

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

OTÁVIO HENRIQUE FLAESCHEN OLIVEIRA

**SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O
MONITORAMENTO DE ALAGAMENTOS NO
RIO DE JANEIRO VIA VEÍCULOS AÉREOS
NÃO TRIPULADOS**

NITERÓI

2026

OTÁVIO HENRIQUE FLAESCHEN OLIVEIRA

**SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O
MONITORAMENTO DE ALAGAMENTOS NO
RIO DE JANEIRO VIA VEÍCULOS AÉREOS
NÃO TRIPULADOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Ciência da Computação

Orientador:
LUIZ SATORU OCHI

NITERÓI

2026

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F568s Flaeschen Oliveira, Otavio Henrique
SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O MONITORAMENTO DE
ALAGAMENTOS NO RIO DE JANEIRO VIA VEÍCULOS AÉREOS NÃO
TRIPULADOS / Otavio Henrique Flaeschen Oliveira. - 2026.
122 f.: il.

Orientador: Luiz Satoru Ochi.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Instituto de Computação, Niterói, 2026.

1. Inteligência Computacional. 2. Sistemas de Apoio à
Decisão. 3. Metaheurísticas. 4. Veículos Aéreos Não
Tripulados. 5. Produção intelectual. I. Satoru Ochi, Luiz,
orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Instituto de
Computação. III. Título.

CDD - XXX

OTÁVIO HENRIQUE FLAESCHEN OLIVEIRA

SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O MONITORAMENTO DE
ALAGAMENTOS NO RIO DE JANEIRO VIA VEÍCULOS AÉREOS NÃO
TRIPULADOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Computação. Área de concentração: Ciência da Computação

Aprovada em 26 de junho de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. LUIZ SATORU OCHI - Orientador, UFF

Prof. IGOR MACHADO COELHO, UFF

Prof. ESTEBAN WALTER GONZALEZ CLUA, UFF

Prof. MARCONE JAMILSON FREITAS SOUZA, UFOP

Niterói

2026

*Aos meus familiares, em especial ao meu pai, que, mesmo diante de tantos desafios,
sempre me ensinou que o estudo, a dedicação e a perseverança eram o caminho.*

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Luiz Satoru Ochi, pela orientação, confiança, disponibilidade e pelas contribuições fundamentais ao desenvolvimento desta dissertação. Sua experiência acadêmica e sua visão em Pesquisa Operacional foram essenciais para transformar uma trajetória aplicada em uma contribuição científica estruturada.

Agradeço aos professores da banca examinadora, Prof. Igor Machado Coelho, Prof. Esteban Walter Gonzalez Clua e Prof. Marcone Jamilson Freitas Souza, pela leitura atenta, pelas críticas construtivas e pelas sugestões que contribuíram para o aprimoramento final deste trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense e ao Instituto de Computação pela formação acadêmica, pelo ambiente de pesquisa e pela oportunidade de desenvolver este estudo.

Agradeço ao Centro de Operações Rio (COR.rio) e aos profissionais envolvidos nas discussões, dados e experiências operacionais que contribuíram para a construção do estudo de caso desta dissertação. A possibilidade de aproximar pesquisa acadêmica de desafios reais de monitoramento urbano foi decisiva para a relevância aplicada deste trabalho.

Agradeço aos colegas, pesquisadores e parceiros que, de diferentes formas, contribuíram com discussões, revisões, desenvolvimento técnico, ideias e apoio ao longo da pesquisa. Cada conversa, teste, reunião e ajuste ajudou a consolidar a proposta apresentada nesta dissertação.

Agradeço à minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão durante toda a trajetória do mestrado. O suporte recebido foi fundamental nos momentos de maior dedicação, incerteza e esforço.

Por fim, agradeço a todos que acreditam na integração entre ciência, tecnologia, inovação e gestão pública como caminho para construir cidades mais inteligentes, resilientes e preparadas para enfrentar eventos climáticos extremos.

Resumo

Alagamentos urbanos representam um desafio recorrente para grandes cidades, especialmente em contextos de alta densidade urbana, eventos extremos de precipitação e dependência de infraestruturas fixas de monitoramento. Embora centros de operações urbanas utilizem câmeras, sensores e registros operacionais para acompanhar situações críticas, a distribuição espacial desses recursos pode produzir lacunas de observação em áreas relevantes para a resposta institucional. Esta dissertação propõe um sistema de apoio à decisão para priorização e roteamento de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), tratados como sensores móveis complementares à infraestrutura fixa de monitoramento urbano. A abordagem combina análise geoespacial, métricas de criticidade operacional, formulação de um problema de otimização combinatória e avaliação computacional de estratégias de despacho. O Rio de Janeiro é adotado como estudo de caso, considerando 344 clusters críticos de alagamento, 4.163 câmeras de videomonitoramento e 158 clusters sem cobertura por câmera fixa. Os experimentos comparam estratégias de referência, uma heurística construtiva baseada na relação entre criticidade e distância, denominada Mais Crítico por Distância, e metaheurísticas de refinamento, incluindo Iterated Local Search e Variable Neighborhood Search. Os resultados indicam que políticas orientadas por criticidade produzem cobertura mais relevante do que estratégias aleatórias ou baseadas apenas em proximidade, enquanto as metaheurísticas avaliadas refinam soluções iniciais com tempo computacional reduzido nas execuções avaliadas. A principal contribuição da dissertação está na formalização e avaliação de uma camada decisória para uso de VANTs no monitoramento urbano, demonstrando como dados históricos, infraestrutura existente e algoritmos de roteamento podem apoiar decisões em áreas críticas sem cobertura fixa.

Palavras-chave: Sistemas de Apoio à Decisão; Veículos Aéreos Não Tripulados; Monitoramento de Alagamentos; Pesquisa Operacional; Metaheurísticas; Roteamento de Veículos; Cidades Inteligentes; Rio de Janeiro.

Abstract

Urban flooding is a recurring challenge for large cities, especially in contexts of high urban density, extreme rainfall events, and dependence on fixed monitoring infrastructure. Although urban operation centers use cameras, sensors, and operational records to monitor critical situations, the spatial distribution of these resources may create observation gaps in areas relevant to institutional response. This dissertation proposes a decision support system for prioritizing and routing Unmanned Aerial Vehicles, or UAVs, treated as mobile sensors that complement fixed urban monitoring infrastructure. The approach combines geospatial analysis, operational criticality metrics, the formulation of a combinatorial optimization problem, and the computational evaluation of dispatch strategies. Rio de Janeiro is adopted as a case study, considering 344 critical flood clusters, 4,163 video monitoring cameras, and 158 clusters without fixed camera coverage. The experiments compare reference strategies, a constructive heuristic based on the relationship between criticality and distance, named Maximum Criticality-to-Distance, and refinement metaheuristics, including Iterated Local Search and Variable Neighborhood Search. The results indicate that criticality-oriented policies provide more relevant coverage than random or proximity-based strategies, while the evaluated metaheuristics refine initial solutions with reduced computational time in the evaluated runs. The main contribution of this dissertation lies in the formalization and evaluation of a decision-making layer for the use of UAVs in urban monitoring, demonstrating how historical data, existing infrastructure, and routing algorithms can support decisions in critical areas without fixed coverage.

Keywords: Decision Support Systems; Unmanned Aerial Vehicles; Flood Monitoring; Operations Research; Metaheuristics; Vehicle Routing; Smart Cities; Rio de Janeiro.

Lista de Figuras

1	Visão geral do dashboard Rio Flood Coverage, com indicadores principais da base de clusters críticos, cobertura por câmeras e gaps observacionais. .	21
2	Pipeline metodológico da dissertação.	25
3	Exemplos da formação e representação espacial dos clusters críticos de alagamento: (a) agrupamento espacial de registros históricos por clusterização; (b) representação operacional dos clusters como polígonos e sua relação com câmeras de monitoramento no território.	40
4	Distribuição espacial dos clusters críticos sem cobertura por câmera fixa no município do Rio de Janeiro. Em vermelho, os gaps observacionais.	44
5	Clusters sem câmera com destaque para o subconjunto Top 50 prioritário, definido a partir da criticidade histórica dos registros.	46
6	Distribuição da duração dos episódios inferidos a partir dos registros temporais de alagamento.	49
7	Ranking dos clusters gap prioritários segundo a métrica V3, baseada no <i>combined_score</i>	53
8	Cobertura ponderada (%) dos cinco algoritmos nos quatro cenários da configuração V3.	77
9	Relação entre número de clusters visitados e cobertura ponderada dos algoritmos na configuração V3.	78
10	Análise de sensibilidade da cobertura ponderada em função do horizonte de missão e da velocidade dos VANTs.	81
11	Distribuição espacial das rotas geradas pelo algoritmo VNS no Cenário D, com cinco VANTs partindo de bases distribuídas.	82
12	Detalhamento das rotas por VANT no Cenário D, com quantidade de visitas, distância total, tempo estimado de missão e clusters selecionados. . . .	83

13	Experimento exploratório de horizonte rolante com replanejamento em quatro janelas de 15 minutos.	85
14	Trabalho apresentado no SBPO 2023.	116
15	Trabalho apresentado no SBPO 2024.	118
16	Registros de disseminação e reconhecimentos associados à trajetória aplicada da pesquisa.	119
17	Registros de apresentações, reconhecimentos e disseminação institucional da linha de pesquisa.	120
18	Ecossistema institucional, tecnológico e intersetorial associado ao desenvolvimento da linha de pesquisa.	121

Lista de Tabelas

1	Síntese dos principais indicadores da base empírica utilizada na pesquisa .	37
2	Análise de Cobertura de Câmeras por Cluster	41
3	Top 10 Clusters com Maior Cobertura de Câmeras	42
4	Top 20 Clusters Gap por Criticidade (label_count DESC)	45
5	Distribuição Mensal de Registros de Eventos	48
6	Distribuição de ocorrências COR por categoria operacional	50
7	Distribuição de ocorrências COR por gravidade (registros válidos)	51
8	Bases Operacionais de VANTs	69
9	Top 10 Dias por Atividade Global (Todos os Clusters)	73
10	Resultados dos Cenários de Despacho — Greedy MCD, configuração V2 com label_count (Evento: 27/08/2023, 158 alvos)	74
11	Ganho Marginal por VANT Adicional (Greedy MCD)	74
12	Comparação de Algoritmos na configuração V2: Greedy × ILS × VNS (158 gaps, 27/08/2023)	75
13	Clusters Visitados: Greedy × ILS × VNS	75
14	Cobertura Ponderada (%) por algoritmo e cenário, V3 com combined_score	76
15	Clusters visitados por algoritmo e cenário, V3	76
16	Impacto da mudança da métrica de criticidade: Greedy V2 (label_count) × Greedy V3 (combined_score)	77
17	Cobertura ponderada (%) em cinco sementes, Cenário D	79
18	Clusters visitados em cinco sementes, Cenário D	79
19	Análise de Sensibilidade: Horizonte × Velocidade (3 VANTs, Greedy MCD, 158 gaps)	80

20	Rolling Horizon vs. Simulação Estática (Cenário D, 27/08/2023)	85
21	Resumo dos indicadores apresentados no Painei Online	105
22	Descrição de cada página no painei online	106
23	Diretrizes e justificativas para avaliação operacional a partir dos resultados da dissertação	112

Lista de Abreviaturas e Siglas

BRKGA Biased Random-Key Genetic Algorithm

CCTV Circuito Fechado de Televisão

COR.rio Centro de Operações e Resiliência do Rio de Janeiro

CRIS Cidades e Regiões Inteligentes e Sustentáveis

CSV Comma-Separated Values

DVRP Dynamic Vehicle Routing Problem

GBM Grupamento de Bombeiro Militar

GIS Geographic Information System

GRASP Greedy Randomized Adaptive Search Procedures

ILS Iterated Local Search

INMET Instituto Nacional de Meteorologia

ISO International Organization for Standardization

LGPD Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais

MCD Mais Crítico por Distância

OP Orienteering Problem

OR Operations Research

SBPO Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional

TFLP Temporary Facility Location Problem

UAV Unmanned Aerial Vehicle

UCCRN-LA Urban Climate Change Research Network – Latin America

VANT Veículo Aéreo Não Tripulado

VNS Variable Neighborhood Search

VRP Vehicle Routing Problem

VRPTW Vehicle Routing Problem with Time Windows

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contexto e Motivação	20
1.2	Tema de Pesquisa	22
1.3	Objetivos	23
1.3.1	Objetivo Geral	23
1.3.2	Objetivos Específicos	23
1.4	Hipótese Central	24
1.5	Contribuições	24
1.6	Organização do Texto	25
2	REVISÃO DA LITERATURA E REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1	Cidades Inteligentes, Resiliência Urbana e Governança de Dados	26
2.2	Gestão de Risco Climático e Alagamentos Urbanos	27
2.3	Monitoramento Multimodal de Alagamentos e o COR.rio	28
2.4	VANTs no Monitoramento Urbano e Gestão de Desastres	29
2.5	Pesquisa Operacional para Apoio à Decisão	30
2.5.1	Problema de Roteamento de Veículos (VRP) e Variantes	30
2.5.2	Temporary Facility Location Problem (TFLP)	32
2.5.3	Heurísticas e Metaheurísticas para Otimização Combinatória	33
2.6	Lacuna Científica e Posicionamento da Dissertação	34
3	ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS	35

3.1	Rio de Janeiro: Contexto Geográfico e Vulnerabilidade a Alagamentos . . .	35
3.2	O Centro de Operações Rio (COR.rio)	35
3.2.1	Histórico e Missão Institucional	35
3.2.2	Infraestrutura de Monitoramento	36
3.2.3	Leitura Metodológica do Caso	38
3.3	Base de Dados: Clusters Críticos	38
3.3.1	Origem e Definição dos Clusters	38
3.3.2	Distribuição Geográfica dos Clusters	39
3.4	Base de Dados: Câmeras	40
3.4.1	Inventário e Estrutura	40
3.4.2	Análise de Cobertura por Cluster	41
3.5	Gaps Observacionais: Os 158 Clusters Sem Câmera	42
3.5.1	Definição e Perfil	42
3.5.2	Top 50 Clusters Sem Câmera Prioritários	43
3.6	Base de Dados: Registros Temporais de Eventos	46
3.6.1	Estrutura e Escopo dos Dados	46
3.6.2	Episódios Inferidos de Alagamento	47
3.6.3	Série Temporal Mensal	48
3.7	Dados Operacionais do COR.rio: Ocorrências 2015–2024	50
3.7.1	Estrutura e Cobertura Temporal	50
3.7.2	Cruzamento com os Polígonos de Clusters	51
3.7.3	Score de Criticidade Enriquecida	52
3.8	Limitações dos Dados	54
3.9	Governança, Privacidade e Disponibilidade dos Dados	55
4	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	57
4.1	Definição do Problema	57

4.2	Conjuntos e Índices	57
4.3	Parâmetros	58
4.3.1	Criticidade	58
4.3.2	Deslocamento e Missão	59
4.4	Variáveis de Decisão	59
4.5	Função Objetivo	60
4.6	Restrições	60
4.6.1	Saída e Retorno à Base	60
4.6.2	Conservação de Fluxo e Vínculo com a Visita	61
4.6.3	Unicidade da Visita	61
4.6.4	Horizonte da Missão	61
4.6.5	Eliminação de Subciclos	61
4.6.6	Domínio	61
4.7	Relação entre a Formulação e os Métodos Implementados	62
4.8	Extensão Exploratória com Horizonte Rolante	62
4.9	Hipóteses e Delimitações	63
5	MÉTODOS DE SOLUÇÃO	64
5.1	Estratégia Geral	64
5.2	Representação e Avaliação de uma Solução	64
5.3	Estratégias de Referência	65
5.3.1	Random	65
5.3.2	Nearest Neighbor	65
5.4	Heurística Construtiva Greedy MCD	65
5.5	Busca Local Compartilhada	66
5.6	Iterated Local Search	67
5.7	Variable Neighborhood Search Adaptado	68

5.8	Geração das Instâncias e Cenários	68
5.9	Procedimento Experimental	69
5.10	Métricas e Reprodutibilidade	70
5.11	Papel da Formulação e Ausência de Solver	71
6	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	72
6.1	Protocolo Experimental	72
6.2	Seleção do Dia de Referência	73
6.3	Configuração V2 como Etapa Intermediária	74
6.3.1	Greedy MCD	74
6.3.2	Refinamento por ILS e VNS	75
6.4	Configuração Principal V3	75
6.4.1	Criticidade Operacional Enriquecida	75
6.4.2	Comparação dos Métodos	76
6.4.3	V2 e V3	77
6.4.4	Cobertura Alcançada	79
6.5	Análise Multi-Semente	79
6.6	Análise de Sensibilidade	80
6.7	Interpretação Operacional	82
6.8	Limitações e Ameaças à Validade	84
6.9	Experimento Exploratório com Horizonte Rolante	85
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	87
7.1	Síntese dos Resultados	87
7.2	Resposta à Pergunta de Pesquisa	88
7.3	Contribuições da Dissertação	89
7.3.1	Contribuição Metodológica	89

7.3.2	Contribuição Aplicada	89
7.3.3	Contribuição Empírica	90
7.3.4	Contribuição Estratégica	90
7.3.5	Contribuição Técnica	90
7.3.6	Desdobramentos Científicos e Institucionais da Linha de Pesquisa .	90
7.4	Escopo de Validade e Limitações da Pesquisa	91
7.4.1	Validade dos Dados	91
7.4.2	Validade das Métricas de Criticidade	92
7.4.3	Validade do Modelo de Roteamento	93
7.4.4	Validade Algorítmica	93
7.4.5	Validade Operacional e Generalização	94
7.5	Diretrizes para Avaliação Operacional no COR.rio	95
7.6	Trabalhos Futuros	95
7.7	Considerações Finais	97

REFERÊNCIAS **98**

Apêndice A - DASHBOARD WEB DE VISUALIZAÇÃO INTERATIVA **104**

A.1	Objetivo do Dashboard	104
A.2	Dados Representados no Dashboard	105
A.3	Estrutura Geral de Navegação	106
A.4	Descrição Detalhada das Abas	106
A.4.1	Visão Geral	106
A.4.2	Mapa de Cobertura	107
A.4.3	Top 50 Gaps	107
A.4.4	Temporal	107
A.4.5	Câmeras	108

A.4.6	Simulação OR	108
A.4.7	Horizonte Rolante	109
A.4.8	Rotas OR	109
A.4.9	Insights Estratégicos	109
A.5	Análises Derivadas do Dashboard	110
A.5.1	O gap observacional é estrutural, não pontual	110
A.5.2	Bases distribuídas são decisivas	110
A.5.3	Criticidade supera proximidade	110
A.5.4	A métrica combined_score amplia a informação considerada na priorização	111
A.5.5	Horizonte rolante depende de dados em tempo real	111
A.6	Relação com a Metodologia da Dissertação	111
A.7	Diretrizes para Avaliação Operacional Evidenciadas pelo Dashboard	112
A.8	Limitações do Dashboard	112
A.9	Possíveis Evoluções	113
A.10	Síntese do Apêndice	114

Apêndice B - TRAJETÓRIA CIENTÍFICA, OPERACIONAL E TECNOLÓGICA DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO 115

B.1	Evolução da linha de pesquisa	116
B.2	Trabalhos acadêmicos relacionados	117
B.3	Da observação ao apoio à decisão	117
B.4	Registros de disseminação e trajetória aplicada	118
B.5	Apoio Institucional	119

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Motivação

Alagamentos urbanos constituem eventos críticos para grandes metrópoles, especialmente em contextos de elevada densidade urbana, infraestrutura de drenagem pressionada e aumento da frequência de eventos extremos de precipitação [28, 29]. No Rio de Janeiro, documentos institucionais de planejamento operacional, como o Plano Verão 2024–2025, destacam a necessidade de integração entre monitoramento, defesa civil, mobilidade urbana e comunicação pública durante períodos de chuvas intensas [20]. Nesse contexto, o Centro de Operações e Resiliência do Município do Rio de Janeiro, o COR.rio, desempenha papel central no acompanhamento de situações de alagamento e na coordenação da resposta operacional do município.

O COR.rio, criado em 2010, representa um avanço institucional significativo na gestão de eventos urbanos extremos. Trata-se de um centro multiagência que integra dados de câmeras, pluviômetros, radares meteorológicos e outras fontes em tempo real, apoiando decisões operacionais de dezenas de órgãos municipais. Com 4.163 câmeras distribuídas pela cidade, o COR.rio dispõe de uma infraestrutura municipal expressiva de monitoramento urbano [17, 18, 19].

No entanto, uma análise geoespacial detalhada da cobertura existente revela uma lacuna operacional relevante: dos 344 clusters críticos de alagamento identificados no cadastro municipal, **158 (45,9%) não possuem qualquer câmera de monitoramento**. Esses pontos cegos incluem bairros como Itanhangá, Jardim Sulacap, Padre Miguel e São Conrado, evidenciando que a lacuna de videomonitoramento atinge diferentes regiões da cidade e áreas relevantes para a resposta operacional.

A Figura 1 sintetiza os principais indicadores utilizados para caracterizar o problema de cobertura observacional tratado nesta dissertação, destacando o universo de clusters críticos, a infraestrutura de câmeras do COR.rio e o subconjunto de clusters sem cobertura

fixa, que constitui o alvo principal da estratégia de despacho de VANTs.

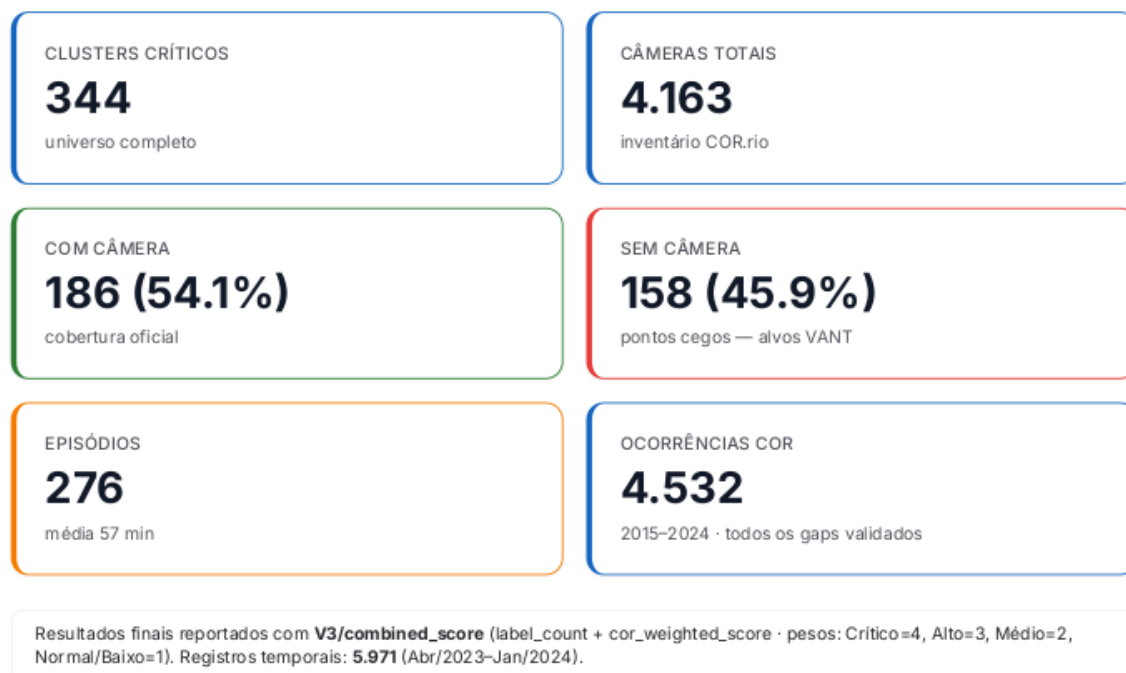


Figura 1: Visão geral do dashboard Rio Flood Coverage, com indicadores principais da base de clusters críticos, cobertura por câmeras e gaps observacionais.

Fonte: Elaboração própria, a partir do dashboard Rio Flood Coverage.

Esses indicadores evidenciam que o problema investigado não decorre da inexistência de infraestrutura de monitoramento, mas da distribuição espacial incompleta dessa infraestrutura em relação aos clusters críticos de alagamento. Assim, os VANTs são tratados nesta pesquisa como sensores móveis complementares, capazes de ampliar temporariamente a observabilidade em regiões sem câmera fixa.

Diante desse cenário, emerge uma pergunta operacional de alta relevância: **como ampliar a cobertura observacional em áreas críticas de alagamento sem a necessidade de instalação massiva de nova infraestrutura fixa?** Uma possibilidade tecnologicamente viável e crescentemente adotada em contextos de gestão de desastres é o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), ou drones, como sensores móveis que podem ser despachados para áreas de interesse sob demanda.

O desafio, contudo, vai além do equipamento. Tão importante quanto ter VANTs disponíveis é saber **onde despachá-los, em qual ordem e a partir de quais bases**, respeitando o horizonte de missão e os recursos disponíveis. O objeto central desta dissertação combina priorização espacial e roteamento multi-VANT sob restrições operacionais. A atualização periódica das prioridades é investigada separadamente, em um experimento exploratório de horizonte rolante.

1.2 Tema de Pesquisa

A evolução desta linha de pesquisa apresenta três marcos relevantes. No primeiro, desenvolveu-se uma ferramenta computacional para monitoramento de alagamentos urbanos com integração ao COR.rio, capaz de acompanhar mais de 50 situações simultâneas com suporte de análise geoespacial [7]. No segundo, o trabalho apresentado no SBPO 2024 integrou câmeras, dados do aplicativo Waze e pluviômetros em um sistema automatizado de coleta, resultando em mais de 62.000 vídeos e 591.919 imagens capturadas ao longo de 2023 [1]. O terceiro marco corresponde à presente dissertação, que desloca o foco do monitoramento para o apoio à decisão, incorporando priorização, roteamento e avaliação de cenários com VANTs.

Com a consolidação dessa base empírica, o escopo da pesquisa amadureceu: o problema central deixou de ser “como monitorar melhor alagamentos com câmeras e dados” e passou a ser:

Como transformar a infraestrutura fixa de monitoramento urbano, a base histórica de eventos de alagamento e os registros operacionais do COR.rio em um sistema de apoio à decisão capaz de posicionar e rotear VANTs para complementar a cobertura observacional das áreas críticas sem câmera e, de forma exploratória, avaliar o replanejamento em horizonte rolante?

Esta pergunta evidencia o deslocamento de foco: de *observação passiva* para *decisão ativa*; de *coleta de dados* para *priorização e roteamento de recursos escassos*; e de uma análise exclusivamente estática para a investigação inicial de mecanismos de atualização das decisões.

Embora a validação empírica seja desenvolvida no Rio de Janeiro, a estrutura metodológica proposta pode ser transferida para outros centros urbanos que disponham de dados sobre áreas críticas, infraestrutura de monitoramento e recursos móveis de inspeção. Essa transferência exige a recalibração das unidades espaciais, das métricas de prioridade, das bases operacionais, da frota disponível e das restrições locais.

