimensão, representa avanço em direção a um planejamento de controle vetorial mais equitativo e sensível às desigualdades territoriais.

5.4 Integração Tecnológica e Modernização da Vigilância

O cenário contemporâneo das arboviroses urbanas é marcado pela rápida incorporação de novas tecnologias de vigilância e controle, incluindo sistemas de monitoramento automatizado, armadilhas inteligentes, plataformas GIS, algoritmos de inteligência artificial para estratificação de risco, drones, plataformas móveis de nebulização e tecnologias biológicas como a plataforma Wolbachia [20-24]. A simples aquisição dessas tecnologias, entretanto, não garante efetividade operacional, pois sua eficiência depende da capacidade de integração territorial, adaptação operacional, compatibilização logística e priorização baseada em risco [1,4].

O IINOV oferece estrutura de planejamento compatível com a incorporação racional de novas tecnologias, por meio da formulação operacional derivada (Equação 3), que permite estimar o

dimensionamento necessário de diferentes plataformas tecnológicas (drones, motos UBV, EDL) a partir do índice integrado de necessidade e das características de cobertura de cada tecnologia. Essa capacidade de integração modular representa vantagem metodológica relevante em relação aos modelos tradicionais, que carecem de instrumentos para dimensionar racionalmente a incorporação de tecnologias emergentes ao planejamento operacional.

5.5 Contribuições para a Gestão Pública em Saúde

Os achados do presente estudo possuem implicações relevantes e diretas para a gestão pública municipal em saúde, especialmente em contexto de crescente pressão epidemiológica por arboviroses, restrição orçamentária estrutural e necessidade de racionalização operacional das ações de vigilância em saúde. O modelo IINOV pode subsidiar: planejamento territorial das ações de controle vetorial baseado em evidências quantitativas; racionalização e otimização da alocação de recursos públicos segundo critérios de necessidade integrada; regionalização operacional com definição de zonas prioritárias de intervenção; distribuição estratégica de equipamentos e insumos segundo perfis de risco territorial; e futura pactuação interfederativa de recursos baseada em critérios de complexidade territorial, em substituição à alocação exclusivamente per capita.

A integração futura do IINOV com plataformas digitais de gestão, sistemas GIS, painéis de inteligência epidemiológica (dashboards), algoritmos de inteligência artificial aplicados à estratificação de risco e sistemas de telemetria em tempo real poderá ampliar substancialmente a capacidade de resposta operacional dos municípios, especialmente em cenários de surtos e epidemias [34,35]. O modelo representa, nesse sentido, não apenas uma ferramenta de planejamento estático, mas a base metodológica para o desenvolvimento de sistemas dinâmicos de suporte à decisão operacional em controle vetorial urbano.

5.6 Limitações do Estudo

O presente estudo apresenta limitações metodológicas que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Primeiramente, as figuras territoriais apresentadas possuem caráter metodológico e exploratório, construídas com matrizes territoriais sintéticas para representar a lógica do modelo. Não devem ser interpretadas como mapas epidemiológicos reais, análise espacial georreferenciada ou representação oficial dos municípios estudados. Para validação espacial plena, será necessária a utilização de shapefiles municipais, dados por bairro ou setor censitário, indicadores entomológicos territorializados e séries históricas de incidência de arboviroses por área geográfica.

Segundo, a definição preliminar dos coeficientes ponderadores, embora fundamentada na literatura e validada conceitualmente por especialistas, apresenta grau de subjetividade inerente ao método Delphi. Os pesos propostos devem ser submetidos a análise de sensibilidade rigorosa, validação estatística longitudinal, calibração regional para diferentes contextos epidemiológicos e validação

multicêntrica em amostra ampliada de municípios com perfis demográficos e epidemiológicos diversificados.

Terceiro, a aplicação piloto em apenas dois municípios, embora tenha sido intencional para maximizar o contraste de perfis territoriais, limita a generalização dos resultados. Validação multicêntrica em municípios de diferentes regiões do país, portes populacionais, perfis epidemiológicos e contextos socioeconômicos é necessária para avaliar a robustez e a validade externa do modelo. Quarto, a heterogeneidade das bases de dados municipais disponíveis pode introduzir variação sistemática nos resultados, demandando padronização rigorosa das fontes e dos períodos de referência nas aplicações futuras.

