

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC – UFABC

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO

GRAFOS GEOESPACIAIS PARA
PLANEJAMENTO MILITAR:
ABORDAGEM MULTICAMADAS
EM CENÁRIOS URBANOS
CRÍTICOS

LUIS FELIPE COMODO SEELIG

SANTO ANDRÉ - SP

2025

LUIS FELIPE COMODO SEELIG

**GRAFOS GEOESPACIAIS PARA
PLANEJAMENTO MILITAR:
ABORDAGEM MULTICAMADAS
EM CENÁRIOS URBANOS
CRÍTICOS**

Projeto de pesquisa apresentado à Universidade Federal
do ABC - UFABC como requisito parcial para conclusão
do curso de Pós-graduação em Geoprocessamento, sob
orientação do Prof. (Nome do Orientador).

SANTO ANDRÉ - SP

2025

RESUMO

Este projeto propõe uma metodologia baseada na construção de grafos geoespaciais multicamadas orientados especificamente para apoiar o planejamento prévio de operações militares em áreas urbanas vulneráveis a eventos críticos relacionados às ameaças Químicas, Biológicas, Radiológicas e Nucleares (QBRN), situações críticas de segurança pública e eventos climáticos extremos. Fundamentado nas etapas do Processo de Integração Terreno, Condições Meteorológicas e Considerações Civis (PITCIC), o trabalho visa estruturar informações geoespaciais em camadas interligadas compostas por nós e arestas com atributos específicos, proporcionando uma ferramenta estratégica eficaz para o planejamento operacional antecipado. A metodologia será aplicada em um estudo de caso na região de Sorocaba-SP, área estratégica devido à presença do Programa de Submarinos da Marinha (PRO SUB) e potenciais riscos nucleares associados. Espera-se que essa abordagem sirva como base para pesquisas futuras que utilizem técnicas mais avançadas, como as Redes Neurais de Grafos (GNN).

Palavras-chave: Grafos Geoespaciais; PITCIC; Multicamadas; Geoprocessamento; Operações Militares; QBRN; Segurança Pública.

Sumário

RESUMO	1
1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo Geral	6
2.2 Objetivos Específicos	6
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
3.1 Processo de Integração Terreno, Condições Meteorológicas, Inimigo e Con- siderações Civas (PITCIC)	7
3.2 Análise Geoespacial e Grafos	8
3.3 Formalização Matemática de Grafos Multicamadas	8
3.4 Redes Neurais de Grafos (GNN)	9
3.5 Modelagem Multicamada	9
4 METODOLOGIA	11
4.1 Visão Geral	11
4.2 Estruturação do Grafo Geoespacial Multicamadas	11
4.3 Aquisição e Processamento de Dados	12
4.3.1 Fontes de Dados	12
4.3.2 Pré-processamento	12
4.4 Construção das Camadas do Grafo	12
4.4.1 Camada de Terreno	12
4.4.2 Camada Climática	13
4.4.3 Camada de Considerações Civas	13
4.5 Integração para Compatibilidade com GNN	13
4.5.1 Estruturação de Dados para PyTorch Geometric	13
4.5.2 Conexões Inter-camadas	14
4.6 Implementação e Validação	14
4.6.1 Ferramentas Utilizadas	14
4.6.2 Validação Estrutural	14

4.7	Estudo de Caso: Sorocaba-SP	14
5	RESULTADOS ESPERADOS	16
5.1	Contribuições Metodológicas	16
5.2	Produtos Técnicos	16
5.3	Aplicações Práticas	17
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO PRELIMINAR	18
6.1	Potencialidades da Abordagem Proposta	18
6.2	Desafios e Limitações	18
6.3	Implicações para Pesquisas Futuras	19
7	CRONOGRAMA	20
8	CONCLUSÃO	21
9	REFERÊNCIAS	23
10	GLOSSÁRIO	26

Lista de Tabelas

7.1	Cronograma de execução da pesquisa.	20
-----	---	----

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O planejamento militar prévio, especialmente em cenários urbanos suscetíveis a eventos críticos, demanda ferramentas analíticas eficientes capazes de integrar diversas fontes de dados e informações complexas sobre o ambiente operacional. No contexto atual, as ameaças envolvendo agentes Químicos, Biológicos, Radiológicos e Nucleares (QBRN), aliadas às crises de segurança pública e eventos climáticos extremos, impõem desafios adicionais à gestão das operações militares urbanas, exigindo soluções tecnológicas inovadoras para apoiar a decisão dos comandantes em tempo hábil.