Nesta dissertação, o termo Inteligência Artificial Operacional é utilizado para designar o uso combinado de dados urbanos, algoritmos de priorização, modelos de otimização e mecanismos computacionais de apoio à decisão aplicados a problemas operacionais em tempo quase real. O foco não está em modelos preditivos ou classificadores baseados

em redes neurais, mas na capacidade de transformar dados heterogêneos da cidade em decisões acionáveis para monitoramento, despacho e priorização de recursos escassos. Assim, a Inteligência Artificial Operacional é compreendida como uma camada algorítmica de suporte à decisão urbana, integrada à infraestrutura de sensores, câmeras, registros operacionais e VANTs.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar uma abordagem de apoio à decisão para o emprego de VANTs como sensores móveis complementares à infraestrutura fixa do COR.rio, visando ampliar a cobertura observacional e o suporte à resposta em eventos de alagamento urbano no Rio de Janeiro.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Consolidar a base espacial e operacional de alagamentos do estudo de caso, caracterizando os 344 clusters críticos e a cobertura existente de câmeras.
2. Identificar e priorizar os clusters críticos sem cobertura por câmera fixa, doravante denominados clusters gap, estabelecendo métricas de criticidade baseadas no histórico de eventos e na gravidade das ocorrências operacionais registradas pelo COR.rio.
3. Definir um modelo conceitual em que VANTs atuem como recursos móveis complementares à rede fixa de câmeras, sob horizonte limitado de missão, e investigar uma extensão exploratória em horizonte rolante.
4. Formalizar o problema estático de priorização e roteamento de múltiplos VANTs como problema de otimização combinatória, com conjuntos, parâmetros, variáveis e restrições explícitos.
5. Avaliar cenários operacionais variando número de VANTs, posicionamento de bases, horizonte de missão e velocidade de voo.
6. Comparar a abordagem proposta com estratégias de referência e discutir a aplicabilidade institucional dos resultados junto ao COR.rio.

1.4 Hipótese Central

Uma abordagem que combine: (i) a análise da infraestrutura fixa existente para identificar pontos cegos; (ii) a priorização histórica, operacional e espacial de clusters críticos; e (iii) o roteamento de VANTs como sensores móveis complementares pode ampliar a cobertura ponderada alcançada, no horizonte de missão simulado, em relação a estratégias aleatórias ou orientadas apenas por proximidade.

1.5 Contribuições

Esta dissertação apresenta cinco contribuições principais:

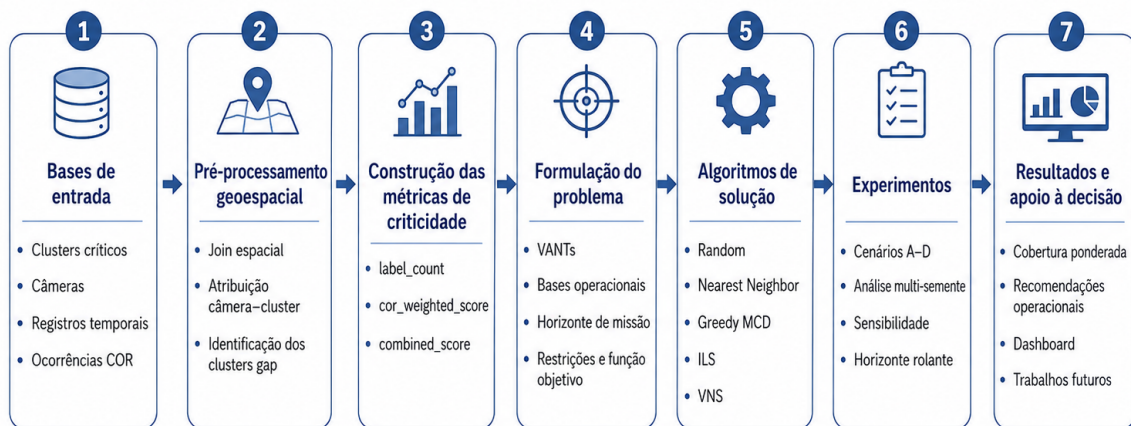
1. **Contribuição metodológica:** Formalização de um problema estático de priorização e roteamento de múltiplos VANTs para cobertura complementar em eventos de alagamento urbano, incluindo conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições operacionais, acompanhada de uma extensão exploratória em horizonte rolante.
2. **Contribuição aplicada:** Abordagem para apoiar o planejamento em centros de monitoramento urbano como o COR.rio, com evidências simuladas sobre número de VANTs, posicionamento de bases e horizonte de missão, cuja adoção operacional depende de validação técnica, regulatória e de campo.
3. **Contribuição empírica:** Análise integrada de 344 clusters críticos, 4.163 câmeras, 276 episódios inferidos de alagamento, 4.532 ocorrências operacionais COR (2015–2024) e simulação de 4 cenários $\times$ 5 algoritmos (Random, Nearest, Greedy, ILS, VNS) com análise multi-semente para um dia real de chuva intensa (27/08/2023), gerando evidências comparáveis e auditáveis em nível metodológico.
4. **Contribuição estratégica:** Ponte conceitual e metodológica entre cidades inteligentes, gestão de risco climático, sensoriamento operacional e Pesquisa Operacional aplicada, área cujas interseções permaneciam pouco exploradas no contexto urbano brasileiro.
5. **Contribuição técnica:** Desenvolvimento de um dashboard web interativo de visualização dos resultados, com mapas de rotas dos VANTs

sobre cartografia real do Rio de Janeiro, comparação entre algoritmos e cenários, e módulo de insights estratégicos voltado ao suporte à decisão operacional. O painel torna os resultados da pesquisa acessíveis a gestores e operadores sem necessidade de execução de código.

1.6 Organização do Texto

O restante desta dissertação está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura e o referencial teórico, cobrindo os cinco pilares conceituais da pesquisa. O Capítulo 3 descreve a área de estudo e a base de dados empírica. O Capítulo 4 apresenta a formulação formal do problema de otimização. O Capítulo 5 descreve os métodos de solução considerados, incluindo baselines e heurísticas. O Capítulo 6 apresenta os experimentos com dados reais e os principais resultados. O Capítulo 7 conclui com síntese das contribuições, limitações e trabalhos futuros. A Figura 2 apresenta um resumo da metodologia usada nesta dissertação.

Pipeline metodológico da dissertação



Fluxo metodológico desde a integração das bases do COR.rio até a simulação e visualização dos resultados de despacho de VANTS.

Figura 2: Pipeline metodológico da dissertação.

Fonte: Elaboração própria.

2 REVISÃO DA LITERATURA E REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cidades Inteligentes, Resiliência Urbana e Governança de Dados

O conceito de cidade inteligente tem sido articulado de múltiplas formas na literatura, mas um denominador comum presente nas definições mais maduras é o uso estratégico de dados e tecnologia da informação para melhorar a qualidade de vida e a eficiência operacional de espaços urbanos [22, 23]. Nesse contexto, a capacidade de monitorar, antecipar e responder a eventos adversos, como alagamentos, deslizamentos e colapsos de infraestrutura, constitui uma dimensão crítica da resiliência urbana.

No contexto brasileiro, a linha de Cidades e Regiões Inteligentes e Sustentáveis (CRIS) tem explorado diferentes segmentos tecnológicos aplicados à gestão urbana, mobilidade, sistemas descentralizados, smart grids e otimização de recursos urbanos [5, 6, 12, 14]. Essa perspectiva é aderente à presente dissertação, que trata o monitoramento de alagamentos como problema de infraestrutura urbana, dados operacionais e decisão algorítmica.

A resiliência urbana, entendida como a capacidade de um sistema urbano de absorver perturbações, reorganizar-se e adaptar-se enquanto mantém as suas funções essenciais [24], depende de três componentes interdependentes: antecipação (capacidade de prever eventos), absorção (capacidade de suportar impactos) e recuperação (capacidade de retomar o estado funcional pós-evento). A inteligência operacional baseada em dados contribui primariamente para a antecipação e para a qualidade da resposta durante o evento.

A discussão sobre resiliência urbana também se relaciona à padronização internacional de indicadores para cidades resilientes, como a família ISO 37120/37122/37123, que organiza métricas associadas a serviços urbanos, riscos, governança, infraestrutura e eventos extremos [25, 26, 27].

De forma complementar, o Catálogo de Iniciativas Climáticas Urbanas no Brasil, pu-

blicado pelo Ministério das Cidades em articulação com a UCCRN-LA, ONU-Habitat e GIZ, reforça a importância de mapear, sistematizar e divulgar iniciativas urbanas voltadas à adaptação e mitigação climática [49]. Essa perspectiva é aderente à presente dissertação, na medida em que reconhece a necessidade de transformar evidências, boas práticas e projetos qualificados em instrumentos de apoio à construção de cidades mais resilientes. Nesse contexto, soluções digitais de monitoramento urbano e integração de dados aparecem como componentes relevantes da agenda de adaptação climática urbana.

No Rio de Janeiro, a criação do Centro de Operações Rio (COR.rio) em 2010 representou uma iniciativa pioneira de governança urbana orientada a dados em escala nacional. Matheus, Vaz e Ribeiro [21] documentaram o potencial de centros de operações urbanos para integrar dados públicos e melhorar serviços municipais, e o COR.rio tem sido referenciado internacionalmente como caso exemplar de integração multiagência para gestão de eventos extremos. A infraestrutura do município compreende redes de câmeras, pluviômetros, radares meteorológicos, dados de tráfego em tempo real e integração com outras fontes como o Waze, integrando informações de dezenas de órgãos municipais e estaduais. Trata-se de um ecossistema de sensoriamento cuja abrangência e sofisticação são raras em cidades de países em desenvolvimento, o que torna o caso particularmente valioso para pesquisa aplicada de Pesquisa Operacional e gestão inteligente de crises urbanas [17, 18, 19].

2.2 Gestão de Risco Climático e Alagamentos Urbanos

Alagamentos urbanos decorrem da combinação entre precipitação intensa, impermeabilização do solo, inadequação do sistema de drenagem e ocupação de áreas de várzea [28]. No contexto global de mudanças climáticas, a tendência é de aumento na frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação, especialmente em regiões tropicais e subtropicais [29].

No caso do Rio de Janeiro, a combinação entre características geográficas, urbanização intensa e sazonalidade das chuvas cria um contexto operacionalmente sensível a eventos de alagamento, demandando planejamento integrado entre monitoramento, defesa civil, mobilidade e comunicação pública [20].

Kruczkiewicz et al. [30] ressaltam que eventos compostos, precipitação extrema em combinação com maré alta, por exemplo, requerem abordagens integradas de preparo e resposta que vão além de sistemas de alerta isolados. Djalante e Thomalla [31] e Forino,

von Meding e Brewer [32] argumentam que a integração entre redução de risco de desastres e adaptação à mudança climática demanda estruturas de governança capazes de combinar dados, decisões e ação coordenada, uma descrição que se alinha ao modelo do COR.rio.

De Moura, Cruz e Chiroli [33] propõem um framework para integração de práticas de logística humanitária no contexto de gestão de desastres, incluindo princípios de pré-posicionamento de recursos e resposta coordenada. Embora desenvolvido para logística humanitária em sentido amplo, o framework dialoga diretamente com o problema de posicionamento de bases e despacho de VANTs investigado nesta dissertação.

De forma complementar, Sousa et al. [3] revisam técnicas de inteligência computacional aplicadas à previsão e mitigação de eventos climáticos hidrológicos extremos, destacando aplicações em alocação de recursos, evacuação, monitoramento ambiental e resposta a enchentes. No plano institucional, documentos como o Plano Verão 2024-2025 da Prefeitura do Rio [20] evidenciam que a resposta a chuvas intensas exige integração entre monitoramento, protocolos operacionais, defesa civil, mobilidade e comunicação pública.

2.3 Monitoramento Multimodal de Alagamentos e o COR.rio

A abordagem multimodal de coleta de dados para monitoramento de eventos urbanos extremos tem sido explorada com crescente sofisticação na literatura. A combinação de câmeras de circuito fechado (CCTV), dados colaborativos (especialmente do Waze), pluviômetros e radares meteorológicos permite uma cobertura informacional mais rica do que qualquer fonte isolada [1].

Em trabalho anterior a esta dissertação, Oliveira, Silva e Ochi [7] desenvolveram uma ferramenta computacional para monitoramento de alagamentos urbanos integrada ao COR.rio, capaz de acompanhar mais de 50 situações simultâneas com suporte de análise geoespacial. A ferramenta demonstrou a viabilidade técnica de integrar múltiplas fontes em uma plataforma unificada de decisão.

O trabalho subsequente, apresentado no SBPO24 [1], avançou para a automação da coleta via gatilhos inteligentes, lógica que ativa coleta de dados quando combinações específicas de condições são detectadas simultaneamente (chuva acima de limiar, presença de alerta no Waze, registro em câmera próxima). O resultado foi a captura de mais de 62.000 vídeos e 591.919 imagens ao longo de 2023, consolidando um banco visual expressivo de eventos de alagamento urbano.

Esta dissertação dá continuidade a dois trabalhos anteriores diretamente relacionados ao caso do Rio de Janeiro. O primeiro desenvolveu uma ferramenta de monitoramento de alagamentos para cidades inteligentes, no contexto do COR.rio e do Desafio COR, combinando ciência de dados, geoprocessamento e interação com especialistas [7]. O segundo avançou para uma ferramenta operacional de coleta automatizada de dados e imagens integrando câmeras, Waze e pluviômetros, consolidando a base empírica que sustenta a presente pesquisa [1].

Esses dois trabalhos anteriores estabeleceram a legitimidade empírica do caso de estudo e forneceram a base de dados que alimenta a presente dissertação. Em particular, o data mart de clusters críticos e cobertura de câmeras, descrito em detalhe no Capítulo 3, constitui o insumo primário para a modelagem do problema de otimização.

2.4 VANTs no Monitoramento Urbano e Gestão de Desastres

O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para monitoramento ambiental e gestão de desastres tem se intensificado ao longo da última década, impulsionado pela redução de custos dos equipamentos, pela maturidade das tecnologias de controle autônomo e pela crescente disponibilidade de sensores compactos [35, 37].

No domínio específico de inundações, Iqbal et al. [35] apresentam uma revisão bibliométrica sobre o uso de drones para monitoramento, mapeamento e detecção de enchentes, destacando que a combinação entre sensores embarcados, visão computacional e algoritmos de aprendizado profundo tem ampliado o potencial dos VANTs como plataformas móveis de observação em desastres hidrológicos.

Munawar et al. [36] demonstram o uso de imagens aéreas obtidas por VANTs combinadas a redes neurais convolucionais para identificação de características associadas a inundações em áreas de desastre. Embora a presente dissertação não implemente um classificador visual, esse tipo de estudo reforça a viabilidade de integrar, em trabalhos futuros, a etapa de despacho otimizado dos VANTs com módulos automáticos de detecção visual de alagamentos.

Em contextos de desastre, VANTs têm sido utilizados para: avaliação de danos pós-evento; busca e salvamento em áreas inacessíveis a equipes terrestres; entrega de suprimentos em situações de emergência; monitoramento de cheias em tempo real; e confirmação visual de alertas gerados por outras fontes [37]. A mobilidade, a velocidade de implantação e a capacidade de operar em ambientes degradados fazem dos VANTs recursos

particularmente valiosos em cenários de resposta rápida.

No contexto de otimização, a literatura sobre roteamento de VANTs em cidades inteligentes tem explorado problemas de cobertura de área, inspeção de infraestrutura e entrega de última milha. Trabalhos relacionados ao Green UAV Grid Routing Problem e ao roteamento de UAVs em cidades inteligentes abordam formulações multiobjetivo, restrições de autonomia, cobertura, recarga e áreas proibidas [4, 10, 13, 16]. Esses estudos fornecem base metodológica para tratar VANTs como recursos móveis sujeitos a restrições de rota, energia, cobertura e prioridade operacional.

Em gestão de desastres, VANTs têm sido empregados como plataformas móveis de sensoriamento, permitindo inspeção visual, coleta de imagens, avaliação de danos e apoio à coordenação de resposta em áreas de difícil acesso. AlAli e Alabady [37] destacam que a efetividade dos VANTs em desastres depende da integração com câmeras, sensores, comunicação e sistemas de informação. De forma complementar, de Oliveira Silva et al. [38] discutem o uso combinado de UAVs e GIS para apoiar decisões de localização e estruturação de redes de resposta em desastres naturais, aproximando a tecnologia aérea de problemas de planejamento operacional.

A diferença central entre esses trabalhos e a presente dissertação reside na integração entre cobertura fixa existente, criticidade operacional e roteamento de múltiplos VANTs para inspeção seletiva de pontos cegos. Os experimentos principais consideram uma missão estática com alvos predefinidos. A possível evolução das prioridades durante o evento é examinada separadamente em uma extensão exploratória de horizonte rolante.

2.5 Pesquisa Operacional para Apoio à Decisão

2.5.1 Problema de Roteamento de Veículos (VRP) e Variantes

O Problema de Roteamento de Veículos (VRP) constitui a espinha dorsal de uma família ampla de problemas de otimização combinatória com aplicações em logística, transporte e, mais recentemente, roteamento de drones [39]. Em sua forma mais geral, o VRP busca determinar um conjunto de rotas que minimize o custo total de atendimento a um conjunto de clientes (ou pontos de interesse), partindo de um ou mais depósitos (bases), sujeito a restrições de capacidade e tempo.

O Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo (VRPTW) adiciona restrições de tempo à formulação básica, exigindo que cada ponto seja visitado dentro

de um intervalo de tempo predefinido [40]. A formulação principal desta dissertação não atribui janelas individuais aos clusters. Em vez disso, utiliza um orçamento total de duração para cada rota e seleciona o subconjunto de alvos que maximiza a criticidade visitada, aproximando-se mais diretamente da família de problemas de orientação com múltiplos veículos.

Além das formulações clássicas de VRP, a extensão exploratória aproxima-se da classe dos Dynamic Vehicle Routing Problems (DVRP), nos quais informações relevantes para a decisão podem surgir ou ser atualizadas durante o horizonte operacional. Pillac et al. [41] destacam que a qualidade e o momento de revelação da informação são elementos centrais para caracterizar problemas dinâmicos de roteamento. Essa perspectiva é relevante para investigar etapas futuras da abordagem, pois os clusters sem videomonitoramento fixo apresentam justamente uma limitação informacional: a ausência de sensores reduz a capacidade de atualização em tempo real das prioridades.

De forma complementar, Zhang e Van Woensel [42] revisam problemas de roteamento dinâmico com requisições aleatórias, destacando que, diferentemente do VRP clássico, parte das demandas pode surgir durante a execução das rotas. Embora os “clientes” da presente dissertação sejam clusters críticos de alagamento e não requisições logísticas tradicionais, essa literatura oferece suporte conceitual à extensão exploratória: novas evidências operacionais poderiam alterar a prioridade dos pontos a serem visitados.

Além do roteamento puro de VANTs, há uma linha recente de problemas híbridos envolvendo veículos terrestres e drones, incluindo roteamento com caminhões e drones [2], entrega fracionada com caminhões e drones [8] e combinação de machine learning e otimização para veículos tripulados e não tripulados [9]. Embora a presente dissertação não modele veículos terrestres, esses trabalhos reforçam a relevância de formulações híbridas e heurísticas para problemas urbanos envolvendo recursos móveis heterogêneos.

A analogia com problemas de Data Mule Routing também é útil para esta dissertação: em ambos os casos, agentes móveis são utilizados para coletar informação em pontos onde a infraestrutura fixa é limitada ou inexistente [15]. No presente trabalho, os VANTs desempenham papel semelhante ao de sensores móveis, deslocando-se até clusters sem cobertura por câmera para reduzir lacunas informacionais durante eventos de alagamento.

O Problema de Orientação (*Orienteering Problem*, OP) é outra referência relevante: nele, um veículo deve selecionar um subconjunto de pontos a visitar para maximizar uma função de recompensa, respeitando um orçamento de tempo ou distância. A formulação proposta nesta dissertação combina elementos do VRPTW e do OP: múltiplos veículos,

priorização por recompensa (criticidade), restrição de autonomia e retorno obrigatório à base.

A formulação desta dissertação também se aproxima da família dos Vehicle Routing Problems with Profits, em especial do Orienteering Problem e de suas variantes com múltiplos veículos. Nessa classe de problemas, nem todos os pontos precisam ser visitados; o objetivo é selecionar um subconjunto de pontos com maior recompensa, respeitando restrições de tempo, distância ou capacidade. Essa estrutura é aderente ao problema de despacho de VANTs para alagamentos, pois, em um horizonte limitado, não é possível visitar todos os clusters sem cobertura, sendo necessário priorizar aqueles com maior criticidade operacional.

Essa aproximação com problemas de roteamento com lucros é reforçada por Tarantilis, Stavropoulou e Repoussis [43], que tratam o Capacitated Team Orienteering Problem como uma variante na qual se deve selecionar o subconjunto de pontos mais valioso a ser visitado por múltiplos veículos, respeitando restrições de capacidade e duração de rota. Na presente dissertação, a noção de lucro é substituída pela criticidade operacional dos clusters, medida na configuração principal pelo `combined_score`.

2.5.2 Temporary Facility Location Problem (TFLP)

Uma referência particularmente relevante para a presente dissertação é o trabalho de Carnero Quispe et al. [34], que realiza uma revisão sistemática da literatura sobre o *Temporary Facility Location Problem* (TFLP) em logística humanitária. O TFLP busca determinar o posicionamento ótimo de instalações temporárias (como abrigos, postos de triagem ou depósitos de emergência) em contextos dinâmicos de desastre, considerando horizontes multi-período e a variação da demanda ao longo do tempo.

A relevância do TFLP para o problema desta dissertação reside em quatro pontos de convergência:

1. **Dinamicidade do ambiente:** o TFLP oferece referência para a extensão exploratória em que as condições podem mudar ao longo do tempo e motivar a reavaliação periódica das decisões.
2. **Reconfiguração de recursos:** a ideia de facilidades temporárias que podem ser reposicionadas tem analogia com bases operacionais de VANTs que, em aplicações futuras, poderiam ser realocadas entre missões.

3. **Planejamento multi-período:** a discretização temporal do TFLP oferece referência para o experimento exploratório em janelas de decisão, não para a formulação estática principal.
4. **Necessidade de heurísticas escaláveis:** Carnero Quispe et al. [34] documentam o uso de heurísticas e metaheurísticas em instâncias de maior escala do TFLP. Esse resultado não demonstra a inviabilidade de métodos exatos para a instância desta dissertação, mas motiva a avaliação de métodos flexíveis para o roteamento urbano de VANTs, cujo tempo computacional é interpretado exclusivamente a partir das execuções avaliadas nesta pesquisa.

O trabalho de revisão mostra a relevância de abordagens adaptativas em cenários de desastre sujeitos a mudanças de demanda. Esse argumento fundamenta o horizonte rolante como extensão exploratória da formulação estática adotada nos experimentos principais.

2.5.3 Heurísticas e Metaheurísticas para Otimização Combinatória

Problemas de roteamento e cobertura podem impor custo computacional elevado conforme cresce o número de pontos, recursos e restrições. Heurísticas e metaheurísticas oferecem alternativas para contextos operacionais em que decisões precisam ser produzidas em tempo restrito. Nesta dissertação, sua adoção não é apresentada como prova de inviabilidade de métodos exatos, que não foram executados.

A *Busca Local Iterada* (ILS, *Iterated Local Search*) é uma metaheurística que alterna perturbações da solução corrente com fases de busca local, escapando de ótimos locais de forma sistemática [44]. O ILS é reconhecido como uma das abordagens mais simples e eficazes para problemas de roteamento, sendo frequentemente usado como referência de comparação.

A *Busca em Vizinhança Variável* (VNS, *Variable Neighborhood Search*) sistematiza a exploração de múltiplas estruturas de vizinhança, explorando o princípio de que um ótimo local em uma vizinhança pode não ser ótimo local em outra [45]. O VNS tem sido aplicado com sucesso em variantes do VRP e é candidato natural para o problema de roteamento de VANTs.

A aplicação de VNS a problemas híbridos veículo-drone já foi explorada por Zudio, Coelho e Ochi [11], reforçando a adequação dessa metaheurística a problemas de roteamento com drones e múltiplas restrições operacionais. Na presente dissertação, o VNS

é utilizado como estratégia de refinamento para rotas de VANTs, comparado ao Greedy MCD e ao ILS.

O *Biased Random-Key Genetic Algorithm* (BRKGA), proposto por Gonçalves e Resende [46], é um algoritmo genético de codificação por chaves aleatórias enviesadas que tem demonstrado desempenho de estado-da-arte em múltiplos problemas de roteamento e programação. O BRKGA é candidato a metaheurística principal para iterações futuras desta pesquisa.

Outra metaheurística clássica aplicável a problemas de otimização combinatória é o GRASP, proposto por Feo e Resende [47], que combina construção gulosa randomizada e busca local. Embora não tenha sido implementado nos experimentos desta dissertação, o GRASP é considerado como alternativa para expansões futuras do pipeline algorítmico.

2.6 Lacuna Científica e Posicionamento da Dissertação

A revisão da literatura permite identificar uma lacuna específica que a presente dissertação se propõe a preencher. Por um lado, existe vasta literatura sobre: - monitoramento de alagamentos com câmeras e sensores estáticos; - uso de VANTs para inspeção e monitoramento em geral; - problemas de roteamento de veículos com janelas de tempo; - localização de instalações em contextos humanitários.

Por outro lado, **permanece pouco explorada a integração entre a análise de cobertura da infraestrutura fixa existente, a priorização de áreas críticas sem câmera e o roteamento de múltiplos VANTs como sensores complementares em eventos hidrometeorológicos urbanos.**

O diferencial da presente dissertação é, portanto, o foco na **camada de apoio à decisão**: não apenas “drones monitoram alagamentos”, aspecto já documentado na literatura, mas como selecionar clusters prioritários, distribuir VANTs entre bases e construir rotas factíveis que maximizem a criticidade inspecionada em um horizonte limitado. O replanejamento periódico é mantido como extensão exploratória para avaliar como essa camada poderia evoluir quando sinais atualizados estiverem disponíveis.

3 ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS

3.1 Rio de Janeiro: Contexto Geográfico e Vulnerabilidade a Alagamentos

O município do Rio de Janeiro apresenta configuração geográfica e urbana marcada pela presença de planícies costeiras, baixadas, corpos hídricos e maciços montanhosos, como os maciços da Tijuca, Pedra Branca e Gericinó. Essa configuração, combinada à existência de diferentes macrobacias de drenagem e à elevada variabilidade espacial da precipitação, contribui para a recorrência de eventos adversos associados a chuvas intensas [20].

O regime de chuvas da cidade apresenta maior criticidade operacional entre os meses de novembro e abril, período destacado no Plano Verão 2024–2025 como o intervalo de maior atenção para os órgãos municipais envolvidos na resposta a eventos climáticos. Durante o verão, são comuns episódios de chuvas intensas e de curta duração, capazes de pressionar rapidamente os sistemas de drenagem urbana e gerar acúmulos de água em pontos críticos [20].

Nesse contexto, a vulnerabilidade a alagamentos não decorre apenas da intensidade da chuva, mas da combinação entre características naturais do território, ocupação urbana, infraestrutura de drenagem e distribuição espacial dos pontos críticos. Por isso, a análise de clusters de alagamento e da cobertura de videomonitoramento torna-se relevante para apoiar decisões operacionais em eventos de chuva intensa.