Tabela 7. Limitações metodológicas identificadas, riscos associados e estratégias de mitigação propostas para estudos futuros.

Limitação Identificada	Risco Metodológico	Estratégia de Mitigação Proposta
Dados espaciais sintéticos (matrizes simuladas)	Não representar a geografia real dos municípios	Substituir por shapefiles e setores censitários oficiais do IBGE na validação territorial
Pesos preliminares com componente subjetivo	Coeficientes com justificativa parcialmente subjetiva	Aplicar Processo Analítico Hierárquico (AHP), análise de sensibilidade e validação Delphi multicêntrica
Heterogeneidade das bases de dados municipais	Inconsistência e incompletude de indicadores locais	Padronizar fontes, períodos de referência e métodos de estimação para dados ausentes
Aplicação em dois municípios piloto	Generalização limitada dos resultados	Validação multicêntrica prospectiva em amostra ampliada e estratificada de municípios brasileiros
Ausência de análise de autocorrelação espacial	Análise espacial limitada sem exploração de dependência geográfica	Incorporar Índice de Moran's I, KDE e modelos de regressão espacial em etapas futuras
Validação longitudinal inexistente	Ausência de evidência sobre estabilidade temporal do modelo	Conduzir estudo longitudinal prospectivo com acompanhamento de indicadores epidemiológicos e operacionais

6. CONCLUSÃO

O presente estudo desenvolveu, organizou e aplicou preliminarmente o Índice Integrado de Necessidade Operacional Vetorial (IINOV), modelo multicritério para dimensionamento operacional das ações municipais de controle vetorial urbano que integra simultaneamente variáveis demográficas, territoriais, epidemiológicas, entomológicas, socioambientais e operacionais em estrutura quantitativa de apoio à decisão.

Os resultados indicam que modelos tradicionais fundamentados exclusivamente em critérios populacionais apresentam limitações metodológicas importantes para representar a complexidade

contemporânea dos territórios urbanos brasileiros e tendem a subestimar sistematicamente as necessidades operacionais dos municípios com maior heterogeneidade territorial e vulnerabilidade epidemiológica. A incorporação de indicadores relacionados à persistência vetorial, vulnerabilidade territorial, densidade urbana, complexidade operacional e territorialização do risco ampliou significativamente a sensibilidade operacional do planejamento proposto, com incremento estimado de 16,7% a 30,4% no dimensionamento recomendado para os municípios piloto analisados.