O Exército Brasileiro utiliza atualmente o Processo de Integração Terreno, Condições Meteorológicas e Considerações Civas (PITCIC), um método consolidado para avaliação detalhada das condições operacionais prévias à execução das operações. Contudo, devido à complexidade e à dinâmica das áreas urbanas, há demanda crescente por ferramentas computacionais que possibilitem integrar e analisar rapidamente diversas camadas de informações críticas, permitindo antecipar cenários e identificar vulnerabilidades específicas antes que as crises ocorram.

Este projeto de pesquisa propõe uma metodologia prática e replicável para a criação e estruturação de grafos geoespaciais multicamadas, alinhada diretamente às etapas do PITCIC. Essas camadas conterão elementos representados por nós e arestas com matrizes detalhadas de atributos geoespaciais, fornecendo subsídios fundamentais ao planejamento operacional antecipado das forças militares em contextos urbanos sujeitos a eventos QBRN, incidentes de segurança pública e impactos climáticos extremos.

A metodologia será aplicada em um estudo de caso na região de Sorocaba-SP, escolhida estrategicamente por sua relevância no contexto de segurança nacional, abrigando instalações associadas ao Programa de Submarinos da Marinha (PRO SUB) e apresentando potenciais vulnerabilidades relacionadas a riscos nucleares. Esta abordagem fornecerá uma base robusta para pesquisas futuras que explorem técnicas avançadas, como Redes Neurais de Grafos (GNN), ampliando significativamente a capacidade de previsão, resposta e gestão operacional em situações críticas complexas.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia prática e replicável para construção de grafos geoespaciais multicamadas com foco no apoio ao planejamento prévio de operações militares em contextos urbanos vulneráveis a eventos críticos QBRN, segurança pública e eventos climáticos extremos, baseando-se nas etapas do PITCIC, com aplicação específica na região de Sorocaba-SP.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir critérios para aquisição e integração de dados geoespaciais relativos às camadas de terreno, meteorologia e considerações civis na região de Sorocaba;
- Estruturar grafos geoespaciais multicamadas integrados, compostos por nós, arestas e respectivas matrizes de atributos;
- Aplicar a metodologia proposta em um estudo de caso na região de Sorocaba-SP, demonstrando sua aplicabilidade para análise de vulnerabilidades relacionadas ao Programa de Submarinos e potenciais riscos nucleares;
- Analisar preliminarmente as potencialidades e limitações da metodologia proposta;
- Estabelecer uma base sólida de dados estruturados que permita futuramente a integração com técnicas de Inteligência Artificial, particularmente Redes Neurais de Grafos (GNN).

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Processo de Integração Terreno, Condições Meteorológicas, Inimigo e Considerações Civas (PITCIC)

O PITCIC constitui um processo cíclico e de caráter gráfico que permite, mediante análise integrada, a visualização de como o terreno, as condições meteorológicas, o inimigo e as considerações civis condicionam as operações militares, fornecendo dados efetivos para auxiliar a tomada de decisões adequadas (EB70-MC-10.336, 2023). Como processo de apoio ao exame de situação militar, o PITCIC integra-se ao ciclo de planejamento e condução das operações terrestres.

A aplicação do PITCIC é estruturada em quatro fases fundamentais:

- **Definição do ambiente operacional:** identificação das características significativas do ambiente e delimitação geográfica da zona de ação, área de responsabilidade, área de influência e área de interesse.
- **Definição dos efeitos do ambiente sobre as operações:** análise detalhada do terreno, das condições meteorológicas e das considerações civis, culminando na produção de calcos de restrições ao movimento, vias de acesso e outros produtos gráficos essenciais.
- **Avaliação da ameaça:** exame da doutrina, táticas, capacidades e vulnerabilidades do inimigo, consolidadas em calcos de situação que representam possíveis desdobramentos.
- **Determinação das possíveis linhas de ação da ameaça:** integração das fases anteriores para formular hipóteses sobre as ações do inimigo, contribuindo diretamente para o processo decisório do comandante.

3.2 Análise Geoespacial e Grafos

A teoria dos grafos oferece um arcabouço matemático adequado para a representação de relações complexas entre entidades espaciais. Um grafo $G = (V, E)$ é composto por um conjunto V de vértices (nós) e um conjunto E de arestas que representam conexões ou relações entre esses vértices. Em aplicações geoespaciais, os nós tipicamente representam localizações ou feições geográficas, enquanto as arestas modelam conexões físicas, funcionais ou conceituais entre esses elementos.

A aplicação de grafos em análise geoespacial tem sido amplamente estudada, particularmente para modelar redes de transporte, análise de acessibilidade urbana e simulação de fluxos populacionais. A incorporação de múltiplas camadas de informação em uma estrutura integrada de grafo permite a modelagem de sistemas complexos como áreas urbanas sujeitas a múltiplos fatores de risco.