3.2 O Centro de Operações Rio (COR.rio)

3.2.1 Histórico e Missão Institucional

O Centro de Operações Rio foi inaugurado em dezembro de 2010 e opera continuamente como estrutura de integração, monitoramento e resposta da Prefeitura do Rio de Janeiro

[17, 18]. Segundo informações institucionais, o COR.rio foi estruturado para antecipar soluções e minimizar ocorrências de grande impacto na cidade, como chuvas fortes, deslizamentos e acidentes de trânsito com reflexos na mobilidade urbana [19]. A relevância institucional da instituição para a agenda de resiliência urbana também aparece no Catálogo de Iniciativas Climáticas Urbanas no Brasil [49]. No documento, a iniciativa de Comunicação Resiliente desenvolvida pelo Centro de Operações e Resiliência da Prefeitura do Rio é apresentada como ação voltada ao monitoramento de riscos climáticos, integração de ações públicas, comunicação com a população e fortalecimento da resiliência urbana. Essa menção reforça a pertinência de estudar o COR.rio não apenas como infraestrutura local de monitoramento, mas como caso relevante de governança operacional aplicada à adaptação climática urbana.

A missão do COR.rio é permitir que operadores e gestores tomem decisões mais rápidas, fundamentadas e coordenadas durante ocorrências que afetam o cotidiano da cidade, com ênfase especial em eventos climáticos extremos, acidentes de trânsito e falhas de infraestrutura urbana.

3.2.2 Infraestrutura de Monitoramento

A infraestrutura técnica do COR.rio inclui:

- **Rede de câmeras:** mais de 4.000 câmeras de videomonitoramento distribuídas em logradouros, túneis, vias expressas e áreas de risco;
- **Rede pluviométrica:** dezenas de pluviômetros georreferenciados para monitoramento em tempo real de precipitação;
- **Integração com o Waze:** dados de trânsito e alertas colaborativos dos usuários, incluindo relatos de alagamentos;
- **Radar meteorológico:** dados do radar do INMET para acompanhamento de sistemas convectivos;
- **Câmeras de controle de acesso e iluminação:** fontes adicionais de videomonitoramento municipal.

Todo esse ecossistema de sensoriamento é integrado em uma plataforma de visualização operacional que permite aos analistas acompanhar simultaneamente dezenas de ocorrências, cruzando fontes de informação para confirmação e triagem.

A base consolidada utilizada nesta dissertação integra informações espaciais, operacionais e temporais relacionadas aos clusters críticos de alagamento, à infraestrutura de câmeras do COR.rio e aos registros históricos de ocorrências. A tabela 1 sintetiza os principais indicadores derivados desse processo de consolidação, funcionando como visão geral da base empírica utilizada nos experimentos de roteamento de VANTs.

Fonte: elaboração própria, a partir da base consolidada da pesquisa e do dashboard Rio Flood Coverage.

Tabela 1: Síntese dos principais indicadores da base empírica utilizada na pesquisa

Indicador	Quantidade	Interpretação
Clusters críticos analisados	344	Universe espacial da pesquisa, representando áreas críticas de alagamento no município do Rio de Janeiro.
Câmeras inventariadas	4.163	Infraestrutura fixa de videomonitoramento considerada na análise de cobertura.
Clusters com câmera	186 (54,1%)	Áreas críticas que possuem ao menos uma câmera atribuída.
Clusters sem câmera	158 (45,9%)	Pontos cegos operacionais e alvos potenciais para despacho de VANTs.
Registros temporais de alagamento	5.971	Observações temporais utilizadas para inferência de episódios e análise da dinâmica dos eventos.
Episódios inferidos	276	Eventos derivados do agrupamento temporal dos registros de abril/2023 a janeiro/2024.
Ocorrências operacionais COR	4.532	Base georreferenciada de ocorrências operacionais do COR.rio, com cobertura de 2015 a 2024.

Os indicadores apresentados na tabela 1 evidenciam que a cidade dispõe de uma infraestrutura expressiva de videomonitoramento, mas que essa cobertura não se distribui de forma homogênea em relação aos clusters críticos de alagamento. Em particular, os 158 clusters sem câmera representam os gaps observacionais que motivam a formulação do problema de despacho de VANTs tratado nesta dissertação. Assim, a análise não busca substituir a infraestrutura fixa existente, mas propor uma camada móvel e complementar de observação para apoiar a priorização operacional em eventos de chuva intensa.

A caracterização institucional do COR.rio deve ser interpretada em conjunto com documentos operacionais recentes, como o Plano Verão 2024-2025, que explicita protocolos, responsabilidades e ações integradas para eventos de chuva intensa no município [20]. Esses documentos reforçam que o COR.rio funciona como infraestrutura de coordenação operacional, e não apenas como central de visualização.

Para fins de reprodutibilidade analítica, os resultados desta dissertação consideram um data freeze correspondente à versão dos arquivos processados no ciclo de desenvolvimento da pesquisa. Atualizações posteriores da rede de câmeras, das ocorrências COR ou dos polígonos de clusters podem alterar os resultados quantitativos, mas não a estrutura metodológica proposta.

3.2.3 Leitura Metodológica do Caso

Do ponto de vista metodológico, o COR.rio não é apenas o “cenário” desta dissertação, ele é a **infraestrutura-base** do problema. Os clusters críticos foram definidos a partir de dados operacionais do COR.rio; as câmeras são ativos reais da rede do COR.rio; os episódios de alagamento foram inferidos a partir de registros históricos gerados pelo sistema do COR.rio.

A dissertação não propõe substituir o COR.rio por VANTs. Propõe ampliar a capacidade observacional do COR.rio para as 158 áreas críticas que sua infraestrutura fixa atual não cobre.

3.3 Base de Dados: Clusters Críticos

3.3.1 Origem e Definição dos Clusters

O conjunto de 344 clusters críticos de alagamento foi construído por meio da agregação e análise geoespacial de registros históricos de eventos de alagamento no Rio de Janeiro. Cada cluster representa uma unidade geográfica de análise, um polígono delimitado que agrega uma zona de risco persistente de alagamento, fundamentada no histórico acumulado de ocorrências.

Os clusters são armazenados no arquivo `polygons-2026.json`, com coordenadas no sistema geodésico WGS84 (EPSG:4326). Cada cluster possui, entre outros atributos: - `cluster_id`: identificador único inteiro; - `label_count`: contagem histórica acumulada de eventos de alagamento associados ao cluster, derivada da agregação de múltiplas fontes

do COR.rio ao longo dos anos.

O campo `label_count` representa a frequência histórica associada ao cluster e constitui um dos componentes da métrica de criticidade utilizada nesta dissertação. Nos experimentos principais, a priorização é baseada na métrica enriquecida `combined_score`, que combina `label_count` e `cor_weighted_score`.

3.3.2 Distribuição Geográfica dos Clusters

Os 344 clusters distribuem-se por toda a extensão do município, com concentrações notáveis nas regiões com maior histórico de alagamentos: Zona Oeste (Jacarepaguá, Barra da Tijuca, Itanhangá, Campo Grande), Zona Norte (Engenho Novo, Méier, Piedade, Irajá), Zona Sul (Lagoa, São Conrado, Botafogo) e Centro.

A área média dos clusters é de aproximadamente $0,10 \text{ km}^2$, indicando que são unidades geográficas de escala de quarteirão ou microzona, granularidade adequada para suportar decisões operacionais de despacho de VANTs.

Para evitar a interpretação dos clusters como pontos isolados, é importante destacar que eles representam áreas espaciais de recorrência histórica de registros de alagamento. Esses agrupamentos foram obtidos a partir da concentração geográfica de pontos reportados no histórico operacional analisado, conforme metodologia explorada em trabalho anterior [7]. A Figura 3 apresenta exemplos ilustrativos desse processo e mostra como os clusters passam a ser representados como polígonos operacionais na base consolidada da pesquisa.

A Figura 3 evidencia que o cluster não corresponde a uma ocorrência individual, mas a uma unidade espacial construída a partir da recorrência geográfica de registros históricos. Essa representação permite associar a cada cluster atributos como área, centróide e densidade de registros, além de avaliar sua relação com a infraestrutura de câmeras existente. Na formulação computacional do problema, os polígonos preservam a interpretação territorial dos eventos, enquanto os centróides são utilizados como aproximação operacional para os algoritmos de roteamento dos VANTs.

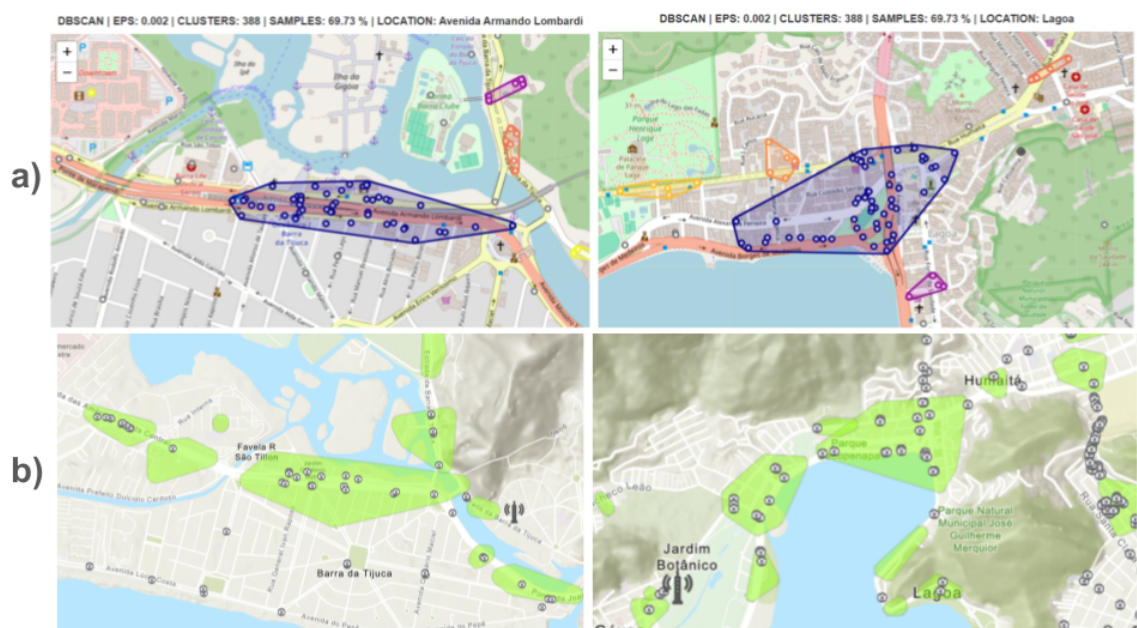


Figura 3: Exemplos da formação e representação espacial dos clusters críticos de alagamento: (a) agrupamento espacial de registros históricos por clusterização; (b) representação operacional dos clusters como polígonos e sua relação com câmeras de monitoramento no território.

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da pesquisa; adaptado de Oliveira, Silva e Ochi [7].

3.4 Base de Dados: Câmeras

3.4.1 Inventário e Estrutura

O inventário de câmeras do COR.rio compreende **4.163 câmeras** georreferenciadas, armazenadas no arquivo cameras-2026.json. Cada câmera possui coordenadas de latitude e longitude, bem como um campo `cluster_id` que indica a qual cluster crítico ela está atribuída. Câmeras com `cluster_id = -1` estão fora do recorte dos 344 clusters críticos.

Categoria	Quantidade
Total de câmeras no inventário	4.163
Câmeras atribuídas a clusters (<code>cluster_id</code> $\neq$ -1)	815 (19,6%)
Câmeras fora dos clusters críticos (<code>cluster_id</code> = -1)	3.348 (80,4%)

O elevado percentual de câmeras com `cluster_id = -1` (80,4%) não implica que essas câmeras sejam desnecessárias ou mal posicionadas. Elas estão distribuídas em vias, logradouros, túneis e outras áreas da cidade que, embora não façam parte dos 344 clusters de

risco de alagamento considerados nesta dissertação, podem atender a outras finalidades de monitoramento urbano do COR.rio [17, 18, 19]. Para os fins desta dissertação, contudo, apenas as câmeras atribuídas aos 344 clusters são relevantes para a análise de cobertura.

3.4.2 Análise de Cobertura por Cluster

A análise de cobertura foi realizada por meio do cruzamento entre o inventário de câmeras e o cadastro de clusters, utilizando o campo `cluster_id` como chave de ligação. A Tabela 2 resume os resultados:

Tabela 2: Análise de Cobertura de Câmeras por Cluster

Indicador	Valor
Total de clusters críticos	344
Clusters com câmera (cobertura)	186 (54,1%)
Clusters sem câmera (gap observacional)	158 (45,9%)
Câmeras atribuídas (total)	815
Distribuição: clusters com 1 câmera	60 (17,4%)
Distribuição: clusters com 2–4 câmeras	72 (20,9%)
Distribuição: clusters com 5+ câmeras	54 (15,7%)

A distribuição de câmeras por cluster é altamente assimétrica: enquanto alguns clusters concentram dezenas de câmeras (o Cluster 25, na Lapa, possui 50 câmeras), a maioria dos clusters cobertos tem apenas 1 ou 2 câmeras, e quase metade (158) não possui nenhuma.

Tabela 3: Top 10 Clusters com Maior Cobertura de Câmeras

Cluster	Bairro	Câmeras	label_count
25	Lapa	50	89
12	São Cristóvão	32	20
21	Cidade Nova	31	66
43	Barra da Tijuca	27	192
8	Copacabana	22	71
0	Lagoa	18	98
64	Lagoa	14	99
1	Caju	15	31
56	Botafogo	13	15
138	Centro	13	40

Um paradoxo relevante emerge do Cluster 43 (Barra da Tijuca): com `label_count` = 192, o maior de todo o conjunto, e 27 câmeras, trata-se do cluster mais monitorado e mais historicamente problemático. Isso sugere que o investimento em câmeras nessa área reflete o reconhecimento histórico de sua criticidade.

3.5 Gaps Observacionais: Os 158 Clusters Sem Câmera

3.5.1 Definição e Perfil

O gap observacional oficial é definido como: **cluster com** `n_cameras` = 0, independentemente de qualquer outro critério temporal ou de intensidade de eventos. Sob essa definição, 158 dos 344 clusters críticos são gaps.

O perfil dos 158 gaps inclui: - `label_count` médio: 6,7 (menor que a média geral de 9,4 do conjunto completo) - `label_count` máximo: 42 (Cluster 101, São Conrado) - Densidade histórica média de registros de alagamento (registros/km²): 106,4 registros/km² - Densidade máxima: 820 registros/km² (Cluster 134, Padre Miguel, área de 0,037 km²) - Concentração geográfica: Zona Oeste e Zona Norte

O menor `label_count` médio dos clusters gap em relação à média geral pode refletir um viés histórico de monitoramento: áreas que historicamente receberam mais câmeras

também acumularam mais registros de eventos, inflacionando seu `label_count`. Áreas sem câmera podem ter histórico subestimado, o que reforça a importância de não usar a ausência de registro como prova de irrelevância.

A variável `density_km2` representa a densidade histórica de registros de alagamento por quilômetro quadrado do polígono do cluster. Essa métrica é calculada pela razão entre `label_count` e `area_km2`, ou seja, $\text{density_km2} = \text{label_count} / \text{area_km2}$. Dessa forma, ela expressa concentração espacial relativa dos registros históricos associados a alagamentos dentro de cada área crítica.

Essa variável permite diferenciar clusters que possuem quantidade semelhante de registros, mas áreas muito distintas. Um cluster pequeno com histórico recorrente tende a apresentar alta densidade, indicando concentração espacial do problema. Por outro lado, clusters maiores podem apresentar `label_count` elevado, mas densidade menor, caso os registros estejam distribuídos em uma área mais extensa.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos clusters críticos sem cobertura por câmera fixa. Esses pontos representam os gaps observacionais considerados como candidatos ao despacho de VANTs no modelo proposto.

A visualização reforça a natureza espacial do problema: os gaps não estão concentrados em um único ponto da cidade, mas distribuídos por diferentes regiões. Essa dispersão justifica a avaliação de cenários com bases de decolagem distribuídas e diferentes tamanhos de frota.

3.5.2 Top 50 Clusters Sem Câmera Prioritários

Além da frequência absoluta de registros históricos, expressa por `label_count`, foi analisada a densidade histórica de registros por quilômetro quadrado. Essa métrica permite identificar áreas críticas onde os registros de alagamento estão mais concentrados espacialmente. Assim, a densidade não deve ser interpretada como medida direta de severidade absoluta, mas como indicador de concentração espacial do histórico de ocorrências.

O Top 50 de clusters gap foi obtido por ordenação decrescente de `label_count`. A Tabela 4 apresenta os 20 primeiros:

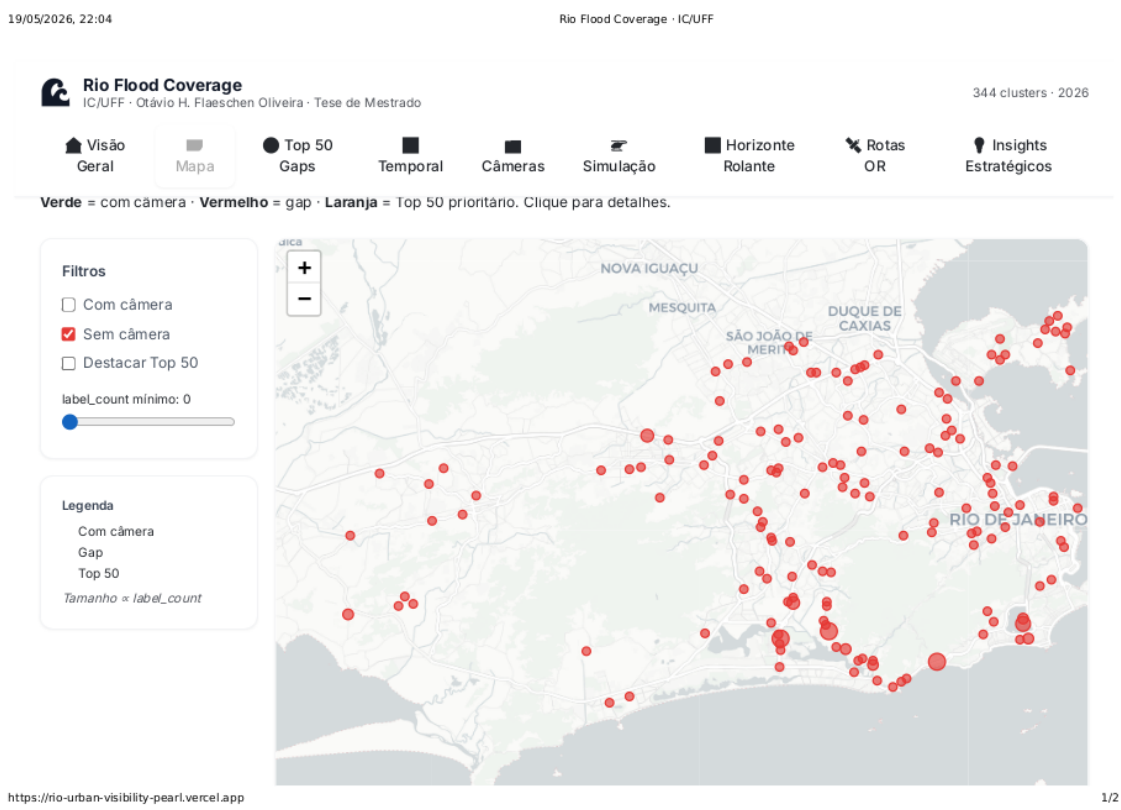


Figura 4: Distribuição espacial dos clusters críticos sem cobertura por câmera fixa no município do Rio de Janeiro. Em vermelho, os gaps observacionais.

Fonte: Elaboração própria, a partir do dashboard Rio Flood Coverage. Base cartográfica: OpenStreetMap/CartoDB.

Tabela 4: Top 20 Clusters Gap por Criticidade (label_count DESC)

Rank	Cluster	Bairro	label_count	Densidade (registros/km ²)
1	101	São Conrado	42	279
2	70	Barra da Tijuca	41	196
3	86	Itanhangá	39	314
4	45	Lagoa	37	494
5	134	Padre Miguel	30	820
6	88	Gardênia Azul	27	60
7	128	Itanhangá	22	117
8	119	Lagoa	21	52
9	104	Itanhangá	18	34
10	242	Ipanema	17	450
11	206	Guaratiba	16	361
12	132	Anchieta	15	25
13	135	Galeão	15	317
14	140	Jardim Sulacap	15	320
15	217	Galeão	15	559
16	161	Jardim Carioca	14	340
17	34	Irajá	13	40
18	156	Bangu	12	31
19	184	Galeão	12	103
20	172	Itanhangá	12	394

Nota: A variável density_km2 corresponde à razão entre label_count e area_km2, representando a densidade histórica de registros de alagamento por quilômetro quadrado. Essa métrica não representa densidade demográfica nem severidade absoluta do evento, mas sim concentração espacial relativa dos registros históricos dentro do polígono do cluster.

O Cluster 134, localizado em Padre Miguel, apresenta label_count igual a 30 e área de aproximadamente 0,0366 km², resultando em densidade histórica de cerca de 820,39 registros/km². Já o Cluster 45, localizado na Lagoa, possui label_count igual a 37 e área de aproximadamente 0,0749 km², resultando em 494,01 registros/km². Embora o Cluster

45 possua maior número absoluto de registros, o Cluster 134 apresenta maior densidade porque seus registros estão concentrados em uma área menor. Portanto, a densidade deve ser interpretada como indicador de concentração espacial do histórico de alagamentos, e não como medida isolada de prioridade operacional.

A Figura 5 destaca o subconjunto Top 50 de clusters sem câmera, utilizado como recorte visual de priorização operacional. O tamanho dos marcadores representa a criticidade histórica associada aos clusters, enquanto a cor diferencia os pontos priorizados em relação aos demais gaps.

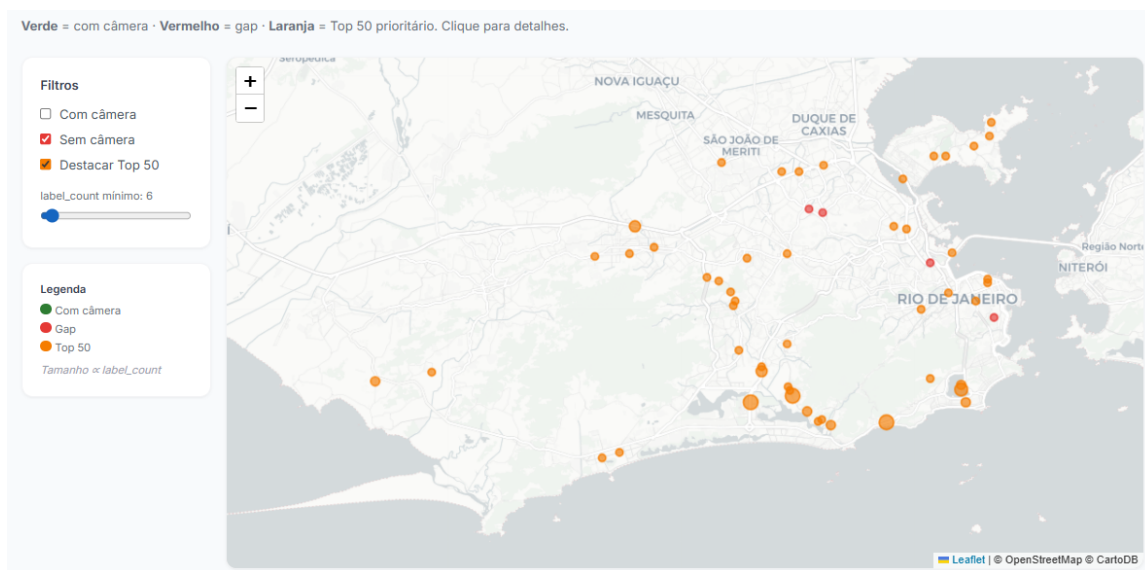


Figura 5: Clusters sem câmera com destaque para o subconjunto Top 50 prioritário, definido a partir da criticidade histórica dos registros.

Fonte: Elaboração própria, a partir do dashboard Rio Flood Coverage. Base cartográfica: OpenStreetMap/CartoDB.

Essa visualização evidencia que a estratégia proposta não se limita a identificar ausência de câmera, mas também busca ordenar os pontos cegos de acordo com sua relevância operacional. Essa distinção é importante porque nem todo gap possui o mesmo peso para o planejamento de despacho de VANTs.

3.6 Base de Dados: Registros Temporais de Eventos

3.6.1 Estrutura e Escopo dos Dados

O arquivo merged_polygons_20251205_121643.csv contém **5.971 registros temporais** de atividade de alagamento georreferenciada, cobrindo o período de **abril de 2023 a**

janeiro de 2024. Cada registro corresponde a uma observação pontual associada a um cluster em um determinado momento, incluindo informações como:

- Identificador do cluster (`cluster_id`)
- Timestamp da observação
- Contagens de bolsões de água, alagamentos e enchentes
- Dados pluviométricos nos instantes anteriores
- Fonte da observação (câmera, Waze, bolsão cadastrado)
- Status operacional

Atenção metodológica crítica: os 5.971 registros representam uma amostra temporal, não o histórico completo de eventos. A ausência de registros para um cluster no período amostrado não implica que o cluster seja irrelevante historicamente. O `label_count` do arquivo de polígonos, derivado de período mais longo, é adotado como indicador de frequência histórica e compõe a métrica de criticidade enriquecida utilizada nos experimentos principais.

3.6.2 Episódios Inferidos de Alagamento

A partir dos registros temporais, foram inferidos **276 episódios de alagamento** utilizando o critério de agrupamento por proximidade temporal (gap de 10 minutos). O resultado foi o seguinte perfil estatístico:

Métrica	Valor
Episódios totais identificados	276
Duração média por episódio	57,5 min
Duração mediana	30,0 min
Duração máxima	775 min (12,9 horas)
Cluster mais ativo	4 (Engenho Novo): 109 episódios, 1.687 registros

O Cluster 4 (Engenho Novo) destaca-se como o mais problemático operacionalmente: 109 episódios, duração máxima de 775 minutos, quase 13 horas de evento contínuo, e 1.687

registros no período. Apesar de possuir 3 câmeras, o volume de registros associado a esse cluster sugere a necessidade de avaliação complementar sobre a suficiência da cobertura existente para a magnitude dos eventos observados.

3.6.3 Série Temporal Mensal

A distribuição mensal dos registros revela sazonalidade marcada, alinhada ao regime pluviométrico carioca:

Tabela 5: Distribuição Mensal de Registros de Eventos

Mês	Registros
Abril/2023	130
Maio/2023	388
Junho/2023	0
Julho/2023	48
Agosto/2023	799
Setembro/2023	5
Outubro/2023	1.064
Novembro/2023	535
Dezembro/2023	171
Janeiro/2024	294

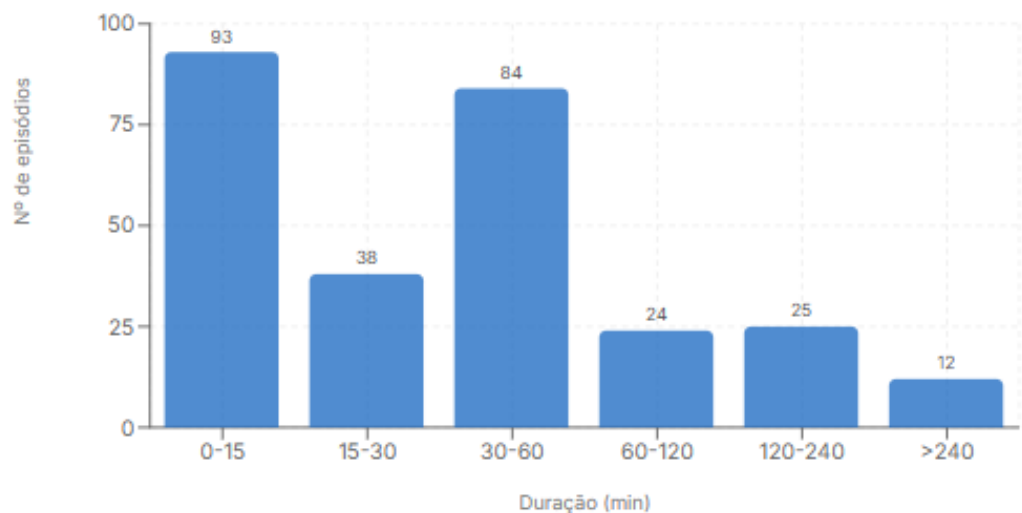
O pico global de atividade foi em outubro de 2023 (1.064 registros). Para os clusters gap especificamente, conforme demonstrado no Capítulo 6, o dia mais crítico foi 20 de agosto de 2023, com 49 registros em 5 clusters sem câmera.