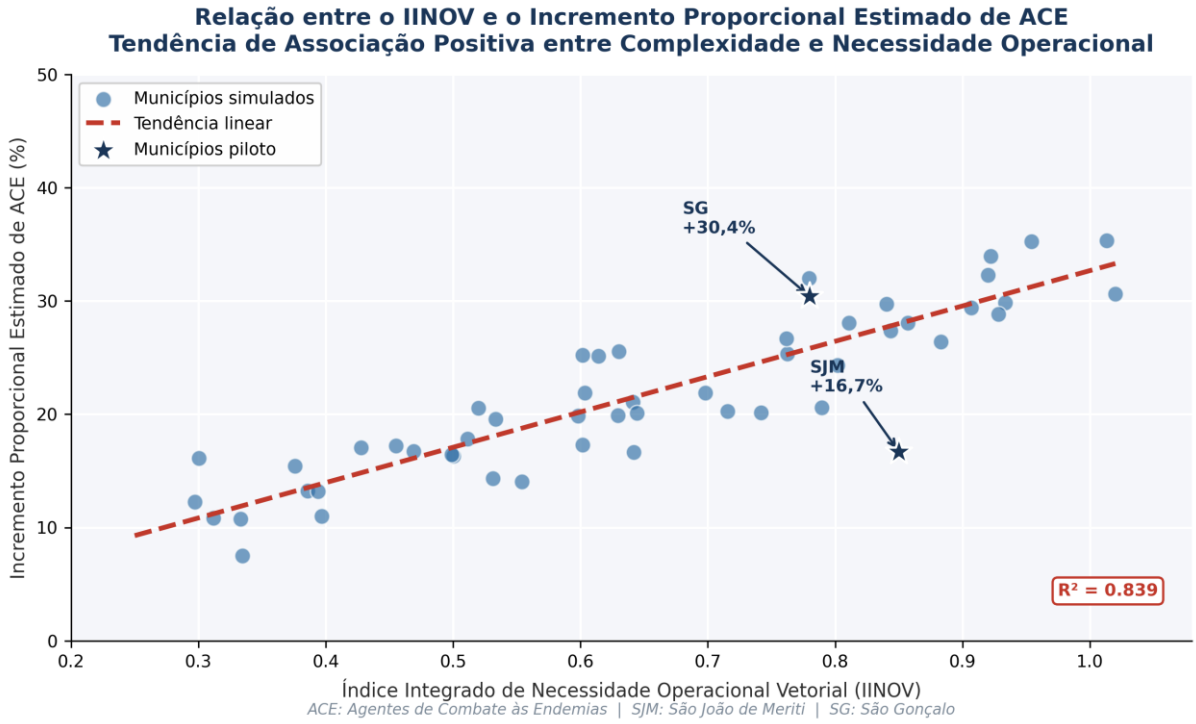


Figura 10. Relação entre o IINOV e o incremento proporcional estimado de ACE.

O modelo multicritério IINOV demonstrou capacidade de representar a heterogeneidade territorial entre municípios, modular a intensidade operacional segundo perfis integrados de risco, identificar áreas prioritárias de intervenção, apoiar a racionalização da alocação de recursos públicos e integrar tecnologias complementares de forma operacionalmente coerente. Apesar das limitações inerentes a esta etapa de desenvolvimento, particularmente relacionadas à disponibilidade de dados georreferenciados reais, à necessidade de validação contínua e à heterogeneidade dos contextos territoriais brasileiros, o modelo apresenta potencial relevante como ferramenta metodológica de apoio ao planejamento municipal das ações de vigilância e controle vetorial urbano.

Recomenda-se, para estudos futuros, a condução de validação multicêntrica prospectiva em amostra ampliada e diversificada de municípios brasileiros; a realização de análise espacial real com dados georreferenciados oficiais por setor censitário e bairro; a calibração estatística rigorosa dos coeficientes de ponderação por meio do Processo Analítico Hierárquico (AHP) e análise de sensibilidade; a integração do modelo com sistemas de informação geográfica e plataformas de

inteligência epidemiológica; e a exploração de aplicações regionais e nacionais do IINOV no contexto do planejamento federativo das ações de vigilância em saúde.

7. PERSPECTIVAS FUTURAS E AGENDA DE PESQUISA

O presente estudo estabelece a estrutura conceitual e metodológica inicial do IINOV, mas configura apenas a primeira etapa de um processo mais amplo de desenvolvimento, validação e implementação de ferramentas quantitativas de suporte ao planejamento municipal de controle vetorial. A agenda de pesquisa prospectiva inclui múltiplas linhas de desenvolvimento metodológico e aplicado.

A etapa de maior prioridade consiste na substituição das matrizes territoriais sintéticas por dados georreferenciados reais, incluindo shapefiles oficiais por setor censitário e bairro, séries históricas de incidência de arboviroses no SINAN, LIRAa e ovitrampas territorializados, índices de vulnerabilidade social (IVS) do IPEA e indicadores do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Essa etapa permitirá a aplicação de métodos de análise espacial mais robustos, incluindo Índice de Autocorrelação Espacial de Moran (Moran's I), análise de clusters pelo método Local Indicators of Spatial Association (LISA), Kernel Density Estimation (KDE) e modelos de regressão geograficamente ponderada (GWR).