Para complementar a caracterização espacial dos clusters, a base temporal foi utilizada para inferir episódios de alagamento a partir da sequência de registros associados a um mesmo cluster. Essa etapa permite diferenciar registros individuais de eventos operacionais agregados, evitando que múltiplas atualizações de uma mesma situação sejam interpretadas como ocorrências independentes. A Figura 6 apresenta a distribuição de duração dos 276 episódios inferidos no recorte temporal utilizado na pesquisa.

A distribuição indica que a maior parte dos episódios inferidos possui curta ou média duração, com mediana de 30 minutos. Ainda assim, observa-se a existência de episódios prolongados, superiores a 120 minutos, que embora menos frequentes, possuem maior

Distribuição de Duração dos Episódios

Episódios agrupados por faixa de duração (276 total · mediana: 30 min)



Mediana 30 min. Eventos severos (>120 min) são raros mas críticos.

Figura 6: Distribuição da duração dos episódios inferidos a partir dos registros temporais de alagamento.

Fonte: Elaboração própria, a partir da base consolidada da pesquisa e do dashboard Rio Flood Coverage.

relevância operacional por indicarem situações persistentes de impacto urbano. Essa informação reforça a importância de tratar o fenômeno de alagamento não apenas como registro pontual, mas como evento temporalmente estruturado, com início, duração e encerramento estimado no recorte analisado.

3.7 Dados Operacionais do COR.rio: Ocorrências 2015–2024

Uma segunda fonte de dados empíricos foi incorporada ao estudo: o arquivo de ocorrências operacionais do COR.rio, extraído diretamente do sistema institucional. Esse conjunto de dados registra eventos de acúmulo de água reportados e gerenciados pelo COR.rio ao longo de quase uma década.

3.7.1 Estrutura e Cobertura Temporal

O arquivo contém 4.868 registros, dos quais 4.532 possuem coordenadas geográficas válidas (lat/lon). A cobertura temporal é de **2015-04-10 a 2024-03-26**, aproximadamente 9 anos de operação real. Cada registro inclui: identificador do evento, bairro, data de início e fim, coordenadas geográficas, gravidade e tipo de ocorrência.

As categorias operacionais associadas às ocorrências do COR.rio devem ser interpretadas como estados ou classificações possíveis de uma ocorrência em acompanhamento, e não como classes mutuamente exclusivas. Em termos operacionais, uma ocorrência pode iniciar com baixa severidade, como lâmina d’água, e evoluir para bolsão ou alagamento, mantendo o mesmo registro para preservar o rastreamento da situação. Por essa razão, as contagens por categoria expressam incidência operacional e podem apresentar sobreposição.

Tabela 6: Distribuição de ocorrências COR por categoria operacional

Tipo	Registros	%
Bolsão d’água em via	4.217	93,1%
Alagamento	466	10,3%
Lâmina d’água	185	4,1%

Nota: As categorias operacionais não são mutuamente exclusivas. Uma mesma ocor-

rência pode registrar diferentes classificações ao longo de sua evolução operacional, por exemplo, iniciando como lâmina d’água e posteriormente evoluindo para bolsão, alagamento ou outra condição monitorada. Essa estrutura preserva o rastreamento da ocorrência e permite acompanhar sua progressão temporal no sistema operacional. Portanto, os percentuais apresentados devem ser interpretados como incidência de cada categoria sobre o conjunto de ocorrências analisadas, e não como uma distribuição de classes exclusivas cuja soma necessariamente resulte em 100%.

Tabela 7: Distribuição de ocorrências COR por gravidade
(registros válidos)

Gravidade	Registros	%
Baixo	4.176	92,1%
Médio	398	8,8%
Normal	173	3,8%
Alto	99	2,2%
Crítico	18	0,4%

Nota: As categorias de gravidade também devem ser interpretadas como incidências de estados registrados ao longo do acompanhamento operacional, e não necessariamente como classes finais mutuamente exclusivas. Uma mesma ocorrência pode evoluir de baixa para média, alta ou crítica durante seu ciclo de vida, preservando o identificador operacional para fins de rastreamento. Assim, os percentuais indicam incidência por gravidade no conjunto analisado e não uma partição exclusiva do total de ocorrências.

3.7.2 Cruzamento com os Polígonos de Clusters

As coordenadas de cada ocorrência foram cruzadas com os 344 polígonos de clusters críticos via join espacial ponto-em-polígono (`gpd.sjoin`, predicado `within`). O resultado revela:

- **3.529 eventos** (77,9%) foram atribuídos a um cluster específico
- **1.003 eventos** (22,1%) caem fora de todos os polígonos
- **343 dos 344 clusters** possuem pelo menos um registro operacional

- **Todos os 158 clusters gap** possuem pelo menos um registro operacional COR

O último ponto tem implicação direta para a dissertação: indica que todos os gaps observacionais possuem registros operacionais históricos associados, não correspondendo apenas a áreas definidas sem evidência de ocorrências no período analisado.

3.7.3 Score de Criticidade Enriquecida

Para cada cluster, foi calculado um **score ponderado por gravidade** a partir dos eventos COR:

$$\gamma_i = \text{cor_weighted_score}_i = \sum_{e \in E_i} w_g(e), \quad (3.1)$$

em que E_i é o conjunto de eventos atribuídos ao cluster i e $w_g(e)$ é o peso associado à gravidade do evento e : Crítico=4, Alto=3, Médio=2 e Normal/Baixo=1.

A partir desse score, foi definida a métrica de **criticidade enriquecida**:

$$\eta_i = \text{combined_score}_i = \ell_i + \gamma_i, \quad (3.2)$$

em que $\ell_i = \text{label_count}_i$ representa a frequência histórica associada ao cluster. O termo `combined_score` é mantido em inglês por corresponder ao nome da variável utilizada no pipeline computacional da pesquisa. Conceitualmente, ele representa a criticidade operacional enriquecida do cluster, calculada pela soma entre a frequência histórica dos registros e o score operacional ponderado por gravidade.

Esta formulação combina a frequência histórica dos registros, representada por `label_count` no arquivo de polígonos, com a intensidade operacional real dos eventos COR, representada por `cor_weighted_score`.

A Figura 7 apresenta o ranking dos clusters gap segundo a configuração V3, na qual a criticidade é representada pelo `combined_score`. Essa métrica combina a frequência histórica dos registros com a gravidade operacional das ocorrências COR, permitindo uma priorização mais informada do que aquela baseada apenas em contagem simples.

Esse ranking fundamenta a escolha da configuração V3 como base principal dos experimentos, pois incorpora tanto evidência histórica quanto informação operacional en-

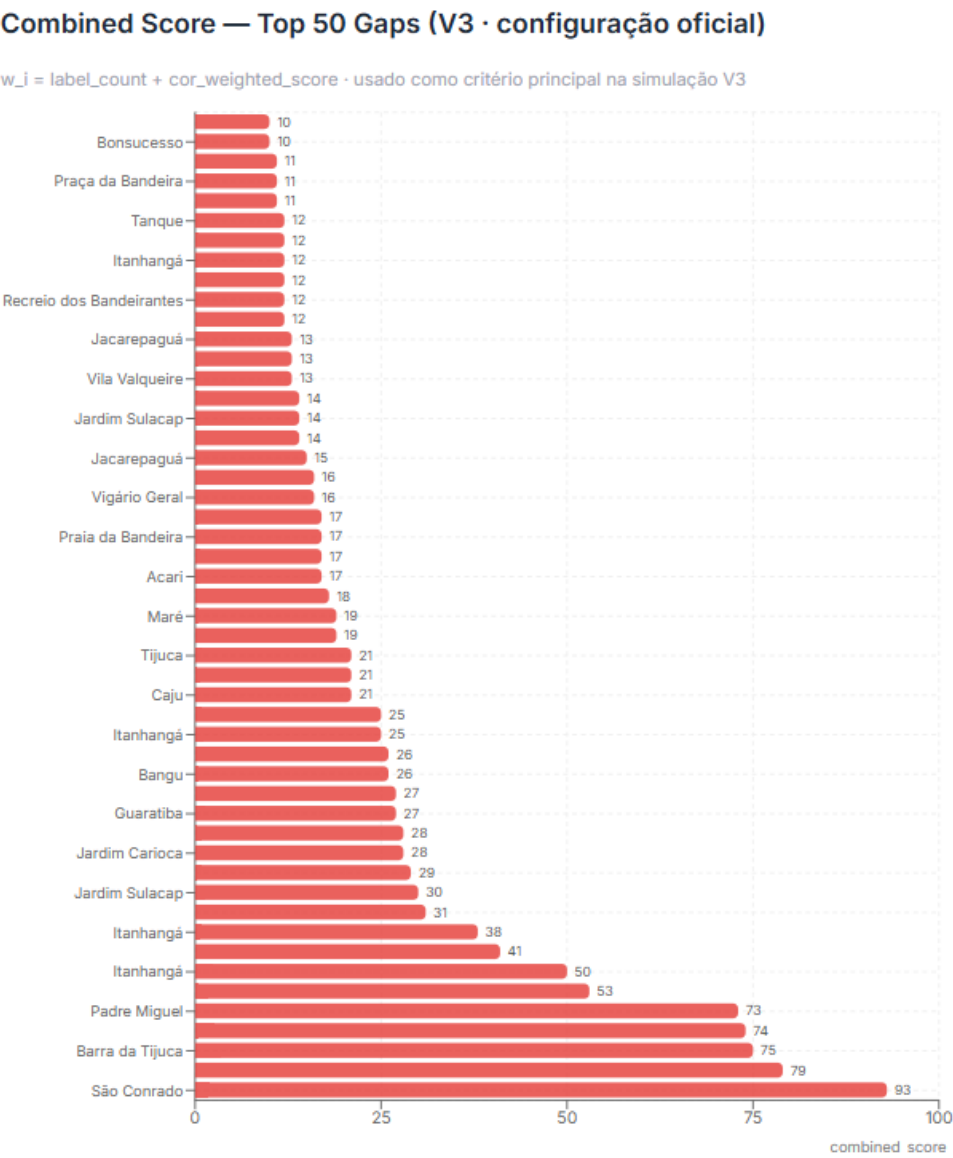


Figura 7: Ranking dos clusters gap prioritários segundo a métrica V3, baseada no *combined_score*.
Fonte: Elaboração própria, a partir do dashboard Rio Flood Coverage.

riquecida. Dessa forma, a prioridade de visita dos VANTs passa a refletir não apenas a recorrência dos registros, mas também sua relevância operacional.

3.8 Limitações dos Dados

Cinco limitações principais devem ser explicitadas:

1. **Recorte temporal parcial (CSV de episódios):** os registros temporais cobrem apenas 10 meses (abril/2023 a janeiro/2024). Episódios fora desse período não estão representados nesse conjunto.
2. **Subestimação do histórico em áreas sem câmera:** clusters sem câmera geram menos registros automatizados, o que pode subestimar seu `label_count` real. O cruzamento com os dados operacionais COR (9 anos) mitiga parcialmente esse viés, pois ocorrências COR são registradas independentemente da presença de câmeras.
3. **Câmeras sem atribuição espacial:** 3.348 câmeras (80,4%) têm `cluster_id = -1`. Uma análise espacial (ponto-em-polígono) poderia reclassificar parte dessas câmeras como pertencentes a clusters, potencialmente reduzindo o número oficial de gaps. Esta investigação está fora do escopo desta dissertação (ver Capítulo 7).
4. **Dados de simulação vs. dados operacionais em tempo real:** os experimentos descritos no Capítulo 6 são baseados em dados históricos, não em operação em tempo real. A aplicação operacional real exigiria integração com o sistema do COR.rio em modo de streaming.
5. **Atualização da infraestrutura urbana:** os dados de câmeras, clusters e criticidade representam um recorte temporal específico da infraestrutura de monitoramento e dos registros operacionais disponíveis no momento da extração e processamento. Em conversa com operadores do COR.rio, foi indicado que novas câmeras foram instaladas e algumas obras de drenagem e mitigação foram realizadas após o período analisado, podendo alterar a cobertura observacional e reduzir a criticidade de determinados clusters. Assim, os resultados devem ser interpretados como uma fotografia metodológica do período estudado, e não como diagnóstico definitivo e permanentemente atualizado da cidade.

3.9 Governança, Privacidade e Disponibilidade dos Dados

Os conjuntos de dados utilizados nesta dissertação são derivados de bases operacionais associadas ao monitoramento urbano do município do Rio de Janeiro, incluindo informações georreferenciadas de clusters críticos, câmeras, registros temporais de eventos e ocorrências operacionais do COR.rio. Por envolverem dados institucionais, coordenadas de ativos urbanos, registros operacionais e informações potencialmente sensíveis para a segurança e a gestão da cidade, as bases brutas não são disponibilizadas publicamente.

A reprodutibilidade desta pesquisa é assegurada por meio da descrição metodológica dos procedimentos adotados, incluindo critérios de filtragem, definição de gaps observacionais, construção das métricas de criticidade, formulação matemática, pseudocódigo dos algoritmos, parâmetros experimentais, tabelas agregadas e resultados consolidados. Dessa forma, a dissertação privilegia a reprodutibilidade metodológica e analítica, sem expor publicamente dados brutos, coordenadas sensíveis, fluxos operacionais ou componentes tecnológicos proprietários.

Os códigos e pipelines utilizados no processamento também não são disponibilizados integralmente em repositório público, por incorporarem rotinas associadas à estrutura tecnológica da solução desenvolvida, regras de integração e manipulação de bases operacionais. Quando necessário para fins de auditoria acadêmica, a validação dos resultados pode ser realizada por meio de tabelas agregadas, pseudocódigos, parâmetros documentados e artefatos derivados sem exposição dos dados sensíveis.

Do ponto de vista ético e de privacidade, esta dissertação não tem como objetivo identificar pessoas, veículos, placas, rostos ou trajetórias individuais. A unidade de análise é o cluster crítico de alagamento, e os resultados são apresentados de forma agregada, por meio de métricas espaciais, rankings de criticidade, cobertura ponderada e rotas simuladas de VANTs. As imagens, vídeos e registros operacionais que originaram parte das bases não são expostos individualmente nesta dissertação.

A abordagem proposta deve ser compreendida como sistema de apoio à decisão para monitoramento de risco urbano, e não como sistema de vigilância individualizada. Em eventual implantação operacional, recomenda-se que o uso de VANTs e câmeras siga princípios de minimização de dados, finalidade específica, segurança da informação, controle de acesso, registro de auditoria e governança institucional sobre o ciclo de vida dos dados.

Essas diretrizes são coerentes com os princípios da Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD), especialmente no que se refere à finalidade, minimização, segurança,

prevenção e responsabilização no tratamento de dados pessoais [48]. Ainda que a unidade de análise desta dissertação seja espacial e agregada, e não individual, a governança dos dados é componente essencial para qualquer implantação operacional envolvendo câmeras, VANTs e registros urbanos.

4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

4.1 Definição do Problema

Esta dissertação considera o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) como sensores móveis complementares à infraestrutura fixa de videomonitoramento. O problema decisório consiste em determinar quais clusters críticos sem câmera devem ser visitados, por qual VANT e em qual ordem, respeitando o horizonte de missão e o retorno à base, de modo a maximizar a criticidade total inspecionada.

O estudo utiliza 344 clusters críticos de alagamento, dos quais 158 não possuem cobertura por câmera fixa. Esses 158 clusters constituem os alvos potenciais dos VANTs. Cada cluster é representado computacionalmente pelo centroide de seu polígono e recebe um peso de criticidade. Os VANTs partem de bases predefinidas, realizam uma sequência de visitas e retornam à respectiva base dentro do horizonte disponível.

O problema apresenta características do Team Orienteering Problem: uma equipe de recursos percorre um subconjunto de pontos, cada qual associado a uma recompensa, sem que seja necessário visitar todos os pontos [39, 41]. Nesta dissertação, a recompensa corresponde à criticidade operacional do cluster. A formulação principal representa a missão estática utilizada nos experimentos dos cenários A–D. O replanejamento em horizonte rolante é tratado separadamente, como extensão exploratória, na Seção 4.8.

4.2 Conjuntos e Índices

Símbolo	Descrição
C	Conjunto dos clusters críticos, com $ C = 344$.
$G \subset C$	Conjunto dos clusters sem cobertura por câmera fixa, com $ G = 158$.

Símbolo	Descrição
K	Conjunto dos VANTs disponíveis.
B	Conjunto das bases operacionais.
$b_k \in B$	Base atribuída ao VANT $k \in K$.
$N_k = G \cup \{b_k\}$	Conjunto de nós acessíveis ao VANT k , formado pelos alvos e por sua base atribuída.
A_k	Conjunto de arcos possíveis (i,j) , com $i,j \in N_k$ e $i \neq j$.

Todos os 158 elementos de G são considerados candidatos. O Top-50 apresentado no Capítulo 3 é um recurso descritivo de priorização e visualização, mas não restringe o conjunto de alvos dos experimentos principais. A definição de N_k impede que um VANT utilize como origem, destino ou nó intermediário uma base diferente daquela que lhe foi atribuída.

4.3 Parâmetros

4.3.1 Criticidade

Seja δ_i o indicador de cobertura fixa:

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{se o cluster } i \text{ possui cobertura por câmera fixa;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.1)$$

Essa convenção permite expressar o peso dos clusters sem câmera pelo fator $(1 - \delta_i)$. Duas configurações de criticidade são avaliadas:

$$w_i^{V2} = \ell_i(1 - \delta_i), \quad (4.2)$$

$$\eta_i = \ell_i + \gamma_i, \quad (4.3)$$

$$w_i^{V3} = \eta_i(1 - \delta_i), \quad (4.4)$$

em que ℓ_i representa a frequência histórica registrada no campo computacional *label_count*; γ_i representa o escore das ocorrências do COR.rio ponderadas por gravidade,

denominado *cor_weighted_score*; e η_i representa a criticidade operacional enriquecida, denominada *combined_score* no código.

A configuração V2 é mantida como etapa intermediária e referência metodológica. A configuração V3 é a base principal da dissertação, pois combina frequência histórica e severidade operacional. Como os experimentos são executados sobre G , tem-se $\delta_i = 0$ para todos os alvos e, portanto, $w_i^{V2} = \ell_i$ e $w_i^{V3} = \eta_i$. A mudança de convenção de δ_i não altera pesos nem resultados.

4.3.2 Deslocamento e Missão

Símbolo	Descrição
d_{ij}	Distância geodésica, em quilômetros, entre os nós i e j .
v	Velocidade média de voo, em quilômetros por hora.
$t_{ij} = 60d_{ij}/v$	Tempo estimado de deslocamento, em minutos.
s_i	Tempo de inspeção do cluster i , em minutos.
H	Horizonte máximo da missão, em minutos.
w_i	Peso de criticidade utilizado na execução, conforme V2 ou V3.

As distâncias d_{ij} são calculadas pela fórmula de Haversine sobre as coordenadas dos centroides. Nos experimentos centrais, adota-se $H = 60$ minutos, $v = 30$ km/h e $s_i = 5$ minutos para todos os clusters.

4.4 Variáveis de Decisão

Variável	Descrição
$x_{ijk} \in \{0,1\}$	1 se o VANT k percorre o arco $(i,j) \in A_k$; 0 caso contrário.
$y_{ik} \in \{0,1\}$	1 se o VANT k visita o cluster i ; 0 caso contrário.
$z_i \in \{0,1\}$	1 se o cluster i é visitado por algum VANT; 0 caso contrário.

Variável	Descrição
$q_{ik} \geq 0$	Posição do cluster i na rota do VANT k , utilizada para eliminar subciclos.

4.5 Função Objetivo

A formulação principal maximiza a cobertura ponderada:

$$\max \sum_{i \in G} w_i z_i. \quad (4.5)$$

O valor da função objetivo corresponde à soma da criticidade dos clusters visitados. Para permitir comparação entre instâncias e cenários, utiliza-se a cobertura ponderada percentual:

$$\text{CobPond} = 100 \frac{\sum_{i \in G} w_i z_i}{\sum_{i \in G} w_i}. \quad (4.6)$$

O numerador representa a criticidade efetivamente inspecionada e o denominador representa toda a criticidade disponível entre os 158 gaps. Na configuração V3, o denominador é igual a 2.071 unidades de *combined_score*. Assim, uma cobertura de 27,18% corresponde a aproximadamente 563 unidades de criticidade inspecionadas.

4.6 Restrições

4.6.1 Saída e Retorno à Base

Cada VANT pode iniciar no máximo uma rota e, quando utilizado, deve retornar à mesma base:

$$\sum_{j \in G} x_{b_k j k} = \sum_{i \in G} x_{i b_k k} \leq 1, \quad \forall k \in K. \quad (4.7)$$

4.6.2 Conservação de Fluxo e Vínculo com a Visita

Para cada cluster e VANT, uma visita exige exatamente uma entrada e uma saída:

$$\sum_{\substack{j \in N_k \\ j \neq i}} x_{jik} = y_{ik} = \sum_{\substack{j \in N_k \\ j \neq i}} x_{ijk}, \quad \forall i \in G, \forall k \in K. \quad (4.8)$$

4.6.3 Unicidade da Visita

Cada cluster pode ser atendido por, no máximo, um VANT:

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = z_i \leq 1, \quad \forall i \in G. \quad (4.9)$$

4.6.4 Horizonte da Missão

O tempo de deslocamento, inspeção e retorno deve permanecer dentro do horizonte:

$$\sum_{(i,j) \in A_k} t_{ij} x_{ijk} + \sum_{i \in G} s_i y_{ik} \leq H, \quad \forall k \in K. \quad (4.10)$$

4.6.5 Eliminação de Subciclos

As restrições a seguir impedem ciclos desconectados da base:

$$q_{ik} - q_{jk} + |G| x_{ijk} \leq |G| - 1, \quad \forall i, j \in G, i \neq j, \forall k \in K, \quad (4.11)$$

$$y_{ik} \leq q_{ik} \leq |G| y_{ik}, \quad \forall i \in G, \forall k \in K. \quad (4.12)$$

4.6.6 Domínio

$$\begin{aligned} x_{ijk} &\in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in A_k, \forall k \in K, \\ y_{ik} &\in \{0,1\}, \quad \forall i \in G, \forall k \in K, \\ z_i &\in \{0,1\}, \quad \forall i \in G, \\ q_{ik} &\geq 0, \quad \forall i \in G, \forall k \in K. \end{aligned} \quad (4.13)$$

4.7 Relação entre a Formulação e os Métodos Implementados

A formulação estabelece o objetivo e as condições de factibilidade, mas não foi resolvida por um método exato nesta dissertação. Os algoritmos do Capítulo 5 constroem e refinam rotas que obedecem às mesmas condições operacionais: um cluster não é repetido, cada VANT parte de uma base atribuída, o tempo total inclui inspeção e retorno, e a qualidade é medida pela soma dos pesos visitados.

Consequentemente, os resultados não são apresentados como soluções ótimas e não incluem *gap* de otimalidade. A obtenção de soluções exatas ou limites por programação inteira é indicada como trabalho futuro. A escolha de heurísticas e metaheurísticas decorre do objetivo aplicado de produzir soluções factíveis, com tempo computacional reduzido nas execuções avaliadas, e permitir adaptações nos pesos, nas bases e nas restrições operacionais.

4.8 Extensão Exploratória com Horizonte Rolante

Além da missão estática, foi desenvolvido um experimento exploratório de replanejamento. O horizonte de 60 minutos é dividido em quatro janelas de $\Delta = 15$ minutos. No início de cada janela, os clusters já visitados são removidos e a criticidade pode receber um reforço dinâmico r_i^t :

$$w_i^t = \eta_i + r_i^t, \quad (4.14)$$

em que r_i^t agrega sinais temporais disponíveis, como registros Waze, detecções em câmera, registros de alagamento e chuva. O método recalcula as rotas a partir das posições correntes dos VANTs e executa apenas a primeira janela do plano antes do replanejamento seguinte.

Essa extensão não substitui a formulação estática nem os experimentos principais. Sua função é avaliar o comportamento do replanejamento diante da escassez de sinais nos próprios gaps observacionais. A implementação e seus resultados são apresentados como análise exploratória no Capítulo 6.

4.9 Hipóteses e Delimitações

A interpretação dos resultados considera as seguintes hipóteses:

1. os VANTs estão disponíveis no início da missão e possuem base previamente atribuída;
2. a velocidade é constante e o tempo de inspeção é homogêneo;
3. as rotas utilizam distância Haversine entre centroides, sem representar relevo, edificações ou corredores aéreos;
4. a chegada ao centroide é uma aproximação da inspeção do cluster e não comprova cobertura visual integral de todo o polígono;
5. não são modelados campo de visão, altitude, qualidade de imagem, comunicação, colisões entre VANTs ou capacidade de transmissão;
6. o horizonte representa um orçamento temporal de simulação e não a autonomia certificada de um modelo específico de aeronave;
7. chuva, vento, visibilidade e restrições regulatórias não integram a factibilidade computacional, embora possam impedir ou alterar uma missão real;
8. as bases são parâmetros dos cenários e não variáveis de decisão;
9. a configuração V3 soma indicadores de fontes e recortes temporais diferentes sem calibração estatística de escala; essa escolha aumenta a interpretabilidade, mas constitui ameaça à validade;
10. os resultados dos cenários A–D representam uma missão estática simulada, e não operação de campo ou integração em tempo real com o COR.rio.

5 MÉTODOS DE SOLUÇÃO

5.1 Estratégia Geral

O problema formulado no Capítulo 4 combina seleção de pontos e construção de rotas para múltiplos VANTs. Como não é necessário visitar todos os clusters, a solução deve equilibrar criticidade e esforço de deslocamento. A estratégia experimental foi organizada em três níveis:

1. **estratégias de referência:** Random e Nearest Neighbor, utilizadas para contextualizar os resultados;
2. **heurística construtiva:** Greedy MCD, que produz uma solução inicial factível orientada pela razão entre criticidade e distância;
3. **metaheurísticas de refinamento:** ILS e uma instanciação adaptada de VNS, que modificam as rotas construídas pelo Greedy para aumentar a cobertura ponderada.

As metaheurísticas foram escolhidas por oferecerem um compromisso entre qualidade, velocidade de execução e flexibilidade. Em um contexto de apoio operacional, o método deve produzir uma solução factível rapidamente e permitir mudanças em pesos, bases e parâmetros sem exigir nova formulação algorítmica a cada cenário. ILS e VNS são frameworks conhecidos de busca metaheurística [44, 45]; a contribuição desta dissertação está na instanciação e integração desses princípios ao problema de roteamento multi-VANT, e não na proposição original das metaheurísticas.