Uma segunda linha de desenvolvimento prioritária consiste na calibração estatística rigorosa dos coeficientes de ponderação do IINOV. O presente estudo utilizou ponderação fundamentada na literatura e validada conceitualmente por especialistas, o que representa abordagem metodologicamente adequada para uma etapa inicial de desenvolvimento do modelo. Entretanto, a consolidação científica do IINOV requer a utilização de métodos formais de elicitação e calibração de pesos, incluindo o Processo Analítico Hierárquico (AHP) de Saaty [29], análise conjunta e modelagem bayesiana, com validação em amostras independentes de municípios e análise de sensibilidade sistemática dos resultados em relação a variações nos coeficientes propostos.

Uma terceira linha de desenvolvimento envolve a integração do IINOV com tecnologias emergentes de suporte à decisão em saúde pública, incluindo plataformas de business intelligence e dashboards epidemiológicos em tempo real, algoritmos de aprendizado de máquina para estratificação automatizada de risco territorial, sistemas de alerta precoce de surtos baseados em dados entomológicos e epidemiológicos integrados, e plataformas de gestão operacional com rastreamento de equipes em campo. Essa integração tecnológica transformaria o IINOV de instrumento estático de planejamento em componente de um sistema dinâmico e adaptativo de suporte à decisão operacional em vigilância e controle vetorial urbano.

A exploração de aplicações do modelo em escalas regional e nacional representa uma quarta linha de desenvolvimento relevante, potencialmente capaz de subsidiar a pactuação interfederativa de recursos para vigilância em saúde em bases metodológicas mais robustas, transparentes e equitativas

do que os critérios populacionais atualmente utilizados. A aplicação do IINOV como instrumento de alocação federativa de recursos demandará, no entanto, validação extensiva, negociação política e construção de consenso técnico-científico entre gestores de diferentes entes federativos.

REFERÊNCIAS

1. World Health Organization. Global Vector Control Response 2017–2030. Geneva: WHO; 2017.
2. Brasil. Ministério da Saúde. Diretrizes Nacionais para Prevenção e Controle das Arboviroses Urbanas: Vigilância Entomológica e Controle Vetorial. Brasília: Ministério da Saúde; 2025.
3. Brasil. Fundação Nacional de Saúde. Dengue: Instruções para Pessoal de Combate ao Vetor. Brasília: FUNASA; 2001.
4. Pan American Health Organization. Integrated Vector Management: A Comprehensive Approach for Vector-Borne Disease Control. Washington: PAHO; 2019.
5. Gubler DJ. Dengue, urbanization and globalization: the unholy trinity of the 21st century. Trop Med Health. 2011;39(4 Suppl):3–11.
6. Teixeira MG, Costa MCN, Barreto F, Barreto ML. Dengue: twenty-five years since reemergence in Brazil. Cad Saude Publica. 2009;25 Suppl 1:S7–S18.
7. Lowe R, Barcellos C, Brasil P, Cruz OG, Honorio NA, Kuper H, Carvalho MS. The Zika virus epidemic in Brazil: from discovery to future implications. Int J Environ Res Public Health. 2018;15(1):96.
8. Eiras AE, Resende MC. Preliminary evaluation of the Dengue-MI technology for Aedes aegypti monitoring and control. Cad Saude Publica. 2009;25 Suppl 1:S45–S58.
9. Honorio NA, Camara DCP, Calvet W, Brasil P. Chikungunya: an arbovirus infection in the process of establishment and expansion in Brazil. Cad Saude Publica. 2015;31(5):906–908.
10. Confalonieri UEC. Climate change and health in Brazil: review of the literature. Saude Soc. 2010;19(3):503–513.
11. Heller L. Relação entre saúde e saneamento na perspectiva do desenvolvimento. Cien Saude Colet. 1998;3(2):73–84.
12. Benchimol JL. Dos micróbios aos mosquitos: febre amarela e a revolução pasteuriana no Brasil. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz; 1999.
13. Braga IA, Valle D. Aedes aegypti: histórico do controle no Brasil. Epidemiol Serv Saude. 2007;16(2):113–118.
14. Tauil PL. Aspectos críticos do controle da dengue no Brasil. Cad Saude Publica. 2002;18(3):867–871.
15. Beier JC, Keating J, Githure JI, Macdonald MB, Impoinvil DE, Novak RJ. Integrated vector management for malaria control. Malar J. 2008;7 Suppl 1:S4.
16. Caprara A, Lima JW, Marinho AC, Calvasina PG, Landim LP, Sommerfeld J. Irregular water supply, household usage and dengue: a bio-social study in the Brazilian Northeast. Cad Saude Publica. 2009;25 Suppl 1:S125–S136.
17. Caminade C, Medlock JM, Ducheyne E, McIntyre KM, Leach S, Baylis M, Morse AP. Suitability of European climate for the Asian tiger mosquito Aedes albopictus: recent trends and future scenarios. J R Soc Interface. 2012;9(75):2708–2717.
18. Focks DA. A Review of Entomological Sampling Methods and Indicators for Dengue Vectors. Geneva: WHO; 2003.
19. Barcellos C, Lowe R. Expansion of the dengue transmission area in Brazil: the role of climate and cities. Trop Med Int Health. 2014;19(2):159–168.

20. Camara FP, Theophilo RL, Dos Santos GT, Pereira SRFG, Camara DCP, Matos RR. Regional and dynamics characteristics of dengue in Brazil: a retrospective study. Rev Soc Bras Med Trop. 2007;40(2):192–196.

21. Abad-Franch F, Zamora-Perea E, Luz SLB. Mosquito-disseminated insecticide for citywide vector control and its potential to block arbovirus epidemics. PLoS Negl Trop Dis. 2017;11(1):e0005198.

22. O'Neill SL, Ryan PA, Turley AP, Wilson G, Retzki K, Iturbe-Ormaetxe I, et al. Scaled deployment of Wolbachia to protect the community from dengue and other Aedes transmitted arboviruses. Gates Open Res. 2018;2:36.

23. Bouyer J, Lefrancois T. Boosting the sterile insect technique to control mosquitoes. Trends Parasitol. 2014;30(6):271–273.

24. Eisen L, Lozano-Fuentes S. Use of mapping and spatial and space-time modeling approaches in operational control of Aedes aegypti and dengue. PLoS Negl Trop Dis. 2009;3(4):e411.

25. Hulley SB, Cummings SR, Browner WS, Grady DG, Newman TB. Designing Clinical Research. 4th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2013.

26. Whittemore R, Knafl K. The integrative review: updated methodology. J Adv Nurs. 2005;52(5):546–553.

27. Jannuzzi PM. Indicadores Sociais no Brasil: Conceitos, Fontes de Dados e Aplicações. Campinas: Alínea; 2012.

28. United Nations Development Programme. Human Development Report 2021/2022: Uncertain Times, Unsettled Lives. New York: UNDP; 2022.

29. Saaty TL. Decision making with the analytic hierarchy process. Int J Serv Sci. 2008;1(1):83–98.

30. Belton V, Stewart TJ. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Boston: Springer; 2002.

31. Thokala P, Devlin N, Marsh K, Baltussen R, Boysen M, Kalo Z, et al. Multiple criteria decision analysis for health care decision making: an introduction. Value Health. 2016;19(1):1–13.

32. Hsu CC, Sandford BA. The Delphi technique: making sense of consensus. Pract Assess Res Eval. 2007;12(10):1–8.

33. Keeney S, Hasson F, McKenna H. The Delphi Technique in Nursing and Health Research. Oxford: Wiley-Blackwell; 2011.

34. Hay SI, George DB, Moyes CL, Brownstein JS. Big data opportunities for global infectious disease surveillance. PLoS Med. 2013;10(4):e1001413.

35. Boulos MNK, Geraghty EM. Geographical tracking and mapping of coronavirus disease COVID-19 and potential applications. Int J Health Geogr. 2020;19(1):8.

36. Kraemer MUG, Reiner RC Jr, Brady OJ, Messina JP, Gilbert M, Pigott DM, et al. Past and future spread of the arbovirus vectors Aedes aegypti and Aedes albopictus. Nat Microbiol. 2019;4(5):854–863.

37. Brownson RC, Fielding JE, Maylahn CM. Evidence-based public health: a fundamental concept for public health practice. Annu Rev Public Health. 2009;30:175–201.