5.2 Representação e Avaliação de uma Solução

Uma solução $S = \{R_k : k \in K\}$ é formada por uma rota ordenada para cada VANT. Cada rota $R_k = (b_k, i_1, \dots, i_m, b_k)$ parte da base atribuída, visita clusters distintos e retorna à mesma base. O conjunto $V(S)$ reúne todos os clusters visitados, sem duplicação.

A qualidade da solução é:

$$f(S) = \sum_{i \in V(S)} w_i, \quad (5.1)$$

e sua cobertura ponderada é calculada pela Equação 4.6. Uma rota é factível quando:

$$\sum_{(i,j) \in R_k} t_{ij} + \sum_{i \in R_k \cap G} s_i \leq H. \quad (5.2)$$

Todas as operações de construção, inserção e troca verificam explicitamente o tempo de inspeção e o retorno à base.

5.3 Estratégias de Referência

5.3.1 Random

O baseline Random embaralha os clusters com uma semente definida e os insere nas rotas sempre que a visita e o retorno permanecem factíveis. A estratégia não utiliza criticidade nem proximidade como critério de escolha. Por isso, é empregada apenas como referência inferior, e não como contribuição algorítmica.

5.3.2 Nearest Neighbor

O Nearest Neighbor seleciona, em cada passo, o cluster factível mais próximo da posição corrente. A estratégia considera distância, mas ignora o peso w_i . Sua comparação com os métodos orientados por criticidade permite verificar se visitar mais pontos próximos implica, ou não, maior cobertura ponderada.

5.4 Heurística Construtiva Greedy MCD

A heurística de Maior Criticidade por Distância (MCD) seleciona o cluster factível que maximiza:

$$\text{score}(i) = \frac{w_i}{\max\{d_{\text{atual},i}, 0, 1\}}, \quad i \in G \setminus V(S). \quad (5.3)$$

O limite de 0,1 km evita divisão por zero ou amplificação numérica quando dois pontos estão muito próximos. O Algoritmo 1 reproduz a implementação utilizada.

Algoritmo 1 Heurística construtiva Greedy MCD

Require: clusters G , pesos w , VANTs K , bases b , horizonte H , velocidade v , inspeção s

Ensure: conjunto de rotas factíveis S

```

1:  $V \leftarrow \emptyset$ ;  $S \leftarrow \emptyset$ 
2: for all  $k \in K$  do
3:    $R_k \leftarrow (b_k)$ ;  $p \leftarrow b_k$ ;  $h \leftarrow 0$ 
4:   while existir cluster factível em  $G \setminus V$  do
5:      $F \leftarrow \{i \in G \setminus V : h + t_{pi} + s_i + t_{ib_k} \leq H\}$ 
6:     if  $F = \emptyset$  then
7:       break
8:     end if
9:      $i^* \leftarrow \arg \max_{i \in F} w_i / \max\{d_{pi}, 0, 1\}$ 
10:    adicionar  $i^*$  ao final de  $R_k$ 
11:     $h \leftarrow h + t_{pi^*} + s_{i^*}$ 
12:     $p \leftarrow i^*$ ;  $V \leftarrow V \cup \{i^*\}$ 
13:   end while
14:   adicionar o retorno  $b_k$  ao final de  $R_k$ 
15:    $S \leftarrow S \cup \{R_k\}$ 
16: end for
17: return  $S$ 

```

O Greedy MCD é rápido, mas suas escolhas são irreversíveis durante a construção. Um cluster próximo e moderadamente crítico pode ser selecionado antes de outro mais relevante, bloqueando combinações de maior valor. O custo não é constante: no pior caso, a seleção repetida examina os candidatos diversas vezes, resultando em ordem $O(|G|^2 + |K||G|)$, desconsiderando o custo constante dos cálculos de distância.

5.5 Busca Local Compartilhada

ILS e VNS utilizam a mesma busca local, composta por três operadores:

Insert: insere o cluster não visitado de maior peso na primeira posição factível encontrada;

Swap: substitui um cluster visitado por outro não visitado de peso superior, escolhendo o maior ganho factível em cada rota;

2-opt: inverte um segmento da rota quando a alteração reduz o tempo total, liberando margem para inserções posteriores.

A busca local repete os operadores até que nenhum deles produza alteração ou até atingir 40 ciclos.

Algoritmo 2 Busca local com Insert, Swap e 2-opt

Require: solução S , clusters G , bases b , horizonte H , limite $L = 40$

Ensure: solução localmente refinada

```

1: for  $r \leftarrow 1$  até  $L$  do
2:   alterou  $\leftarrow$  falso
3:   ordenar  $G \setminus V(S)$  por peso decrescente
4:   if existir inserção factível then
5:     aplicar a primeira inserção factível do cluster de maior peso
6:     alterou  $\leftarrow$  verdadeiro
7:   end if
8:   for all rotas  $R_k \in S$  do
9:     avaliar trocas entre clusters visitados e não visitados
10:    if existir troca factível com maior ganho positivo then
11:      aplicar a melhor troca em  $R_k$ 
12:      alterou  $\leftarrow$  verdadeiro
13:    end if
14:  end for
15:  for all rotas  $R_k \in S$  do
16:    if existir movimento 2-opt que reduza o tempo em mais de 0,01 min then
17:      aplicar o primeiro movimento encontrado
18:      alterou  $\leftarrow$  verdadeiro
19:    end if
20:  end for
21:  if alterou = falso then
22:    break
23:  end if
24: end for
25: return  $S$ 

```

5.6 Iterated Local Search

O ILS parte da solução Greedy já refinada pela busca local. Em cada uma das 30 iterações, remove aleatoriamente entre um e quatro clusters das rotas, reaplica a busca local e aceita somente soluções com melhora estrita de $f(S)$.

O critério ganancioso de aceitação preserva sempre a melhor solução corrente. Como consequência, a diversificação depende das remoções aleatórias, enquanto a intensificação é realizada pela busca local.

Algoritmo 3 Iterated Local Search adaptado ao roteamento multi-VANT**Require:** instância I , iterações $N = 30$, perturbação máxima $p_{\max} = 4$, semente σ **Ensure:** melhor solução encontrada S^*

```

1: inicializar o gerador pseudoaleatório com  $\sigma$ 
2:  $S \leftarrow \text{GREEDYMCD}(I)$ 
3:  $S^* \leftarrow \text{BUSCALocal}(S, I)$ 
4: for  $r \leftarrow 1$  até  $N$  do
5:   sortear  $p \in \{1, \dots, p_{\max}\}$ 
6:    $S' \leftarrow$  remover aleatoriamente  $p$  clusters de  $S^*$ 
7:    $S'' \leftarrow \text{BUSCALocal}(S', I)$ 
8:   if  $f(S'') > f(S^*)$  then
9:      $S^* \leftarrow S''$ 
10:  end if
11: end for
12: return  $S^*$ 

```

5.7 Variable Neighborhood Search Adaptado

VNS é um framework baseado na mudança sistemática de estruturas de vizinhança [45]. A implementação desta dissertação utiliza o tamanho da perturbação como estrutura de vizinhança: a vizinhança k remove aleatoriamente k clusters, com $k \in \{1, \dots, 5\}$. Após o *shaking*, aplica-se a busca local completa. Quando há melhora, a exploração retorna a $k = 1$; caso contrário, avança para uma perturbação maior.

Como a implementação combina *shaking*, busca local e mudança sistemática de k , ela é caracterizada como uma instanciação adaptada de VNS básico. Não se trata de Reduced VNS, que normalmente não executa a busca local completa após cada perturbação.

A diferença operacional entre ILS e VNS está na perturbação. O ILS sorteia livremente o número de remoções entre um e quatro em cada iteração. O VNS percorre sistematicamente perturbações de tamanho crescente e reinicia essa sequência após uma melhora.

5.8 Geração das Instâncias e Cenários

As instâncias são produzidas diretamente a partir das bases descritas no Capítulo 3:

1. calculam-se os centroides dos 158 clusters sem câmera;
2. atribui-se $w_i = \ell_i$ na V2 ou $w_i = \eta_i$ na V3;
3. calculam-se as distâncias Haversine;

Algoritmo 4 VNS adaptado ao roteamento multi-VANT**Require:** instância I , $k_{\max} = 5$, ciclos externos $N = 25$, semente σ **Ensure:** melhor solução encontrada S^*

```

1: inicializar o gerador pseudoaleatório com  $\sigma$ 
2:  $S \leftarrow \text{GREEDYMCD}(I)$ 
3:  $S^* \leftarrow \text{BUSCALOCAL}(S, I)$ 
4: for  $r \leftarrow 1$  até  $N$  do
5:    $k \leftarrow 1$ 
6:   while  $k \leq k_{\max}$  do
7:      $S' \leftarrow$  remover aleatoriamente  $k$  clusters de  $S^*$ 
8:      $S'' \leftarrow \text{BUSCALOCAL}(S', I)$ 
9:     if  $f(S'') > f(S^*)$  then
10:       $S^* \leftarrow S''$ ;  $k \leftarrow 1$ 
11:   else
12:      $k \leftarrow k + 1$ 
13:   end if
14: end while
15: end for
16: return  $S^*$ 

```

4. atribuem-se as bases e os VANTs de cada cenário;
5. fixam-se horizonte, velocidade e tempo de inspeção.

Tabela 8: Bases Operacionais de VANTs

Base	Localização	Coordenadas	Cenários
COR_Centro	COR.rio, Cidade Nova	(−22,9122, − 43,2033)	A, B, C, D
Zona_Norte	2º GBM, Méier	(−22,8995, − 43,2777)	C, D
Zona_Oeste	13º GBM, Campo Grande	(−22,9071, − 43,5626)	C, D
Zona_Sul	1º GBM Marítimo, Urca	(−22,9489, − 43,1788)	D
Ilha_Gov	CB Ilha do Governador	(−22,8075, − 43,1975)	D

Os cenários A, B, C e D utilizam, respectivamente, 1, 2, 3 e 5 VANTs. A e B concentram os recursos na base COR; C distribui os VANTs entre Centro, Zona Norte e Zona Oeste; D utiliza as cinco bases.

5.9 Procedimento Experimental

O procedimento completo é apresentado no Algoritmo 5. Random, Nearest, Greedy, ILS e VNS são executados nos quatro cenários. Para ILS e VNS, a análise multi-semente é

realizada no Cenário D com as sementes $\{42,123,456,789,2024\}$.

Algoritmo 5 Execução dos cenários e análise multi-semente

Require: dados de clusters, câmeras e ocorrências; cenários $\mathcal{C} = \{A, B, C, D\}$

Ensure: resultados consolidados por método e cenário

```

1: construir  $G$  com os 158 clusters sem câmera
2: for all configurações  $m \in \{V2, V3\}$  do
3:   calcular os pesos  $w_i^m$ 
4:   for all cenários  $c \in \mathcal{C}$  do
5:     executar Greedy MCD, ILS e VNS
6:     if  $m = V3$  then
7:       executar também Random e Nearest
8:     end if
9:     calcular cobertura ponderada, visitas, distância e resposta média
10:   end for
11: end for
12: for all  $\sigma \in \{42,123,456,789,2024\}$  do
13:   executar ILS e VNS no Cenário D com pesos V3
14: end for
15: calcular média, desvio padrão, mínimo e máximo
16: return resultados consolidados

```

5.10 Métricas e Reprodutibilidade

As métricas registradas são:

Cobertura ponderada: proporção da criticidade visitada, conforme a Equação 4.6;

Clusters visitados: quantidade de alvos distintos incluídos nas rotas;

Top-50 visitados: quantidade de clusters do subconjunto descritivo Top-50 alcançados;

Distância total: soma das distâncias estimadas de todos os VANTs, incluindo retorno;

Resposta média: média dos tempos acumulados de chegada aos clusters;

Tempo computacional: tempo de execução registrado pelo pipeline;

Variabilidade multi-semente: média, desvio padrão, mínimo e máximo nas cinco sementes avaliadas.

Os parâmetros adotados são escolhas experimentais e não resultam de calibração sistemática. O Greedy é determinístico; Random, ILS e VNS utilizam gerador pseudoaleatório

controlado por semente. O código reutiliza o campo interno *label_count* para armazenar o peso V3 durante a execução, mas, nessa configuração, o conteúdo do campo é substituído por *combined_score*. Essa decisão de implementação não altera a definição conceitual do peso.

5.11 Papel da Formulação e Ausência de Solver

O modelo matemático foi utilizado para definir objetivo, variáveis, factibilidade e métricas. O escopo experimental concentrou-se em métodos heurísticos capazes de produzir respostas rápidas e adaptáveis. Não foi executado solver de programação inteira, nem foi conduzida comparação com soluções ótimas ou limites inferiores. Portanto, a dissertação avalia ganhos relativos entre os métodos implementados, sem afirmar otimalidade.

A validação futura por solver em instâncias reduzidas, bem como a calibração sistemática dos parâmetros de ILS e VNS, permitirá medir *gaps* de otimalidade e separar o efeito das escolhas paramétricas do efeito das estruturas de busca.

6 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

6.1 Protocolo Experimental

Os experimentos avaliam o efeito da estratégia de despacho, da quantidade de VANTs e da distribuição das bases sobre a cobertura dos 158 clusters sem câmera. A configuração V3, baseada na criticidade operacional enriquecida, constitui a análise principal. A configuração V2 é mantida como etapa intermediária para documentar a evolução da métrica e permitir comparação com os primeiros experimentos.

O protocolo foi composto pelas seguintes etapas:

1. seleção do dia com maior atividade global na série temporal;
2. utilização dos 158 clusters gap como alvos potenciais, independentemente de estarem ativos no dia;
3. execução dos cenários A–D com Greedy MCD;
4. comparação com Random e Nearest na V3;
5. refinamento das soluções Greedy por ILS e VNS;
6. análise multi-semente de ILS e VNS no Cenário D;
7. análise de sensibilidade do horizonte e da velocidade;
8. experimento exploratório de horizonte rolante.

Todos os métodos e parâmetros algorítmicos são descritos no Capítulo 5. Não foi utilizado solver exato; por isso, os resultados representam comparações entre os métodos implementados e não incluem garantia ou *gap* de otimalidade.

6.2 Seleção do Dia de Referência

O dia de referência foi selecionado pelo número de registros em todos os clusters. Esse critério evita escolher o evento com base apenas nos gaps, que possuem menor observabilidade justamente por não terem câmera fixa.

Tabela 9: Top 10 Dias por Atividade Global (Todos os Clusters)

Rank	Dia	Registros	Clusters ativos
1	27/08/2023	558	27
2	29/05/2023	343	19
3	09/12/2023	302	28
4	14/08/2023	300	13
5	07/10/2023	278	25
6	26/10/2023	272	33
7	20/08/2023	230	27
8	15/11/2023	210	18
9	13/01/2024	205	21
10	14/10/2023	199	12

O dia 27 de agosto de 2023 concentrou 558 registros em 27 clusters, valor 63% superior ao segundo colocado. Os 27 clusters ativos caracterizam o contexto do evento, mas não limitam os destinos possíveis. Todos os 158 gaps permanecem como alvos porque, durante uma ocorrência real, a ausência de câmera impede conhecer previamente quais pontos cegos estão ativos.

Os cenários utilizam horizonte de 60 minutos, velocidade média de 30 km/h e tempo de inspeção de 5 minutos. A, B, C e D possuem, respectivamente, 1, 2, 3 e 5 VANTs, conforme as bases da Tabela 8.

6.3 Configuração V2 como Etapa Intermediária

6.3.1 Greedy MCD

Na V2, o peso w_i corresponde ao *label_count*. A Tabela 10 apresenta os resultados do Greedy MCD.

Tabela 10: Resultados dos Cenários de Despacho — Greedy MCD, configuração V2 com *label_count* (Evento: 27/08/2023, 158 alvos)

Cen.	Configuração	VANTs	Visitados	Cob. (%)	Dist. (km)	Resp. (min)
A	Base COR	1	4	5,51	19,90	20,84
B	Base COR	2	8	10,35	39,63	22,66
C	Bases distribuídas	3	11	21,27	59,33	27,72
D	Bases estratégicas	5	22	32,00	89,81	27,34

O aumento de A para B adiciona capacidade na mesma região. A mudança de B para C acrescenta uma base em nova área e produz o maior ganho da V2 por VANT adicional. A passagem de C para D amplia simultaneamente a frota e a cobertura territorial; portanto, seu efeito não pode ser atribuído somente à quantidade de aeronaves.

Tabela 11: Ganho Marginal por VANT Adicional (Greedy MCD)

Transição	Δ visitas	Δ cobertura	Ganho por VANT
A $\rightarrow$ B: mesma base	+4	+4,84 pp	4,84 pp
B $\rightarrow$ C: nova base	+3	+10,92 pp	10,92 pp
C $\rightarrow$ D: duas novas bases	+11	+10,73 pp	5,37 pp

Esses valores descrevem transições que alteram quantidade de VANTs e, em C e D, localização das bases. Assim, são indicadores de cenário, não estimativas causais isoladas do valor de cada VANT.

6.3.2 Refinamento por ILS e VNS

ILS e VNS partem da solução Greedy e utilizam os operadores Insert, Swap e 2-opt descritos no Capítulo 5. A Tabela 12 mostra que a principal melhoria V2 ocorreu no Cenário C.

Tabela 12: Comparação de Algoritmos na configuração V2: Greedy $\times$ ILS $\times$ VNS (158 gaps, 27/08/2023)

Cen.	VANTs	Greedy	ILS	VNS	Δ ILS	Δ VNS
A	1	5,51	7,79	7,79	+2,28 pp	+2,28 pp
B	2	10,35	10,35	10,35	0,00 pp	0,00 pp
C	3	21,27	24,50	24,50	+3,23 pp	+3,23 pp
D	5	32,00	33,71	33,81	+1,71 pp	+1,81 pp

Tabela 13: Clusters Visitados: Greedy $\times$ ILS $\times$ VNS

Cenário	Greedy	ILS	VNS
A	4	4	4
B	8	8	8
C	11	10	10
D	22	21	19

O resultado central é que maior cobertura ponderada não exige maior número de visitas. No Cenário D, por exemplo, o VNS visita 19 clusters, contra 22 do Greedy, mas aumenta a cobertura. O operador Swap substitui pontos de menor peso por alvos mais críticos e factíveis. Os tempos abaixo de 10 segundos observados nessa execução V2 representam tempo computacional reduzido na execução avaliada, mas não constituem garantia de desempenho em infraestrutura operacional.

6.4 Configuração Principal V3

6.4.1 Criticidade Operacional Enriquecida

Na V3, o peso passa a ser:

$$w_i = \eta_i = \ell_i + \gamma_i, \quad i \in G, \quad (6.1)$$

conforme definido no Capítulo 4. O denominador da cobertura ponderada passa de 1.053 unidades na V2 para 2.071 unidades na V3. Os parâmetros de rota e os operadores permanecem inalterados.

6.4.2 Comparação dos Métodos

A Tabela 14 organiza os métodos segundo sua função experimental: estratégias de referência, heurística construtiva e metaheurísticas de refinamento. Essa separação evita apresentar Random como contribuição algorítmica e evidencia a narrativa que conduz do baseline à busca refinada.

Tabela 14: Cobertura Ponderada (%) por algoritmo e cenário, V3 com combined_score

Cen.	VANTs	Referências		Construtiva	Metaheurísticas	
		Random	Nearest	Greedy	ILS	VNS
A	1	2,27	3,33	7,77	8,31	8,31
B	2	3,14	6,95	11,40	12,60	13,42
C	3	6,76	7,05	14,58	15,45	17,62
D	5	8,02	19,56	23,32	27,18	27,18

Tabela 15: Clusters visitados por algoritmo e cenário, V3

Cen.	VANTs	Random	Nearest	Greedy	ILS	VNS
A	1	5	6	4	2	2
B	2	7	13	11	11	6
C	3	8	17	11	12	8
D	5	12	30	22	19	18

No Cenário D, a melhor execução de ILS e VNS alcança 27,18%, contra 23,32% do Greedy, ganho de 3,86 pontos percentuais. No Cenário C, o VNS alcança 17,62%, ganho de 3,04 pontos percentuais. B e A apresentam ganhos de 2,02 e 0,54 pontos percentuais, respectivamente.

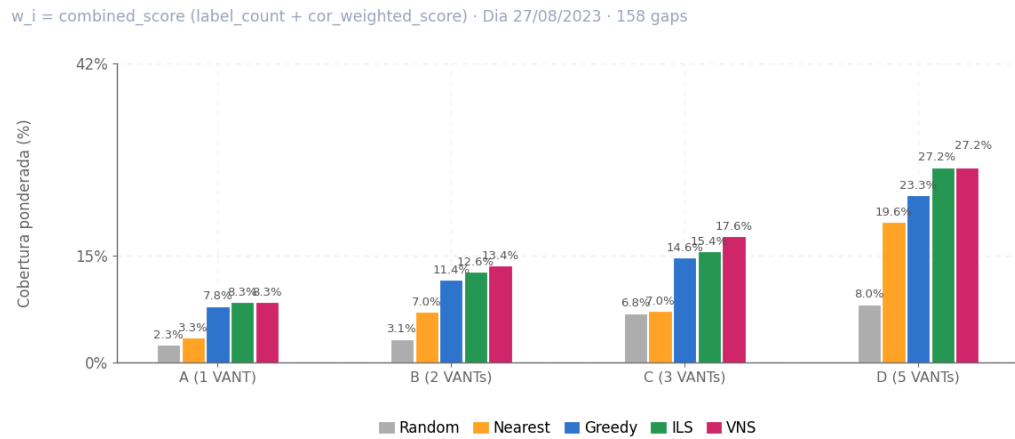


Figura 8: Cobertura ponderada (%) dos cinco algoritmos nos quatro cenários da configuração V3.

Fonte: Elaboração própria, a partir dos experimentos da pesquisa e do dashboard *Rio Flood Coverage*.

Essas diferenças delimitam a contribuição efetiva das metaheurísticas: elas refinam a composição das rotas iniciais e ampliam a criticidade visitada nas instâncias avaliadas. Não se afirma que ILS ou VNS são algoritmos novos, nem que as soluções obtidas são ótimas.

O Nearest evidencia a diferença entre quantidade e qualidade. No Cenário D, visita 30 clusters, mas cobre 19,56% da criticidade; o VNS visita 18 e alcança 27,18%.

Nos cenários avaliados, a hierarquia observada foi $VNS \geq ILS > Greedy > Nearest > Random$, com empate entre ILS e VNS em A e D. Essa hierarquia descreve exclusivamente as instâncias e os parâmetros testados.

6.4.3 V2 e V3

Tabela 16: Impacto da mudança da métrica de criticidade: Greedy V2 (label_count) $\times$ Greedy V3 (combined_score)

Cenário	Greedy V2	Greedy V3	Variação
A	5,51%	7,77%	+2,26 pp
B	10,35%	11,40%	+1,05 pp
C	21,27%	14,58%	−6,69 pp
D	32,00%	23,32%	−8,68 pp

Nearest visita mais clusters (33 no Cen. D), mas alcança cobertura menor que o Greedy (22 clusters)

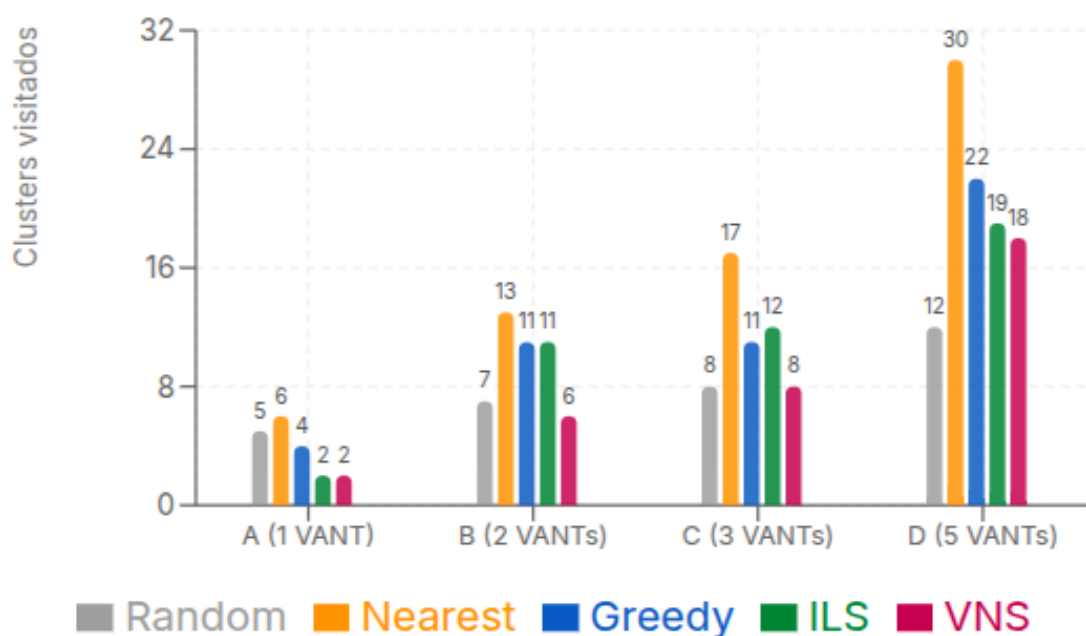


Figura 9: Relação entre número de clusters visitados e cobertura ponderada dos algoritmos na configuração V3.

Fonte: Elaboração própria, a partir dos experimentos da pesquisa e do dashboard Rio Flood Coverage.

Os percentuais V2 e V3 não medem a mesma massa de criticidade. A V3 altera pesos, ranking e denominador; portanto, uma redução percentual não representa necessariamente piora da rota. A comparação documenta a sensibilidade dos resultados à definição de criticidade. A V3 é adotada nas conclusões por incorporar as ocorrências operacionais ponderadas por gravidade, embora sua soma aditiva sem calibração de escala seja registrada como limitação.

6.4.4 Cobertura Alcançada

Na V3, 27,18% corresponde a aproximadamente 563 das 2.071 unidades de criticidade. Mesmo a melhor execução cobre apenas uma fração do total no horizonte de 60 minutos. O resultado evidencia que posicionamento de bases, duração da missão e condições de voo permanecem determinantes, independentemente do método de refinamento.

6.5 Análise Multi-Semente

ILS e VNS foram executados com as sementes {42,123,456,789,2024} no Cenário D. A análise mede a variabilidade estocástica observada nessa configuração; cinco sementes não constituem validação estatística ampla ou demonstração de robustez operacional.

Tabela 17: Cobertura ponderada (%) em cinco sementes, Cenário D

Algoritmo	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
ILS	25,17%	1,14 pp	24,34%	27,18%
VNS	26,70%	1,08 pp	24,77%	27,18%

Tabela 18: Clusters visitados em cinco sementes, Cenário D

Algoritmo	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
ILS	21,2	1,30	19	22
VNS	18,8	1,79	18	22

O VNS obteve média 1,53 ponto percentual superior à do ILS e apresentou desvio

semelhante. Comparado ao Greedy determinístico de 23,32%, o ganho médio do VNS foi de 3,38 pontos percentuais e o ganho médio do ILS foi de 1,85 ponto percentual. A faixa observada mostra que as escolhas pseudoaleatórias afetam o resultado, embora todas as execuções tenham permanecido acima do Greedy no Cenário D.

6.6 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade utiliza a configuração V3 e o Greedy MCD no Cenário C. Foram combinados horizontes de 30, 60 e 90 minutos com velocidades de 20, 30 e 50 km/h.

Tabela 19: Análise de Sensibilidade: Horizonte $\times$ Velocidade (3 VANTs, Greedy MCD, 158 gaps)

Horizonte	Velocidade	Clusters	Cobertura
30 min	20 km/h	6	2,95%
30 min	30 km/h	7	4,30%
30 min	50 km/h	8	7,68%
60 min	20 km/h	11	10,28%
60 min	30 km/h	11	14,58%
60 min	50 km/h	15	29,50%
90 min	20 km/h	13	17,29%
90 min	30 km/h	18	31,14%
90 min	50 km/h	24	39,11%

No cenário de 30 km/h, a cobertura cresce de 4,30% para 14,58% e 31,14% quando o horizonte passa de 30 para 60 e 90 minutos. Para 90 minutos, a variação de 20 para 50 km/h eleva a cobertura de 17,29% para 39,11%. Esses resultados mostram forte sensibilidade às hipóteses operacionais.

A combinação de 90 minutos e 50 km/h é apenas a configuração de maior desempenho entre as testadas. Ela não é denominada ótima e pode ser incompatível com autonomia, chuva, vento, regulamentação ou características de uma aeronave real. A configuração de 60 minutos e 30 km/h é utilizada como referência moderada de simulação, não como capacidade certificada.

Sensibilidade: Horizonte × Velocidade (3 VANTs, Greedy)

Melhor combinação: 90 min / 50 km/h → 39,11% · 24 clusters

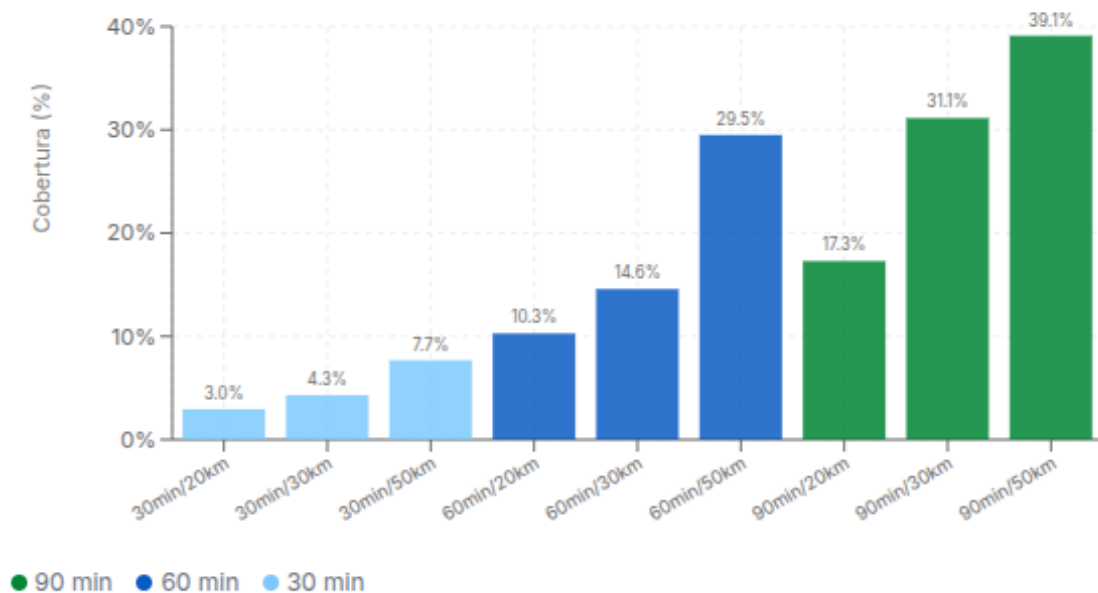


Figura 10: Análise de sensibilidade da cobertura ponderada em função do horizonte de missão e da velocidade dos VANTs.

Fonte: Elaboração própria, a partir dos experimentos da pesquisa e do dashboard Rio Flood Coverage.

6.7 Interpretação Operacional

Os resultados sustentam três observações:

1. bases distribuídas ampliam o alcance territorial, mas os cenários avaliados não isolam estatisticamente os efeitos da localização das bases e da quantidade de VANTs;
2. métodos orientados por criticidade cobrem mais peso do que estratégias baseadas apenas em aleatoriedade ou proximidade;
3. ILS e VNS podem refinar as rotas iniciais com tempo computacional reduzido nas execuções avaliadas, mas a adoção operacional requer validação de campo e integração com restrições reais.

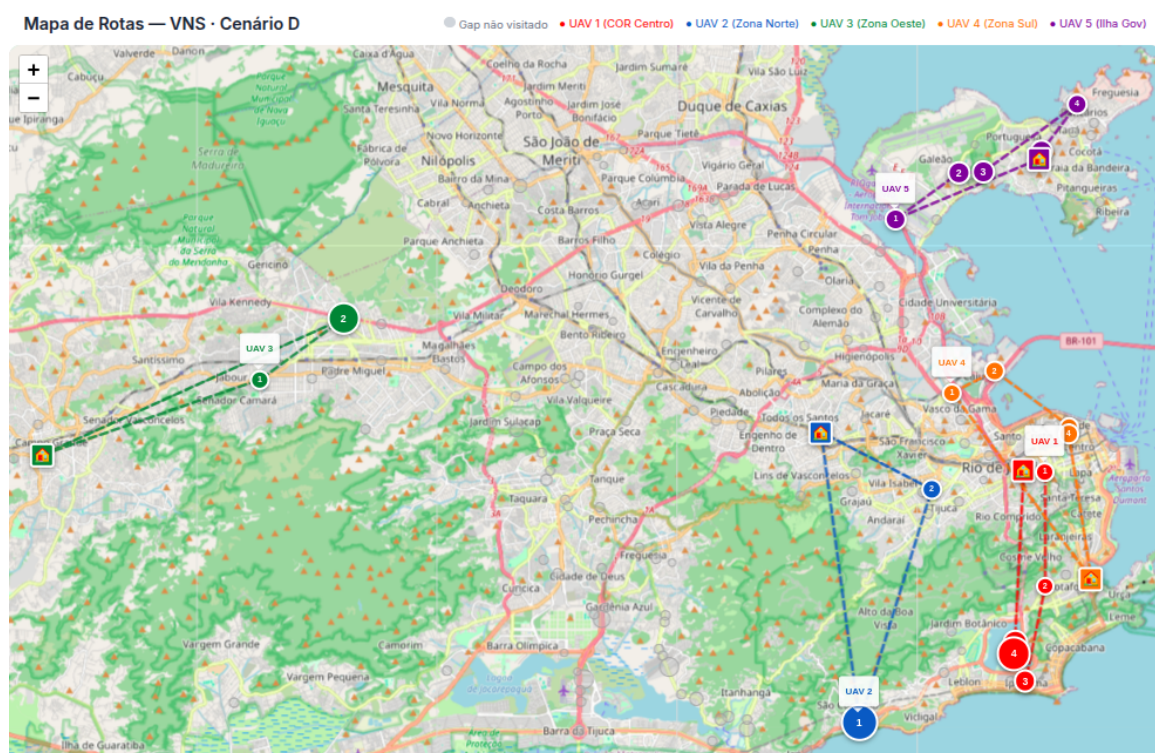


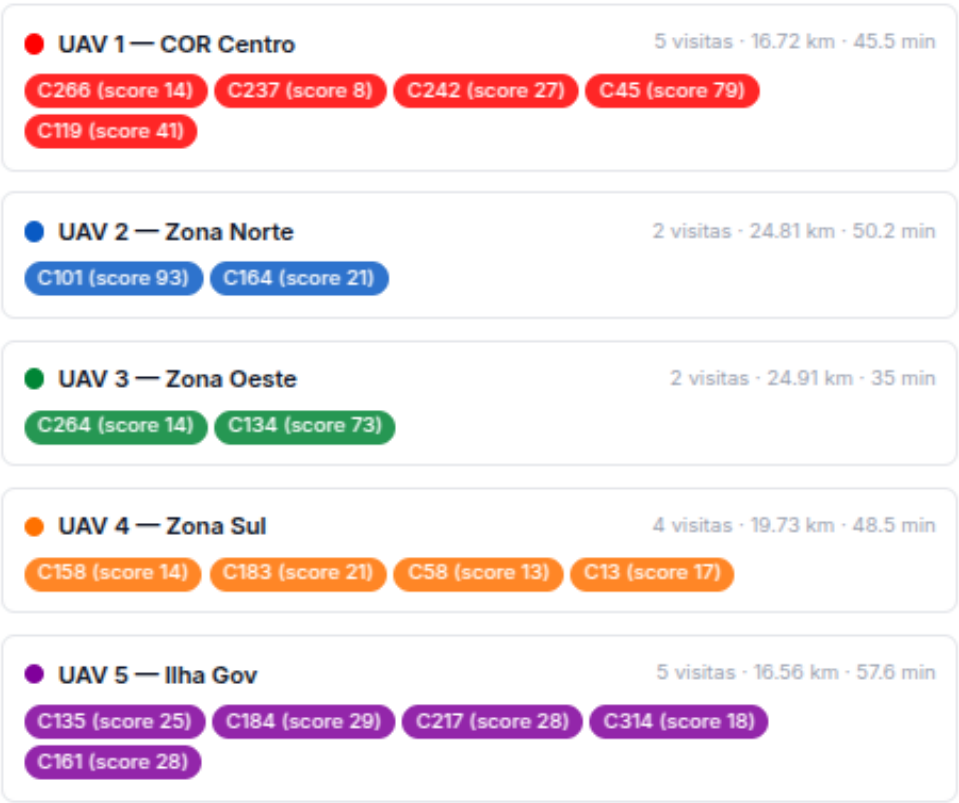
Figura 11: Distribuição espacial das rotas geradas pelo algoritmo VNS no Cenário D, com cinco VANTs partindo de bases distribuídas.

Fonte: *Elaboração própria, a partir dos experimentos da pesquisa e do dashboard Rio Flood Coverage.*

Base cartográfica: *OpenStreetMap.*

As figuras demonstram que a saída do método pode ser apresentada como plano de inspeção: cada VANT recebe uma sequência, uma distância e um tempo estimado. Essa representação é adequada a um sistema de apoio à decisão, mas não equivale a plano de voo autorizado ou rota executável sem validações adicionais.

Detalhamento por VANT



Horizonte: 60 min · Velocidade: 30 km/h · Visita: 5 min/cluster · w_i = combined_score

Figura 12: Detalhamento das rotas por VANT no Cenário D, com quantidade de visitas, distância total, tempo estimado de missão e clusters selecionados.

Fonte: Elaboração própria, a partir dos experimentos da pesquisa e do dashboard Rio Flood Coverage.

6.8 Limitações e Ameaças à Validade

As principais limitações dos experimentos são:

1. **evento de referência único:** os cenários A–D utilizam o dia 27/08/2023; outros eventos podem produzir distribuição de prioridades diferente;
2. **ausência de benchmark exato:** não foram calculadas soluções ótimas ou limites por solver;
3. **calibração limitada:** números de iterações, perturbações e vizinhanças são escolhas experimentais, sem busca sistemática de parâmetros;
4. **amostra estocástica reduzida:** a análise utiliza cinco sementes somente no Cenário D;
5. **críticidade aditiva:** *label_count* e *cor_weighted_score* provêm de fontes e períodos diferentes e são somados sem normalização estatística;
6. **distância e espaço aéreo:** Haversine ignora relevo, edificações, aeródromos, heli-pontos, áreas restritas e corredores seguros;
7. **campo de visão:** visitar o centroide é uma proxy de inspeção e não garante varredura visual integral do polígono;
8. **capacidade da aeronave:** velocidade, horizonte e tempo de inspeção não estão vinculados a um modelo certificado de VANT ou carga embarcada;
9. **meteorologia:** chuva, vento e visibilidade não entram na factibilidade. Em operação real, as mesmas condições associadas ao alagamento podem impedir a decolagem ou reduzir autonomia e qualidade das imagens;
10. **operação simulada:** não houve voo de campo, integração em tempo real ou validação das rotas por operadores do COR.rio.

Essas limitações impedem interpretar os percentuais como desempenho garantido. O resultado é uma evidência computacional sobre priorização e roteamento sob as hipóteses declaradas.

6.9 Experimento Exploratório com Horizonte Rolante

O experimento de horizonte rolante utiliza o Cenário D, quatro janelas de 15 minutos e a configuração V3. No início de cada janela, os pesos podem receber o reforço:

$$\text{boost}(i,t) = 2 \text{ waze}_{i,t} + 3 \text{ camera}_{i,t} + 2 \text{ alagamento}_{i,t} + \mathbb{I}[\text{chuva}_{i,t} > 5 \text{ mm}]. \quad (6.2)$$

Os coeficientes são escolhas exploratórias e não foram calibrados. Apenas 1 dos 158 gaps, o Cluster 11, recebeu reforço dinâmico no recorte analisado.

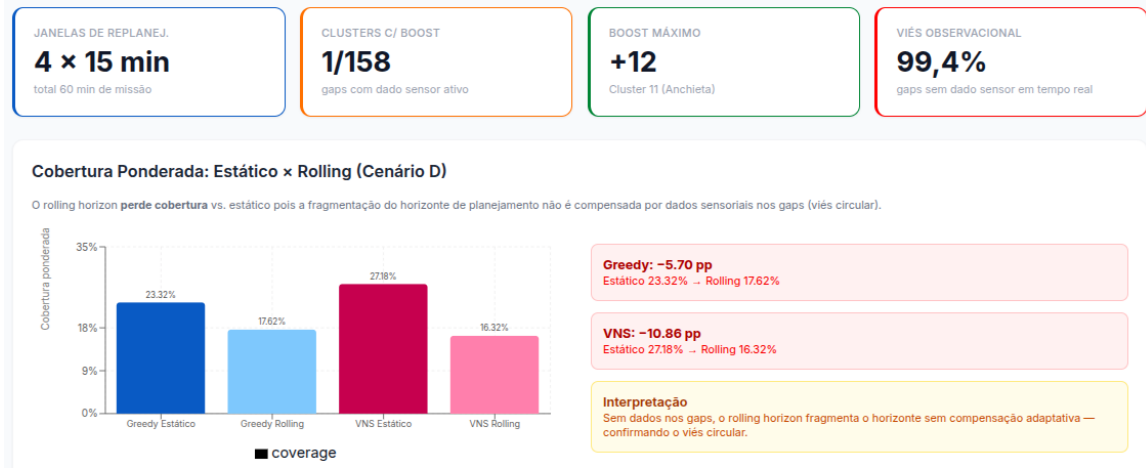


Figura 13: Experimento exploratório de horizonte rolante com replanejamento em quatro janelas de 15 minutos.

Fonte: Elaboração própria, a partir dos experimentos da pesquisa e do dashboard Rio Flood Coverage.

Tabela 20: Rolling Horizon vs. Simulação Estática (Cenário D, 27/08/2023)

Alg.	Modo	Clusters	Cob.	W1	W2	W3	W4	Δ
Greedy	Estático	22	23,32%	5	8	7	2	—
Greedy	Rolling	21	17,62%	5	3	8	5	-5,70 pp
VNS	Estático	18	27,18%	1	6	6	5	—
VNS	Rolling	17	16,32%	1	4	7	5	-10,86 pp

W1–W4 indicam as visitas executadas em cada janela. Sem informação nova suficiente, a fragmentação do horizonte reduziu a cobertura em relação ao planejamento estático. O resultado não demonstra que o horizonte rolante é inadequado de forma geral;

mostra que, neste recorte, o replanejamento teve pouco sinal dinâmico para compensar a perda de visão global da missão.

O achado expõe um viés de observação circular: os locais sem câmera são também os que menos geram sinais automáticos para repriorização. O uso operacional de horizonte rolante dependeria de fontes adicionais, como relatos georreferenciados, pluviômetros próximos, sensores móveis ou confirmação das primeiras visitas.

Os resultados deste capítulo foram consolidados no dashboard web descrito no Apêndice A. O painel é um artefato de visualização e apoio à interpretação, não um experimento adicional.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

7.1 Síntese dos Resultados

Esta dissertação propôs e avaliou uma abordagem de apoio à decisão para o despacho de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) como sensores móveis complementares à infraestrutura fixa do COR.rio, com foco na redução de pontos cegos operacionais em eventos de alagamento urbano no Rio de Janeiro.

A análise geoespacial da infraestrutura de monitoramento revelou que 158 dos 344 clusters críticos de alagamento, correspondentes a 45,9% do total, não possuem cobertura por videomonitoramento fixo. Esse resultado evidencia a existência de uma lacuna observacional sistemática: mesmo em uma cidade com ampla rede de câmeras, uma parcela relevante das áreas críticas permanece sem confirmação visual direta durante eventos de chuva intensa.

A partir desse diagnóstico, a dissertação formalizou o problema estático de despacho de múltiplos VANTs como uma variante de roteamento com restrições de tempo, bases operacionais e retorno. Uma extensão exploratória introduziu atualização de prioridades em horizonte rolante. A configuração principal dos experimentos adotou o `combined_score` como métrica oficial de criticidade, combinando frequência histórica dos registros e gravidade operacional das ocorrências COR. Essa escolha permitiu priorizar não apenas os clusters mais frequentes, mas aqueles com maior relevância operacional composta.

Os experimentos demonstraram que estratégias orientadas por criticidade superam abordagens aleatórias ou baseadas exclusivamente em proximidade. No Cenário D, com 5 VANTs distribuídos em bases estratégicas, o Greedy MCD atingiu 23,32% de cobertura ponderada, enquanto ILS e VNS alcançaram até 27,18%. O baseline Nearest Neighbor, embora tenha visitado 30 clusters, obteve apenas 19,56% de cobertura ponderada, evidenciando que maximizar o número de visitas não equivale a maximizar a cobertura operacionalmente relevante.

A análise multi-semente registrou, nas cinco sementes avaliadas, médias de $25,17\% \pm 1,14$ ponto percentual para ILS e $26,70\% \pm 1,08$ ponto percentual para VNS no Cenário D. Essa amostra permite observar a variabilidade nessa configuração, mas não caracteriza robustez estatística ampla. A análise de sensibilidade mostrou que, nas configurações simuladas, o aumento do horizonte de missão e da velocidade de voo ampliou a cobertura alcançável: com 90 minutos de horizonte e velocidade de 50 km/h, 3 VANTs distribuídos cobrem 24 clusters e 39,11% da cobertura ponderada total.

O experimento exploratório com horizonte rolante mostrou que a reotimização em janelas curtas depende criticamente da disponibilidade de dados atualizados nos próprios clusters sem câmera. Quando poucos sinais em tempo real estão disponíveis nos pontos cegos, a fragmentação do horizonte pode reduzir a cobertura em relação a uma solução estática bem otimizada. Esse resultado reforça que a ausência de videomonitoramento fixo não é apenas uma limitação visual, mas também uma limitação informacional para algoritmos dinâmicos de apoio à decisão.

7.2 Resposta à Pergunta de Pesquisa

A pergunta de pesquisa proposta na Introdução indagava:

Como transformar a infraestrutura fixa de monitoramento urbano, a base histórica de eventos de alagamento e os registros operacionais do COR.rio em um sistema de apoio à decisão capaz de posicionar e rotear VANTs para complementar a cobertura observacional das áreas críticas sem câmera e, de forma exploratória, avaliar o replanejamento em horizonte rolante?

Esta dissertação contribui para essa resposta com três elementos concretos:

1. **Método de identificação e priorização de gaps:** a análise combinada de cobertura de câmeras ($n_cameras = 0$) e criticidade operacional enriquecida ($combined_score$) produz uma lista ranqueada de alvos para despacho de VANTs, diretamente derivada dos dados históricos e operacionais do COR.rio. O $label_count$ é utilizado como componente histórico da métrica, enquanto o $cor_weighted_score$ incorpora a gravidade das ocorrências operacionais.

2. **Formulação do problema de otimização:** o problema principal foi formalizado como uma variante estática de roteamento multi-VANT, com conjuntos, parâmetros, variáveis e restrições explícitas. O horizonte rolante foi avaliado separadamente como extensão exploratória.
3. **Evidência experimental:** a simulação com dados reais (27/08/2023, 158 gaps) mostrou que, com 5 VANTs e bases estratégicas, os métodos avaliados inspecionaram 18–22 clusters e alcançaram aproximadamente 23–27% de cobertura ponderada pelo `combined_score` em 60 minutos. ILS e VNS superaram o Greedy MCD nos cenários não saturados. Em cinco sementes no Cenário D, foram observadas as médias de 25,17% $\pm$ 1,14 pp para ILS e 26,70% $\pm$ 1,08 pp para VNS; essa amostra caracteriza a variabilidade observada, não robustez estatística ampla.

7.3 Contribuições da Dissertação

A dissertação apresenta contribuições em cinco dimensões principais, além de desdobramentos científicos e institucionais associados à trajetória da linha de pesquisa:

7.3.1 Contribuição Metodológica

Formalização de um problema de priorização e roteamento estático de múltiplos VANTs para cobertura complementar em eventos de alagamento urbano, acompanhada de uma extensão exploratória em horizonte rolante. A formulação integra dados reais de cobertura, criticidade histórica e criticidade operacional enriquecida, definindo função objetivo de maximização de cobertura ponderada e restrições operacionais explícitas.

7.3.2 Contribuição Aplicada

Desenvolvimento de uma abordagem para apoiar o planejamento de centros de monitoramento urbano, com evidências simuladas sobre posicionamento de bases, dimensionamento de frota, horizonte de missão e escolha de algoritmos de despacho. Sua adoção operacional depende de validação técnica, regulatória e de campo no contexto do COR.rio.

7.3.3 Contribuição Empírica

Integração de quatro conjuntos de dados reais associados ao COR.rio: (1) 344 clusters críticos georreferenciados; (2) inventário de 4.163 câmeras com atribuição espacial; (3) 5.971 registros temporais de eventos de alagamento, dos quais foram inferidos 276 episódios; e (4) 4.532 ocorrências operacionais com cobertura de 9 anos (2015–2024).

O cruzamento espacial ponto-em-polígono revelou que todos os 158 clusters sem cobertura por videomonitoramento fixo possuem histórico operacional confirmado. A simulação de 4 cenários $\times$ 5 algoritmos (Random, Nearest Neighbor, Greedy MCD, ILS e VNS), associada à análise multi-semente, produz evidência empírica comparável e auditável em nível metodológico, a partir dos parâmetros, tabelas agregadas e procedimentos descritos.

7.3.4 Contribuição Estratégica

Construção de uma ponte conceitual entre cidades inteligentes, gestão de risco climático, sensoriamento operacional e Pesquisa Operacional aplicada. A dissertação demonstra que a integração dessas áreas produz insights acionáveis que não emergiriam de nenhuma delas isoladamente, reforçando o papel da otimização combinatória como componente da inteligência operacional urbana.

7.3.5 Contribuição Técnica

Desenvolvimento de um dashboard web interativo para visualização dos resultados da dissertação, permitindo a interpretação espacial dos clusters críticos, dos gaps observacionais, das bases operacionais, das rotas dos VANTs e do desempenho comparado dos algoritmos. O painel funciona como artefato complementar de comunicação científica e como protótipo de apoio à decisão, tornando os resultados da pesquisa acessíveis a gestores e operadores sem necessidade de execução direta de código.

7.3.6 Desdobramentos Científicos e Institucionais da Linha de Pesquisa

Além das contribuições metodológicas, empíricas, técnicas e aplicadas, a linha de pesquisa associada a esta dissertação foi apresentada, discutida e reconhecida em diferentes ambientes acadêmicos, institucionais e de inovação. Esses registros não substituem a validação científica realizada por meio da formulação do problema, dos experimentos computacionais e da análise dos resultados, mas reforçam a relevância aplicada do tema investigado.

A trajetória inclui trabalhos apresentados no SBPO 2023 [7] e no SBPO 2024 [1], nos quais foram desenvolvidas as ferramentas iniciais de monitoramento de alagamentos, integração de dados urbanos, câmeras, Waze e pluviômetros. Esses trabalhos antecedem e sustentam a presente dissertação, que amplia o escopo da linha de pesquisa ao incorporar a priorização e o roteamento de VANTs como sensores móveis complementares à infraestrutura fixa do COR.rio.

A solução também recebeu reconhecimentos em iniciativas de inovação e cidades inteligentes, incluindo o Connected Smart Cities 2023, a Firjan IEL e a menção no Catálogo de Iniciativas Climáticas Urbanas no Brasil [49]. O catálogo, publicado em 2025, reúne iniciativas urbanas voltadas à adaptação, mitigação e fortalecimento da resiliência climática nas cidades brasileiras. Nesse contexto, a menção à iniciativa reforça sua aderência à agenda de monitoramento urbano, inteligência operacional e adaptação climática.

A presença da linha de pesquisa em eventos, ambientes institucionais e iniciativas de inovação indica que o problema investigado possui aderência prática e institucional. Essa trajetória complementa os resultados experimentais da dissertação ao demonstrar que a solução foi discutida em contextos externos ao ambiente estritamente acadêmico, contribuindo para o desenvolvimento de conhecimento aplicado em cidades inteligentes, monitoramento urbano e apoio à decisão operacional.

7.4 Escopo de Validade e Limitações da Pesquisa

Como toda pesquisa aplicada baseada em dados reais, modelagem matemática e simulação computacional, os resultados desta dissertação devem ser interpretados à luz do escopo de validade do estudo. As limitações identificadas não invalidam os achados, mas delimitam o contexto em que eles podem ser corretamente compreendidos e utilizados para apoiar decisões operacionais.

7.4.1 Validade dos Dados

A base empírica utilizada nesta dissertação combina quatro conjuntos de dados associados ao COR.rio: clusters críticos georreferenciados, inventário de câmeras, registros temporais de eventos e ocorrências operacionais históricas. Apesar da robustez dessa integração, os dados apresentam limitações inerentes a sistemas operacionais reais.

O conjunto temporal de registros cobre o período de abril de 2023 a janeiro de 2024,

não representando, portanto, toda a variabilidade sazonal e interanual dos eventos de alagamento no Rio de Janeiro. Além disso, áreas sem cobertura por câmera tendem a gerar menos registros automatizados, o que pode subestimar a frequência real de eventos nesses pontos. O cruzamento com as 4.532 ocorrências operacionais do COR.rio, referentes ao período de 2015 a 2024, mitiga parcialmente esse viés ao incorporar registros independentes da presença de videomonitoramento fixo.

Outro ponto relevante é que a associação espacial entre câmeras, ocorrências e clusters depende da qualidade do georreferenciamento e dos procedimentos de join espacial ponto-em-polígono. Pequenas imprecisões de coordenadas podem afetar a atribuição de eventos a clusters específicos, especialmente em áreas urbanas densas ou em regiões próximas aos limites dos polígonos.

Além disso, a infraestrutura urbana e de monitoramento é dinâmica. A instalação de novas câmeras, a realização de obras de drenagem, intervenções viárias ou mudanças no padrão de uso do solo podem alterar tanto a condição de cobertura dos clusters quanto sua criticidade operacional. Portanto, a validade empírica dos rankings e simulações está condicionada ao recorte temporal dos dados utilizados. A principal contribuição da dissertação não está em fixar uma lista definitiva de pontos prioritários, mas em propor um método replicável de identificação, priorização e roteamento, capaz de ser atualizado conforme novas bases de câmeras, ocorrências e intervenções urbanas sejam incorporadas.

7.4.2 Validade das Métricas de Criticidade

As métricas `label_count`, `cor_weighted_score` e `combined_score` são aproximações operacionais da criticidade dos clusters. Elas sintetizam evidências históricas e registros operacionais disponíveis, mas não representam diretamente dano econômico, impacto social, profundidade da lâmina d'água, número de pessoas afetadas ou risco hidrológico absoluto.

A configuração V3, baseada em `combined_score`, foi adotada como configuração principal da dissertação por incorporar tanto a frequência histórica quanto a gravidade operacional das ocorrências. Ainda assim, trata-se de uma métrica de apoio à decisão, e não de uma medida definitiva de risco urbano. Sua interpretação deve considerar que diferentes pesos atribuídos às categorias operacionais poderiam alterar a priorização dos clusters e, consequentemente, as rotas geradas pelos algoritmos.

Os pesos atribuídos às categorias de gravidade foram definidos como aproximação ordinal da severidade operacional. Em aplicações futuras, esses pesos devem ser calibrados

com especialistas do COR.rio, podendo incorporar impacto viário, duração da ocorrência, recorrência sazonal, presença de equipamentos sensíveis e vulnerabilidade da população exposta.

Além disso, a densidade histórica de registros por km^2 deve ser compreendida como medida de concentração espacial dos registros de alagamento, e não como densidade populacional ou severidade absoluta. Clusters pequenos com registros recorrentes podem apresentar densidade elevada, mesmo quando seu volume absoluto de eventos é menor do que o de clusters maiores.

7.4.3 Validade do Modelo de Roteamento

A formulação proposta representa o problema operacional de despacho de VANTs como uma variante de roteamento com restrições de tempo, bases, retorno e criticidade dos pontos visitados. Essa abstração é adequada para avaliar políticas de priorização e cobertura, mas incorpora simplificações necessárias à simulação.

As distâncias entre bases e clusters foram calculadas de forma geodésica a partir dos centróides dos polígonos, desconsiderando obstáculos físicos, restrições de espaço aéreo, corredores de voo, interferências urbanas, topografia, vento e zonas de exclusão. A velocidade dos VANTs foi considerada constante, e o tempo de inspeção por cluster foi tratado de forma padronizada. Em uma operação real, esses parâmetros precisariam ser ajustados conforme o modelo do VANT, as condições meteorológicas, a autonomia da bateria, os protocolos de segurança e as autorizações de voo aplicáveis.

Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como estimativas de apoio ao planejamento operacional e à comparação entre estratégias de despacho, não como planos de voo imediatamente executáveis sem validação técnica complementar.

7.4.4 Validade Algorítmica

Os experimentos compararam cinco estratégias: Random, Nearest Neighbor, Greedy MCD, ILS e VNS. Os resultados indicaram que a otimização orientada por criticidade supera estratégias aleatórias ou baseadas apenas em proximidade geográfica, especialmente nos cenários com múltiplas bases e maior número de VANTs. Contudo, o estudo não quantificou formalmente o gap em relação à solução ótima, nem implementou algoritmos adicionais, como BRKGA, GRASP ou métodos exatos para instâncias reduzidas.

As metaheurísticas ILS e VNS foram avaliadas com cinco sementes no Cenário D, permitindo observar a variabilidade das soluções nessa configuração. A amostra não caracteriza robustez estatística ampla. A comparação algorítmica deve ser entendida como avaliação de alternativas heurísticas para apoio à decisão, e não como esgotamento do espaço de métodos possíveis.

7.4.5 Validade Operacional e Generalização

A aplicação empírica foi desenvolvida para o contexto do Rio de Janeiro, com dados, infraestrutura e critérios de criticidade associados ao COR.rio. Embora a metodologia seja transferível para outras cidades, sua adoção em novos contextos exigiria recalibração dos clusters críticos, das métricas de prioridade, das bases operacionais, da frota disponível e das restrições locais de voo.

As conversas exploratórias com operadores do COR.rio indicam que a infraestrutura de monitoramento e as condições de criticidade dos clusters são dinâmicas, sujeitas à instalação de novas câmeras, obras de drenagem e mudanças operacionais. Essas observações reforçam a necessidade de atualização periódica do data mart e de validação contínua dos rankings gerados pelo modelo junto aos especialistas da operação.

O experimento de horizonte rolante foi implementado em versão exploratória, com janelas de 15 minutos e atualização das prioridades a partir dos sinais temporais disponíveis. Os resultados mostraram que, sem dados em tempo real nos próprios pontos cegos de monitoramento, o replanejamento dinâmico pode ter desempenho inferior a uma solução estática bem otimizada. Esse achado reforça que a eficácia operacional do horizonte rolante depende criticamente da disponibilidade de sinais atualizados nos clusters sem cobertura por câmera.

Por fim, a validação plena da abordagem exigiria um teste piloto com VANTs reais, integração operacional ao ambiente do COR.rio e avaliação em condições meteorológicas e regulatórias reais. Portanto, a principal contribuição desta dissertação está na modelagem, simulação e avaliação comparativa de uma arquitetura de apoio à decisão, deixando a validação operacional em campo como etapa futura.

7.5 Diretrizes para Avaliação Operacional no COR.rio

Com base nos resultados simulados, três diretrizes podem orientar avaliações operacionais futuras no COR.rio. Essas diretrizes não constituem prescrições de implantação e devem ser validadas em campo, em conjunto com os operadores e com as restrições técnicas, institucionais e regulatórias aplicáveis.

A primeira diretriz é avaliar estratégias de bases distribuídas. Nos cenários simulados, o ganho de cobertura não dependeu apenas do número de VANTs, mas também da localização das bases de decolagem. Configurações com bases distribuídas superaram aquelas concentradas na sede do COR.rio, indicando que subprefeituras, unidades da Defesa Civil ou outros equipamentos públicos podem ser avaliados como pontos de apoio para ampliar o alcance operacional dos VANTs.

A segunda diretriz é avaliar métricas de criticidade enriquecida para orientar o despacho. A comparação entre as estratégias de referência evidencia que visitar mais clusters não garante maior cobertura ponderada. Na configuração experimental adotada, o `combined_score` produziu uma priorização mais aderente ao objetivo da pesquisa por incorporar frequência histórica e gravidade operacional. Sua utilização em operação depende de calibração adicional e validação com especialistas.

A terceira diretriz é avaliar os VANTs como parte de um sistema integrado de decisão, e não como recurso isolado de inspeção. A eficácia potencial do despacho dinâmico depende da integração entre dados de câmeras, pluviômetros, Waze, registros operacionais e sinais em tempo real nos próprios pontos cegos. Dessa forma, um futuro piloto deve considerar governança de dados, protocolos de acionamento, integração com sistemas existentes e validação operacional em campo.

7.6 Trabalhos Futuros

A partir dos resultados e limitações identificados, seis direções principais de trabalhos futuros são propostas:

1. **Expansão das metaheurísticas:** A expansão algorítmica pode explorar métodos evolutivos, GRASP e abordagens híbridas, em continuidade à literatura de metaheurísticas para roteamento de VANTs e problemas híbridos veículo-drone [4, 10, 11, 13, 46, 47]. Também se recomenda

aprofundar a integração entre despacho otimizado e detecção visual automática de alagamentos a partir de imagens de VANTs, conforme indicado por estudos recentes sobre drones, visão computacional e flood detection [35, 36];

2. **Horizonte rolante completo com dados em tempo real:** a versão inicial ($\Delta=15$ min, 4 janelas) foi implementada e mostrou que, sem dados sensoriais nos clusters gap, a fragmentação reduz a cobertura. A extensão com integração ao sistema do COR.rio, incorporando alertas de pluviômetros, câmeras e Waze em tempo real, permitiria avaliar o ganho real do replanejamento adaptativo sobre a simulação estática;
3. **Aprimoramento da simulação operacional dos VANTs:** avaliar o desempenho do sistema sob eventos de precipitação de alta intensidade, incorporando modelo de bateria, vento, restrições de espaço aéreo, zonas de exclusão, corredores seguros de voo, comunicação e tempo real de decolagem e pouso.
4. **Testes Piloto com VANTs reais:** testar em ambiente controlado ou semioperacional, validando tempos de deslocamento, qualidade das imagens, estabilidade de comunicação e viabilidade dos protocolos de acionamento. A implantação operacional também requer avaliação regulatória e institucional específica para voo de VANTs em área urbana, observando as exigências aplicáveis de autorização, segurança operacional, restrições de espaço aéreo, responsabilidade institucional e proteção de terceiros.
5. **Protótipo de integração em tempo real:** desenvolver um módulo de integração com a plataforma do COR.rio para operação do algoritmo de despacho em modo *online*, recebendo atualizações de estado a cada Δ minutos; Além da integração de modelos de visão computacional e aprendizado de máquina embarcado ou em nuvem, capazes de confirmar automaticamente a presença de lâmina d'água, bolsões ou alagamentos a partir das imagens capturadas pelos VANTs. Essa evolução permitiria fechar o ciclo entre despacho, observação, detecção automática e replanejamento.
6. **Enriquecimento da métrica de criticidade:** incorporando variáveis socioeconômicas, hidrológicas, de mobilidade urbana e vulnerabilidade

territorial, permitindo que a priorização considere não apenas a recorrência e gravidade operacional, mas também o impacto potencial sobre a população.

7.7 Considerações Finais

A principal contribuição desta dissertação é demonstrar que VANTs podem ser tratados não apenas como equipamentos de inspeção aérea, mas como sensores móveis integrados a um sistema de apoio à decisão orientado por criticidade. Ao combinar dados reais do COR.rio, identificação de lacunas de videomonitoramento, priorização espacial e algoritmos de roteamento, o trabalho mostra que a ampliação da cobertura observacional em eventos de alagamento depende menos da simples disponibilidade de drones e mais da capacidade de decidir, de forma algorítmica, quais pontos devem ser inspecionados primeiro.

Os resultados obtidos indicam que a infraestrutura fixa do COR.rio, embora robusta, apresenta pontos cegos relevantes em áreas críticas de alagamento. Esses pontos não são apenas regiões sem câmera; são áreas com histórico operacional confirmado, nas quais a ausência de observação visual pode comprometer a velocidade e a qualidade da resposta institucional. Nesse contexto, VANTs oferecem uma alternativa flexível para ampliar temporariamente a cobertura observacional, desde que seu uso seja orientado por critérios de criticidade e restrições operacionais explícitas.

A pesquisa também evidencia que a camada decisória é tão importante quanto a camada tecnológica. Drones, câmeras e sensores produzem valor apenas quando integrados a modelos capazes de transformar dados em decisões. A comparação entre algoritmos demonstrou que estratégias baseadas apenas em proximidade podem visitar mais pontos, mas entregar menor cobertura ponderada. Assim, a otimização combinatória aparece como componente essencial da inteligência operacional urbana.

Por fim, a dissertação reforça a relevância de aproximar Pesquisa Operacional, cidades inteligentes e gestão de risco climático. Em um cenário de eventos extremos cada vez mais frequentes, centros de operações urbanas precisarão combinar infraestrutura sensorial, dados históricos, modelos algorítmicos e recursos móveis de resposta. O caso do Rio de Janeiro oferece evidência computacional de que essa integração é promissora, embora sua viabilidade operacional ainda dependa de validação técnica, institucional, regulatória e de campo.

REFERÊNCIAS

- 1 OLIVEIRA, Otávio Henrique Flaeschen; SILVA, Luis Resende; OCHI, Luiz Satoru. Monitoramento de alagamentos em cidades inteligentes: ferramenta operacional para coleta de dados e imagens integrando câmeras, Waze e pluviômetros no Rio de Janeiro. *In: ANAIS do 56º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Fortaleza: Galoá, 2024. DOI: [10.59254/sbpo-2024-193448](https://doi.org/10.59254/sbpo-2024-193448).
- 2 GUARANÁ, Victor Hugo Corpas dos Santos; OCHI, Luiz Satoru. Análise e desenvolvimento de algoritmos eficientes para problemas de roteamento de veículos híbridos com caminhões e drones. *In: ANAIS do 56º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Fortaleza: Galoá, 2024. DOI: [10.59254/sbpo-2024-193797](https://doi.org/10.59254/sbpo-2024-193797).
- 3 SOUSA, Filipe Pessoa *et al.* Técnicas de inteligência computacional para previsão e mitigação de eventos climáticos hidrológicos extremos: uma revisão sistemática. *In: ANAIS do 56º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Fortaleza: Galoá, 2024. DOI: [10.59254/sbpo-2024-193442](https://doi.org/10.59254/sbpo-2024-193442).
- 4 MARQUES JUNIOR, Elias Lawrence *et al.* A two-phase multi-objective metaheuristic for a green UAV grid routing problem. **Optimization Letters**, v. 17, n. 9, p. 2233–2256, 2023. DOI: [10.1007/s11590-023-02013-9](https://doi.org/10.1007/s11590-023-02013-9).
- 5 OCHI, Luiz Satoru. Cidades e regiões inteligentes & sustentáveis – CRIS: alguns segmentos e tecnologias eficientes de solução. *In: IRIVALDO, José (ed.). Cidades inteligentes: gestão de recursos hídricos e planejamento*. Campina Grande: Editora Meraki, 2023. p. 91–110. ISBN 978-65-88781-80-7.
- 6 ARESE, Marcio Contente; OCHI, Luiz Satoru. O transporte de mercadorias e o plano de mobilidade nas cidades inteligentes: o caso da cidade de Niterói-RJ. *In: ANAIS do 55º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. São José dos Campos: Galoá, 2023. DOI: [10.59254/sbpo-2023-175178](https://doi.org/10.59254/sbpo-2023-175178).
- 7 OLIVEIRA, Otávio Henrique Flaeschen; SILVA, Luis Resende; OCHI, Luiz Satoru. Desenvolvimento de uma ferramenta de monitoramento de alagamentos para cidades inteligentes: o caso do Rio de Janeiro. *In: ANAIS do 55º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. São José dos Campos: Galoá, 2023. DOI: [10.59254/sbpo-2023-175088](https://doi.org/10.59254/sbpo-2023-175088).

- 8 COSTA, Daniel Ferreira *et al.* Uma abordagem meta-heurística evolutiva para a otimização de rotas de entrega fracionada de mercadorias utilizando caminhões e drones. *In: ANAIS do 55º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. São José dos Campos: Galoá, 2023. DOI: [10.59254/sbp-2023-174795](https://doi.org/10.59254/sbp-2023-174795).
- 9 HADDAD, Guilherme Manso; OCHI, Luiz Satoru. Combinando técnicas de machine learning e otimização para roteamento combinado de veículos tripulados e não tripulados. *In: ANAIS do 55º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. São José dos Campos: Galoá, 2023. DOI: [10.59254/sbp-2023-174785](https://doi.org/10.59254/sbp-2023-174785).
- 10 MARQUES JUNIOR, Elias Lawrence *et al.* UAVs routes optimization on smart cities and regions. **RAIRO – Operations Research**, v. 56, n. 2, p. 853–869, 2022. DOI: [10.1051/ro/2022036](https://doi.org/10.1051/ro/2022036).
- 11 ZUDIO, Anderson; COELHO, Igor Machado; OCHI, Luiz Satoru. Algoritmo VNS para o problema de roteamento híbrido com veículo-drone para serviço de entrega e coleta. *In: ANAIS do 3º Workshop Brasileiro de Cidades Inteligentes*. Porto Alegre: SBC, 2022. DOI: [10.5753/wbci.2022.223366](https://doi.org/10.5753/wbci.2022.223366).
- 12 OLIVEIRA, Thays Aparecida de *et al.* Mobility, citizens, innovation and technology in digital and smart cities. **Future Internet**, v. 12, n. 2, 2020. DOI: [10.3390/fi12020022](https://doi.org/10.3390/fi12020022).
- 13 MARQUES JUNIOR, Elias Lawrence *et al.* A multi-objective metaheuristic for a green UAV grid routing problem. *In: BENMANSOUR, Rachid; MLADENOVIC, Nenad; SIFALERAS, Angelo (ed.). Variable Neighborhood Search: 7th International Conference, ICVNS 2019, Rabat, Morocco, October 3–5, 2019, Revised Selected Papers*. Cham: Springer, 2020. v. 12010. (Lecture Notes in Computer Science). p. 152–166. DOI: [10.1007/978-3-030-44932-2_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44932-2_11).
- 14 COELHO, Vitor Nazário *et al.* When CI and decentralized systems effectively meet smart cities and grids. *In: COELHO, Vitor Nazário et al. (ed.). Smart and Digital Cities: from computational intelligence to applied social sciences*. Cham: Springer, 2019. (Urban Computing). p. 239–249. DOI: [10.1007/978-3-030-12255-3_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12255-3_15).
- 15 MUNHOZ, Pablo Luiz Araújo *et al.* Locality sensitive algorithms for data mule routing problem. *In: PROCEEDINGS of the 13th International Conference on Algorithmic Aspects in Information and Management*. Cham: Springer, 2019. v. 11640. (Lecture Notes in Computer Science), p. 236–248. DOI: [10.1007/978-3-030-27195-4_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27195-4_22).

- 16 COELHO, Bruno Nazário *et al.* A multi-objective green UAV routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 88, p. 306–315, 2017. DOI: [10.1016/j.cor.2017.04.011](https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.04.011).
- 17 CENTRO DE OPERAÇÕES E RESILIÊNCIA DO RIO DE JANEIRO. **História**. s.d. Disponível em: <https://cor.rio/historia/>. Acesso em: 18 mai. 2026.
- 18 CENTRO DE OPERAÇÕES E RESILIÊNCIA DO RIO DE JANEIRO. **Centro de Operações Rio**. s.d. Disponível em: <https://cor.rio/>. Acesso em: 18 mai. 2026.
- 19 CENTRO DE OPERAÇÕES E RESILIÊNCIA DO RIO DE JANEIRO. **FAQ**. s.d. Disponível em: <https://cor.rio/faq/>. Acesso em: 18 mai. 2026.
- 20 RIO DE JANEIRO (MUNICÍPIO). **Relatório Plano Verão 2024–2025**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://defesacivil.prefeitura.rio/wp-content/uploads/sites/35/2025/04/Relatorio-Plano-Verao-24-25-REV01_compressed.pdf. Acesso em: 18 mai. 2026.
- 21 MATHEUS, Ricardo; VAZ, José Carlos; RIBEIRO, Manuella Maia. Open government data and the data usage for improvement of public services in the Rio de Janeiro City. *In: PROCEEDINGS of the 15th Annual International Conference on Digital Government Research*. New York: ACM, 2014.
- 22 KITCHIN, Rob. The real-time city? Big data and smart urbanism. **GeoJournal**, v. 79, p. 1–14, 2014. DOI: [10.1007/s10708-013-9516-8](https://doi.org/10.1007/s10708-013-9516-8).
- 23 NAM, Taewoo; PARDO, Theresa A. Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. *In: PROCEEDINGS of the 12th Annual International Digital Government Research Conference*. New York: ACM, 2011. p. 282–291.
- 24 FOLKE, Carl *et al.* Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. **Ecology and Society**, v. 15, n. 4, 2010.
- 25 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 37120:2018: Sustainable cities and communities – Indicators for city services and quality of life**. Geneva, 2018.
- 26 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 37122:2019: Sustainable cities and communities – Indicators for smart cities**. Geneva, 2019.

- 27 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 37123:2019: Sustainable cities and communities – Indicators for resilient cities**. Geneva, 2019.
- 28 HEMMATI, Mohammad; KORNHUBER, Kai; KRUCZKIEWICZ, Andrew. Enhanced urban adaptation efforts needed to counter rising extreme rainfall risks. **npj Urban Sustainability**, v. 2, n. 1, 2022.
- 29 IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- 30 KRUCZKIEWICZ, Andrew *et al.* Compound risks and complex emergencies require new approaches to preparedness. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 118, n. 19, 2021.
- 31 DJALANTE, Riyanti; THOMALLA, Frank. Disaster risk reduction and climate change adaptation in Indonesia: institutional challenges and opportunities for integration. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 2, p. 1–11, 2012.
- 32 FORINO, Giuseppe; MEDING, Jason von; BREWER, Graham J. A conceptual governance framework for climate change adaptation and disaster risk reduction integration. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 6, n. 4, p. 372–384, 2015.
- 33 MOURA, Elaine H. de; CRUZ, Talita B. R.; CHIROLI, Daiane M. G. A framework proposal to integrate humanitarian logistics practices, disaster management and disaster mutual assistance: a Brazilian case. **Safety Science**, v. 132, 2020.
- 34 CARNERO QUISPE, M. F. *et al.* Temporary Facility Location Problem in Humanitarian Logistics: a systematic literature review. **Logistics**, v. 9, n. 1, 2025. DOI: [10.3390/logistics9010042](https://doi.org/10.3390/logistics9010042).
- 35 IQBAL, Umair *et al.* Drones for flood monitoring, mapping and detection: a bibliometric review. **Drones**, v. 7, n. 1, 32, 2023. DOI: [10.3390/drones7010032](https://doi.org/10.3390/drones7010032).
- 36 MUNAWAR, Hafiz Suliman *et al.* UAVs in disaster management: application of integrated aerial imagery and convolutional neural network for flood detection. **Sustainability**, v. 13, n. 14, 7547, 2021. DOI: [10.3390/su13147547](https://doi.org/10.3390/su13147547).
- 37 ALALI, Zahraa Tarik; ALABADY, Salah Abdulghani. The role of unmanned aerial vehicle and related technologies in disaster stages. **Remote Sensing**

- Applications: Society and Environment**, v. 28, 100873, 2022. DOI: [10.1016/j.rsase.2022.100873](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100873).
- 38 OLIVEIRA SILVA, Luciana de; MELLO BANDEIRA, Renata Albergaria de; CAMPOS, Vânia Barcellos Gouvêa. Proposal to planning facility location using UAV and geographic information systems in a post-disaster scenario. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 36, 101080, 2019. DOI: [10.1016/j.ijdr.2019.101080](https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101080).
- 39 LAPORTE, Gilbert. The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 59, n. 3, p. 345–358, 1992.
- 40 SOLOMON, Marius M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. **Operations Research**, v. 35, n. 2, p. 254–265, 1987.
- 41 PILLAC, Victor *et al.* A review of dynamic vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 225, n. 1, p. 1–11, 2013. DOI: [10.1016/j.ejor.2012.08.015](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.015).
- 42 ZHANG, Jian; WOENSEL, Tom van. Dynamic vehicle routing with random requests: a literature review. **International Journal of Production Economics**, v. 256, 108751, 2023. DOI: [10.1016/j.ijpe.2022.108751](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108751).
- 43 TARANTILIS, Christos D.; STAVROPOULOU, Foteini; REPOUSSIS, Panagiotis P. The capacitated team orienteering problem: a bi-level filter-and-fan method. **European Journal of Operational Research**, v. 224, n. 1, p. 65–78, 2013. DOI: [10.1016/j.ejor.2012.07.032](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.032).
- 44 LOURENÇO, Helena R.; MARTIN, Olivier C.; STÜTZLE, Thomas. Iterated local search. In: GLOVER, Fred; KOCHENBERGER, Gary A. (ed.). **Handbook of Metaheuristics**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 320–353.
- 45 HANSEN, Pierre; MLADENOVIC, Nenad. Variable neighborhood search: principles and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 130, n. 3, p. 449–467, 2001.
- 46 GONÇALVES, José Fernando; RESENDE, Mauricio G. C. Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization. **Journal of Heuristics**, v. 17, n. 5, p. 487–525, 2011.
- 47 FEO, Thomas A.; RESENDE, Mauricio G. C. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, v. 6, p. 109–133, 1995. DOI: [10.1007/BF01096763](https://doi.org/10.1007/BF01096763).

-
- 48 BRASIL. **Lei n. 13.709, de 14 de agosto de 2018: Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD)**. Brasília, DF: [s. n.], 2018. Diário Oficial da União, seção 1. Publicado em 15 ago. 2018.
- 49 BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Catálogo de Iniciativas Climáticas Urbanas no Brasil**. Edição: M. F. Lemos. Brasília: UCCRN-LA; ONU-Habitat; GIZ, 2025.

APÊNDICE A - DASHBOARD WEB DE VISUALIZAÇÃO INTERATIVA

Este apêndice descreve o dashboard web desenvolvido como artefato técnico complementar da dissertação. A ferramenta foi concebida para traduzir os resultados da análise geoespacial e dos experimentos de otimização em uma interface visual interpretável por pesquisadores, gestores e operadores de centros urbanos de monitoramento.

Os artefatos computacionais utilizados na pesquisa são mantidos em repositório privado. A dissertação documenta os procedimentos metodológicos, parâmetros e resultados agregados necessários à verificação acadêmica da abordagem.

A.1 Objetivo do Dashboard

O objetivo principal do dashboard é apoiar a leitura espacial e operacional dos resultados obtidos na dissertação. Em vez de limitar a interpretação a tabelas de cobertura ponderada, número de clusters visitados ou métricas agregadas de desempenho, a ferramenta permite visualizar a distribuição dos clusters críticos, a cobertura existente por câmeras, os pontos sem videomonitoramento fixo, as bases operacionais de VANTs, as rotas simuladas e as diferenças entre algoritmos de despacho.

Do ponto de vista acadêmico, o dashboard contribui para a verificação visual da coerência geográfica das soluções. Do ponto de vista aplicado, funciona como um protótipo de interface de apoio à decisão para o COR.rio, demonstrando como modelos de Pesquisa Operacional podem ser convertidos em informação acionável para operadores humanos.

A ferramenta organiza os dados da pesquisa em nove abas temáticas, cobrindo desde a visão geral do problema até as rotas geradas pelos algoritmos e os insights estratégicos para a operação urbana.

A.2 **Dados Representados no Dashboard**

O dashboard consolida os principais conjuntos de dados utilizados na dissertação. A página inicial apresenta a síntese do problema: 344 clusters críticos, 4.163 câmeras no inventário, 186 clusters com cobertura por câmera, 158 clusters sem cobertura por videomonitoramento fixo, 276 episódios inferidos e 4.532 ocorrências operacionais do COR.rio no período 2015–2024.

Tabela 21: Resumo dos indicadores apresentados no Painel Online

Elemento	Quantidade	Função no dashboard
		Universe espacial da
		pesquisa; polígonos de áreas
Clusters críticos	344	críticas de alagamento.
		Ativos de
		videomonitoramento
		utilizados para análise de
Câmeras inventariadas	4.163	cobertura.
		Clusters críticos com pelo
		menos uma câmera
Clusters com câmera	186	atribuída.
		Pontos cegos operacionais e
		alvos potenciais para
Clusters sem câmera	158	despacho de VANTs.
		Eventos temporais
		derivados dos registros de
Episódios inferidos	276	abril/2023 a janeiro/2024.
		Registros operacionais
		georreferenciados, com
Ocorrências COR	4.532	cobertura de 2015 a 2024.

Esses dados não são apresentados apenas como indicadores descritivos. Eles estruturam a lógica de navegação do painel: primeiro, o usuário compreende a dimensão do gap observacional; depois, avalia a distribuição espacial dos pontos cegos; em seguida, analisa os algoritmos de despacho e, por fim, observa as rotas simuladas sobre a cartografia da cidade.

A.3 Estrutura Geral de Navegação

A interface foi organizada em abas temáticas para separar o problema em camadas analíticas. Essa estrutura facilita o uso por diferentes públicos: pesquisadores podem explorar a coerência dos dados e métricas; gestores podem observar indicadores consolidados; operadores podem interpretar mapas, rotas e regiões prioritárias.

Tabela 22: Descrição de cada página no painel online

Aba	Descrição
Visão Geral	KPIs principais e síntese executiva do problema de cobertura.
Mapa de Cobertura	Mapa interativo com clusters cobertos e sem videomonitoramento fixo.
Top 50 Gaps	Ranking dos principais clusters sem câmera, priorizados por criticidade.
Temporal	Distribuição temporal de registros e episódios inferidos.
Câmeras	Inventário e distribuição da cobertura por câmera.
Simulação OR	Comparação dos algoritmos e cenários de despacho. Comparação entre simulação estática e replanejamento
Horizonte Rolante	em janelas. Visualização geográfica das rotas dos VANTs por
Rotas OR	cenário e algoritmo. Síntese interpretativa, diretrizes e possibilidades de
Insights Estratégicos	avaliação operacional.

A.4 Descrição Detalhada das Abas

A.4.1 Visão Geral

A aba Visão Geral apresenta a síntese executiva da dissertação. Seu papel é mostrar, de forma imediata, a escala do problema: quase metade dos clusters críticos de alagamento não possui cobertura por videomonitoramento fixo. Os indicadores principais — 344 clusters, 4.163 câmeras, 186 clusters cobertos e 158 sem câmera — permitem compreender rapidamente a lacuna observacional que motiva o emprego de VANTs como sensores móveis.

Além dos indicadores principais, essa aba contextualiza o problema como um desafio

de decisão, e não apenas de infraestrutura. A mensagem central é que a existência de câmeras em grande número não garante cobertura adequada dos pontos críticos; por isso, torna-se necessário priorizar, rotear e despachar recursos móveis de forma inteligente.

A.4.2 Mapa de Cobertura

A aba Mapa de Cobertura permite observar a distribuição espacial dos clusters críticos e sua relação com a infraestrutura de câmeras. Os clusters com cobertura e os clusters sem câmera são visualizados de forma diferenciada, permitindo identificar padrões territoriais de concentração dos gaps observacionais.

Essa visualização é importante porque transforma o indicador agregado de 45,9% de clusters sem câmera em uma leitura territorial. A ausência de cobertura não é homogênea: os pontos cegos se distribuem em regiões específicas da cidade, muitas vezes em áreas periféricas, suburbanas ou de acesso operacional mais complexo. Assim, a aba funciona como evidência visual da necessidade de bases distribuídas de VANTs.

A.4.3 Top 50 Gaps

A aba Top 50 Gaps apresenta o ranking executivo dos clusters sem cobertura por videomonitoramento fixo. A priorização considera a criticidade dos clusters, permitindo diferenciar pontos cegos com maior relevância operacional daqueles com menor histórico ou menor peso relativo.

Na lógica da dissertação, esse ranking é relevante porque permite converter o universo completo de 158 clusters sem câmera em uma lista de ação mais manejável. Para gestores públicos, a lista Top 50 representa um possível ponto de partida para planejamento de inspeções, avaliação de instalação futura de câmeras, posicionamento de bases móveis ou definição de prioridades em eventos de chuva extrema.

A.4.4 Temporal

A aba Temporal organiza os registros e episódios ao longo do tempo. A visualização temporal permite identificar concentração mensal, picos de atividade e sazonalidade, conectando os resultados da otimização ao comportamento real dos eventos de alagamento.

Essa aba também reforça uma distinção metodológica central da dissertação: registros temporais não são equivalentes a eventos independentes. Os 276 episódios inferidos

resultam do agrupamento de registros próximos no tempo, permitindo representar melhor a dinâmica operacional dos alagamentos. Essa leitura ajuda a evitar interpretações equivocadas baseadas apenas na contagem bruta de registros.

A.4.5 Câmeras

A aba Câmeras apresenta a distribuição da infraestrutura fixa de videomonitoramento. Ela permite observar o inventário de 4.163 câmeras, a proporção de câmeras atribuídas aos clusters críticos e a concentração de câmeras em determinados clusters.

A interpretação principal é que a rede de câmeras do COR.rio é ampla, mas sua distribuição não cobre todos os clusters de alagamento. Alguns clusters concentram muitas câmeras, enquanto outros permanecem sem nenhuma cobertura. Essa assimetria sustenta a ideia de que o problema não é apenas a quantidade total de câmeras, mas a relação espacial entre câmeras e pontos críticos.

A.4.6 Simulação OR

A aba Simulação OR apresenta os resultados dos experimentos de Pesquisa Operacional. Ela compara os algoritmos Random, Nearest Neighbor, Greedy MCD, ILS e VNS nos cenários A–D, permitindo avaliar cobertura ponderada, número de clusters visitados e diferenças de desempenho entre estratégias de despacho.

A principal leitura analítica dessa aba é que a simples maximização do número de visitas não garante maior cobertura ponderada. O algoritmo Nearest Neighbor, por exemplo, pode visitar mais clusters, mas alcançar cobertura ponderada menor do que algoritmos orientados por criticidade. Nos experimentos avaliados, a função objetivo baseada em criticidade mostrou-se mais alinhada ao objetivo de priorização da pesquisa do que critérios baseados apenas em distância ou quantidade.

Essa aba também apresenta o papel da configuração V3, baseada em `combined_score`, como base principal da dissertação. Ao incorporar frequência histórica e gravidade operacional, a métrica produz uma priorização mais alinhada ao objetivo experimental da pesquisa. Sua adoção operacional depende de calibração adicional e validação com especialistas do COR.rio.

A.4.7 Horizonte Rolante

A aba Horizonte Rolante compara a solução estática com o experimento exploratório de replanejamento em quatro janelas de 15 minutos. Essa visualização permite observar como a fragmentação do horizonte afeta a cobertura e em que condições o replanejamento pode ou não agregar valor.

O resultado mais relevante é interpretativo: quando há poucos sinais em tempo real nos próprios clusters sem câmera, o horizonte rolante pode perder desempenho em relação à solução estática. Isso não invalida a abordagem; ao contrário, evidencia que algoritmos dinâmicos dependem de dados atualizados para justificar o custo de replanejamento. A aba, portanto, transforma um resultado aparentemente negativo em uma evidência da importância de ampliar a cobertura informacional dos pontos cegos.

A.4.8 Rotas OR

A aba Rotas OR é o módulo geográfico central do dashboard. Para cada combinação de cenário e algoritmo, a interface representa as bases operacionais, as trajetórias dos VANTs, a sequência de clusters visitados e os clusters que permaneceram sem inspeção. A visualização das rotas permite avaliar não apenas o resultado numérico, mas a plausibilidade espacial das soluções.

Esse módulo é especialmente importante para comunicação com operadores e gestores. Em vez de apresentar somente que o VNS alcançou maior cobertura ponderada, por exemplo, a interface permite observar quais regiões foram atendidas, quais bases foram acionadas, que clusters ficaram fora da missão e como a distribuição das bases influencia o alcance dos VANTs.

Nos cenários avaliados, bases distribuídas ampliaram o alcance efetivo da frota, enquanto bases concentradas produziram maior sobreposição territorial. Assim, a visualização de rotas sustenta uma diretriz para avaliação futura: analisar conjuntamente o posicionamento das bases e a quantidade de VANTs disponíveis.

A.4.9 Insights Estratégicos

A aba Insights Estratégicos sintetiza os principais achados em linguagem orientada à decisão. Ela organiza diretrizes para avaliação da distribuição de bases, do dimensionamento de frota, da escolha de algoritmo, do uso de `combined_score` e da integração com dados

em tempo real.

Essa aba cumpre a função de ponte entre o resultado acadêmico e a aplicação institucional. Ela traduz os achados quantitativos em mensagens acionáveis: VANTs devem ser tratados como parte de um sistema integrado de decisão; algoritmos devem priorizar criticidade; e o sucesso do horizonte rolante depende da disponibilidade de sinais atualizados nos pontos sem cobertura.

A.5 Análises Derivadas do Dashboard

A leitura integrada das abas permite extrair cinco análises principais, diretamente conectadas às conclusões da dissertação.

A.5.1 O gap observacional é estrutural, não pontual

O dashboard evidencia que os 158 clusters sem câmera não constituem casos isolados. Eles representam 45,9% do universo de 344 clusters críticos, indicando uma lacuna observacional estrutural na rede fixa de monitoramento. A interface torna esse achado visível tanto no plano agregado quanto no plano espacial.

A.5.2 Bases distribuídas são decisivas

A comparação entre cenários mostra que o aumento de frota produz ganhos limitados quando todos os VANTs partem da mesma base. O ganho mais relevante ocorre quando novas bases são distribuídas territorialmente, ampliando o raio efetivo de cobertura. O dashboard permite observar esse efeito diretamente nas rotas, evidenciando a importância de pontos de apoio em regiões como Zona Norte, Zona Oeste, Zona Sul e Ilha do Governador.

A.5.3 Criticidade supera proximidade

A comparação entre Nearest Neighbor e algoritmos orientados por criticidade mostra que visitar mais clusters não necessariamente maximiza a cobertura ponderada. O dashboard permite observar essa diferença: estratégias baseadas apenas em proximidade podem gerar rotas aparentemente eficientes, mas operacionalmente menos relevantes. Esse achado reforça a escolha da cobertura ponderada como métrica central de avaliação.

A.5.4 A métrica `combined_score` amplia a informação considerada na priorização

A configuração V3, baseada em `combined_score`, combina frequência histórica e gravidade das ocorrências. No dashboard, essa métrica orienta rankings, simulações e interpretação das rotas. Nos experimentos avaliados, sua adoção evita que a priorização dependa exclusivamente da frequência de registros. A aderência operacional da métrica ainda requer calibração e validação com especialistas.

A.5.5 Horizonte rolante depende de dados em tempo real

A aba Horizonte Rolante indica que, nas simulações avaliadas, o replanejamento dinâmico depende da disponibilidade de informação nova suficiente para alterar a decisão. Nos clusters sem câmera, a escassez de sinais em tempo real limitou a eficácia do replanejamento. Esse resultado motiva a avaliação integrada de VANTs, câmeras, Waze, pluviômetros e registros do COR.rio em uma arquitetura de apoio à decisão.

A.6 Relação com a Metodologia da Dissertação

O dashboard não substitui a formulação matemática nem os experimentos apresentados no Capítulo 6. Sua função é complementar a análise, permitindo validar visualmente a coerência espacial dos resultados e comunicar os achados de forma acessível.

Na estrutura metodológica da dissertação, o dashboard atua em três níveis:

- nível descritivo: apresenta os dados de clusters, câmeras, gaps, episódios e ocorrências COR;
- nível analítico: compara algoritmos, cenários, métricas de cobertura e sensibilidade operacional;
- nível decisório: traduz os resultados em rotas, prioridades, diretrizes e cenários de avaliação para o COR.rio.

Dessa forma, o painel contribui para a reprodutibilidade e interpretabilidade da pesquisa, pois torna os resultados acessíveis sem exigir que o usuário execute scripts ou manipule diretamente os arquivos de dados.

A.7 Diretrizes para Avaliação Operacional Evidenciadas pelo Dashboard

A partir da leitura conjunta dos mapas, rankings e simulações, o dashboard evidencia três diretrizes para avaliação operacional futura. Elas sintetizam resultados do ambiente simulado e não constituem prescrições de implantação.

Tabela 23: Diretrizes e justificativas para avaliação operacional a partir dos resultados da dissertação

Diretriz	Justificativa operacional
Distribuir bases	Nos cenários simulados, bases territorialmente distribuídas ampliaram mais a cobertura do que apenas o aumento de VANTs em uma base central. O <code>combined_score</code> pode ser avaliado como critério de priorização complementar à proximidade geográfica, mediante
Priorizar por criticidade	calibração e validação com especialistas. Os resultados indicam que o horizonte rolante depende de sinais atualizados nos pontos cegos; sem esses dados, o
Integrar dados em tempo real	replanejamento pode perder valor.

A.8 Limitações do Dashboard

Apesar de sua utilidade analítica, o dashboard deve ser interpretado como protótipo de visualização e apoio à decisão, não como sistema operacional final. As principais limitações são:

- Os dados apresentados são derivados de processamento histórico e simulação, não de integração em tempo real com o ambiente operacional do COR.rio;

As rotas são calculadas com base em distâncias geodésicas entre centróides, não incorporando corredores reais de voo, zonas de exclusão, vento, bateria ou restrições regulatórias;

O dashboard não executa controle de missão nem comunicação com VANTs reais;

as visualizações dependem da qualidade dos dados georreferenciados e das associações espaciais entre câmeras, clusters e ocorrências;

A interface tem caráter demonstrativo e acadêmico, devendo ser evoluída para padrões de segurança, autenticação, auditoria e integração institucional antes de uso operacional.

A versão pública ou demonstrativa do dashboard deve evitar a exposição de dados brutos, coordenadas sensíveis de ativos operacionais, imagens, vídeos ou qualquer informação que possa comprometer a segurança da infraestrutura urbana, em alinhamento com os princípios de minimização, finalidade e segurança da informação discutidos na Seção 3.9 [48].

A.9 Possíveis Evoluções

Como evolução futura, o dashboard pode ser integrado a fluxos de dados em tempo real do COR.rio, permitindo atualização contínua de prioridades, execução online dos algoritmos de despacho e acompanhamento das missões dos VANTs. Também pode incorporar camadas adicionais, como previsão meteorológica, dados de mobilidade, vulnerabilidade social, hidrologia urbana e restrições aéreas.

Outra evolução relevante seria permitir simulação interativa de cenários pelo usuário, com ajuste de número de VANTs, bases operacionais, velocidade, horizonte de missão e métrica de criticidade. Essa funcionalidade aproximaria o dashboard de uma ferramenta de planejamento operacional, permitindo que gestores testem alternativas antes de eventos críticos.

Por fim, a incorporação de visão computacional permitiria fechar o ciclo de decisão: despacho do VANT, coleta de imagem, detecção automática de lâmina d'água ou bolsão, atualização do estado do cluster e replanejamento da missão. Essa evolução transformaria o dashboard em uma camada visual de uma arquitetura de inteligência operacional urbana.

A.10 Síntese do Apêndice

O dashboard Rio Flood Coverage materializa a contribuição aplicada da dissertação ao demonstrar como dados urbanos, métricas de criticidade e algoritmos de roteamento podem ser apresentados de forma interpretável. Sua principal função não é apenas exibir mapas, mas transformar resultados de Pesquisa Operacional em suporte visual à decisão.

Ao representar clusters, câmeras, gaps, rotas e cenários de despacho, a ferramenta evidencia que o problema de monitoramento de alagamentos não é resolvido apenas pela disponibilidade de sensores, mas pela capacidade de decidir quais pontos devem ser observados primeiro, com quais recursos e a partir de quais bases. Nesse sentido, o dashboard reforça o argumento central deste trabalho: VANTs devem ser tratados como sensores móveis integrados a um sistema de apoio à decisão orientado por criticidade.

APÊNDICE B - TRAJETÓRIA CIENTÍFICA, OPERACIONAL E TECNOLÓGICA DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO

Este apêndice apresenta a trajetória científica e tecnológica que antecedeu a presente dissertação, com ênfase nos trabalhos acadêmicos, nos ciclos de desenvolvimento da ferramenta e nas validações aplicadas associadas ao monitoramento de alagamentos em cidades inteligentes. Seu objetivo é contextualizar a dissertação como etapa de amadurecimento de uma linha de pesquisa aplicada, iniciada com a organização e visualização de dados urbanos, posteriormente ampliada para a coleta multimodal de evidências e, nesta etapa, aprofundada por meio da formulação de um problema de apoio à decisão para o despacho de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs).

A inclusão deste apêndice não tem a finalidade de acrescentar novos experimentos aos resultados apresentados nos capítulos anteriores. Sua função é documentar a continuidade entre a ferramenta desenvolvida em trabalhos prévios, a base empírica consolidada ao longo da pesquisa e a abordagem atual de priorização e roteamento de sensores móveis em clusters críticos sem cobertura por câmera fixa.

Nesse sentido, a dissertação deve ser compreendida como desdobramento metodológico de uma trajetória anterior. Os trabalhos apresentados no SBPO 2023 [7] e no SBPO 2024 [1] contribuíram para a construção da ferramenta, para a consolidação da base de dados e para a identificação das lacunas de cobertura observacional que motivam a presente pesquisa. A contribuição desta dissertação está em deslocar o foco do monitoramento e da coleta de dados para a tomada de decisão operacional, incorporando métricas de criticidade, algoritmos de roteamento, análise de cobertura e avaliação de cenários com VANTs.

B.1 Evolução da linha de pesquisa

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação está inserida no contexto de cidades inteligentes, resiliência urbana e governança operacional orientada por dados. Esse contexto é particularmente relevante no caso do Rio de Janeiro, onde o Centro de Operações Rio (COR.rio) atua como infraestrutura institucional de monitoramento, integração de dados e coordenação de resposta a eventos urbanos críticos [17, 18, 19]. Documentos operacionais recentes, como o Plano Verão 2024–2025, reforçam a necessidade de integração entre monitoramento, defesa civil, mobilidade urbana e comunicação pública em períodos de chuva intensa [20].

A ferramenta de monitoramento de alagamentos desenvolvida ao longo desta linha de pesquisa surgiu nesse ambiente: uma cidade com infraestrutura significativa de sensores e câmeras, mas ainda sujeita a lacunas espaciais de observação em áreas críticas. Assim, desde sua origem, a ferramenta esteve associada a um problema aplicado concreto: transformar dados urbanos heterogêneos em informação operacionalmente útil para apoiar decisões em eventos de alagamento.

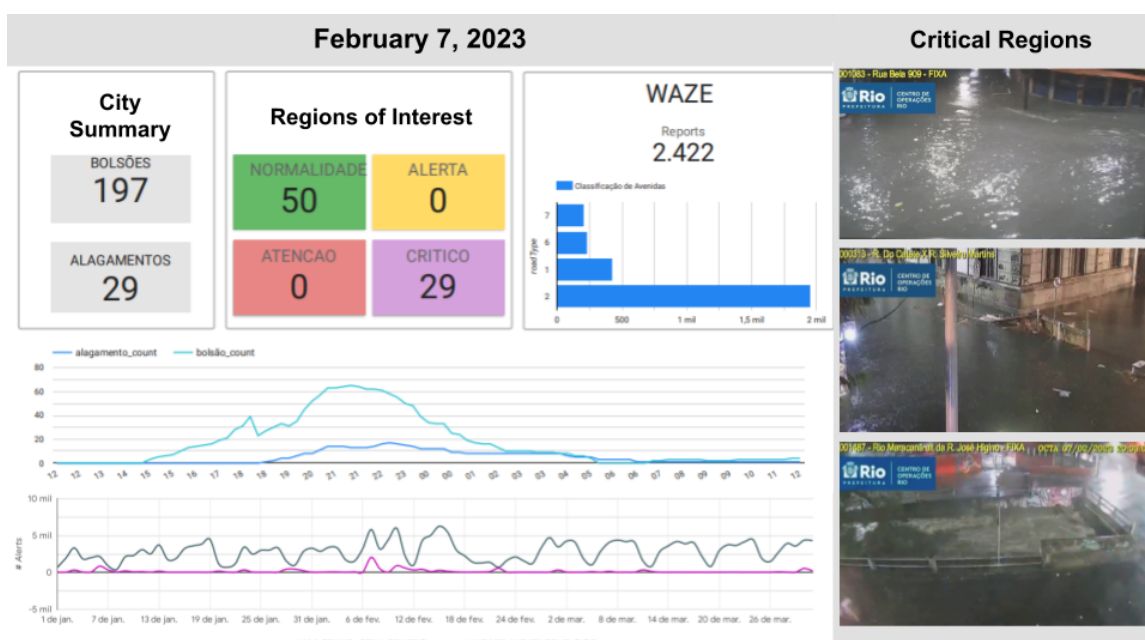


Figura 14: Trabalho apresentado no SBPO 2023.

Fonte: Acervo do autor; adaptado de Oliveira, Silva e Ochi [7].

A evolução da ferramenta pode ser sintetizada em três etapas principais: organização e visualização de dados de alagamentos; integração automatizada de múltiplas fontes de dados e imagens; e apoio à decisão para cobertura complementar por VANTs.

B.2 Trabalhos acadêmicos relacionados

O primeiro marco dessa trajetória foi o trabalho apresentado no SBPO 2023, intitulado “Desenvolvimento de uma ferramenta de monitoramento de alagamentos para cidades inteligentes: o caso do Rio de Janeiro” [7]. O estudo teve como foco a construção de uma ferramenta computacional para apoiar o acompanhamento de alagamentos urbanos, combinando dados georreferenciados, informações operacionais e visualização espacial.

A principal contribuição dessa etapa foi estabelecer uma leitura territorial dos eventos de alagamento, permitindo que eles fossem tratados não apenas como ocorrências isoladas, mas como fenômenos recorrentes associados a áreas críticas da cidade. Essa interpretação contribuiu diretamente para a definição posterior dos clusters críticos utilizados nesta dissertação como unidades geográficas de análise.

O segundo marco foi o trabalho apresentado no SBPO 2024, intitulado “Monitoramento de alagamentos em cidades inteligentes: ferramenta operacional para coleta de dados e imagens integrando câmeras, Waze e pluviômetros no Rio de Janeiro” [1]. Essa etapa ampliou a ferramenta por meio da integração de diferentes fontes de informação, incluindo câmeras de videomonitoramento, alertas do Waze e dados pluviométricos.

Essa evolução permitiu consolidar uma base empírica multimodal, combinando evidências visuais, sinais colaborativos e informações hidrometeorológicas. Para a presente dissertação, essa etapa foi relevante porque possibilitou analisar a relação entre infraestrutura fixa de câmeras e áreas críticas de alagamento, permitindo identificar os clusters sem cobertura por videomonitoramento fixo, denominados gaps observacionais.

B.3 Da observação ao apoio à decisão

Enquanto os trabalhos anteriores estavam concentrados no monitoramento, na organização e na coleta automatizada de dados, esta dissertação avança para o apoio à decisão operacional. A partir da identificação dos clusters críticos e dos gaps de cobertura, os VANTs passam a ser considerados sensores móveis capazes de complementar temporariamente a infraestrutura fixa existente.

Essa mudança de foco é central para a contribuição da pesquisa. O problema deixa de ser apenas observar onde há registros de alagamento ou quais câmeras estão disponíveis, e passa a envolver a decisão sobre quais pontos críticos devem ser priorizados, por quais VANTs, a partir de quais bases e dentro de quais restrições operacionais.



Figura 15: Trabalho apresentado no SBPO 2024.

Fonte: Acervo do autor; adaptado de Oliveira, Silva e Ochi [1].

Nesse contexto, a dissertação integra dados históricos de alagamentos, ocorrências operacionais do COR.rio, métricas de criticidade e algoritmos de roteamento. A adoção da configuração V3, baseada em `combined_score`, permite que a priorização considere não apenas a frequência histórica dos registros, mas também a gravidade operacional associada às ocorrências analisadas.

Dessa forma, a linha de pesquisa evolui de um artefato de monitoramento para um sistema de apoio à decisão. O dashboard desenvolvido na pesquisa não apenas apresenta dados, mas comunica resultados de otimização, comparação entre algoritmos, análise de sensibilidade, rotas simuladas e implicações operacionais para o uso de VANTs no contexto do COR.rio.

B.4 Registros de disseminação e trajetória aplicada

Além da produção acadêmica, a linha de pesquisa foi apresentada e reconhecida em ambientes de inovação, tecnologia urbana e cidades inteligentes. Entre os registros de sua trajetória aplicada, destacam-se o Selo IdeiaGov, em 2022, o reconhecimento no Connected Smart Cities, em 2023, a premiação em Soluções Inovadoras para Cidades, também em 2023, e a menção no Catálogo de Iniciativas Climáticas Urbanas no Brasil em 2025 [49].

Esses reconhecimentos indicam aderência da solução a problemas reais de monitoramento urbano, resiliência operacional e transformação digital da gestão pública. No entanto, sua interpretação deve ser feita com cautela acadêmica. Eles não demonstram, por si só, a validade da formulação matemática, a superioridade dos algoritmos ou a robustez dos experimentos apresentados nesta dissertação.



Figura 16: Registros de disseminação e reconhecimentos associados à trajetória aplicada da pesquisa.

Fonte: Acervo do autor.

A função desses registros é contextualizar a relevância aplicada da pesquisa e documentar sua interação com problemas concretos e ambientes externos ao espaço acadêmico. A validação científica permanece fundamentada na descrição da base de dados, na formulação do problema, nos experimentos computacionais, na comparação entre algoritmos, na análise dos resultados e na explicitação das limitações.

B.5 Apoio Institucional

Além da produção acadêmica e dos reconhecimentos externos, o desenvolvimento da linha de pesquisa ocorreu em diálogo com um ecossistema institucional, tecnológico e intersectorial. A trajetória apresentada neste apêndice evidencia que a presente dissertação é resultado de um processo incremental de pesquisa aplicada. O trabalho de 2023 estruturou uma ferramenta inicial para monitoramento de alagamentos em cidades inteligentes [7]. O trabalho de 2024 ampliou essa ferramenta por meio da coleta automatizada de da-

dos e imagens, integrando câmeras, Waze e pluviômetros [1]. A dissertação atual avança ao formular e avaliar uma abordagem de apoio à decisão para despacho de VANTs em clusters críticos sem cobertura por videomonitoramento fixo.



Figura 17: Registros de apresentações, reconhecimento e disseminação institucional da linha de pesquisa.

Fonte: Acervo do autor.

Essa evolução pode ser sintetizada como a passagem de uma ferramenta de monitoramento para um sistema de apoio à decisão. Inicialmente, a preocupação central era organizar e visualizar eventos de alagamento. Em seguida, passou-se a coletar evidências multimodais automaticamente. Nesta dissertação, o foco passa a ser decidir como empregar recursos móveis escassos para ampliar a observabilidade das áreas mais relevantes.

O desenvolvimento da linha de pesquisa também ocorreu em um ecossistema de apoio institucional, tecnológico e intersetorial, envolvendo ambientes acadêmicos, programas de inovação, instituições públicas e iniciativas voltadas ao fortalecimento de soluções aplicadas a cidades inteligentes. A Figura 18 apresenta, de forma sintética, instituições, programas e ambientes que contribuíram para a trajetória de desenvolvimento, validação, interlocução ou amadurecimento da solução.

A presença desse ecossistema reforça que a linha de pesquisa não foi desenvolvida de forma isolada, mas em diálogo com diferentes atores relacionados à pesquisa aplicada, inovação tecnológica, gestão pública e infraestrutura urbana. Para fins acadêmicos, essa rede é apresentada como elemento de contextualização da trajetória, sem substituir a validação metodológica e experimental desenvolvida nos capítulos centrais da dissertação.



Figura 18: Ecossistema institucional, tecnológico e intersectorial associado ao desenvolvimento da linha de pesquisa.

Fonte: Acervo do autor.

Assim, os artigos, imagens representativas, apresentações e reconhecimentos externos associados à linha de pesquisa documentam a trajetória que permitiu chegar à formulação atual. Em conjunto com o Apêndice A, que descreve o dashboard web de visualização interativa, este apêndice reforça que a dissertação articula produção científica, desenvolvimento tecnológico, dados reais, modelagem de otimização e relevância operacional para o monitoramento de alagamentos no Rio de Janeiro.