3.3 Formalização Matemática de Grafos Multicamadas

Um grafo multicamadas G é definido formalmente como uma tupla $G = (V, E, L, \phi, \omega)$, onde:

- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ é o conjunto de nós
- $E \subseteq \{(v_i, v_j, \alpha) | v_i, v_j \in V, \alpha \in \{0, 1\}\}$ é o conjunto de arestas, onde $\alpha = 0$ indica arestas intra-camada e $\alpha = 1$ indica arestas inter-camadas
- $L = \{L_1, L_2, \dots, L_m\}$ é o conjunto de camadas
- $\phi : V \rightarrow L$ é uma função que atribui cada nó a uma camada específica
- $\omega : E \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função que atribui pesos às arestas

Para cada camada L_i , definimos:

- $V_i = \{v \in V | \phi(v) = L_i\}$ como o conjunto de nós pertencentes à camada L_i
- $E_i = \{(v_a, v_b, 0) \in E | v_a, v_b \in V_i\}$ como o conjunto de arestas intra-camada em L_i
- $A_i \in \mathbb{R}^{|V_i| \times |V_i|}$ como a matriz de adjacência da camada L_i

Para arestas inter-camadas entre camadas L_i e L_j , definimos:

- $E_{ij} = \{(v_a, v_b, 1) \in E | v_a \in V_i, v_b \in V_j\}$ como o conjunto de arestas inter-camadas
- $C_{ij} \in \mathbb{R}^{|V_i| \times |V_j|}$ como a matriz de conexão entre camadas

3.4 Redes Neurais de Grafos (GNN)

As Redes Neurais de Grafos (Graph Neural Networks - GNN) representam uma evolução recente no campo do aprendizado profundo, especificamente adaptadas para operar com dados estruturados em forma de grafo. Diferentemente das redes neurais convencionais, as GNNs são capazes de processar informações relacionais, considerando tanto os atributos dos nós quanto a estrutura topológica do grafo.

Entre as arquiteturas relevantes para análise geoespacial, destacam-se:

- **Graph Convolutional Networks (GCN):** Implementam operações de convolução adaptadas para grafos, permitindo a extração hierárquica de características locais e globais da estrutura topológica.
- **Graph Attention Networks (GAT):** Incorporam mecanismos de atenção que atribuem pesos diferenciados às conexões, identificando elementos mais relevantes no contexto da análise.
- **Temporal Graph Networks (TGN):** Estendem a modelagem para a dimensão temporal, incorporando a evolução dinâmica dos dados em diferentes escalas temporais.

A aplicação de GNNs em dados geoespaciais apresenta potencial significativo para aprimorar as análises do PITCIC, permitindo identificar padrões complexos e relações não-lineares que métodos convencionais não conseguem capturar.

3.5 Modelagem Multicamada

A modelagem de grafos multicamadas (Multilayer Graph Models) representa uma abordagem avançada para capturar a complexidade de sistemas que envolvem diferentes tipos de relações ou interações. Em um grafo multicamada, cada camada representa um tipo específico de relação entre os mesmos nós, ou conjuntos parcialmente sobrepostos de nós.

No contexto da análise geoespacial militar, a modelagem multicamada permite integrar diferentes aspectos do PITCIC:

- **Camada de Terreno:** Representa características físicas como topografia, hidrografia, vegetação e infraestrutura construída.
- **Camada Meteorológica:** Modela condições ambientais temporais como precipitação, temperatura, visibilidade e seus impactos na mobilidade.

- **Camada de Considerações Civas:** Captura aspectos socioeconômicos, culturais e demográficos, incluindo distribuição populacional e áreas de interesse.
- **Camada de Ameaça:** Representa posições conhecidas ou prováveis do inimigo, zonas de influência e capacidades de resposta.

A interconexão destas camadas através de arestas inter-camadas permite modelar as complexas interações entre estes diferentes aspectos, fornecendo uma representação mais completa e integrada do ambiente operacional.

Capítulo 4

METODOLOGIA

4.1 Visão Geral

A metodologia proposta visa construir grafos geoespaciais multicamadas utilizando dados abertos de terreno, condições meteorológicas e considerações civis, estruturados de forma compatível com Redes Neurais de Grafos (GNN). O processo é organizado em etapas sequenciais que transformam dados geoespaciais heterogêneos em uma representação uniforme e adequada para processamento por algoritmos de aprendizado profundo, com aplicação específica na região de Sorocaba-SP.

4.2 Estruturação do Grafo Geoespacial Multicamadas

O grafo geoespacial multicamadas é definido formalmente como $G = (V, E, L)$, onde:

- V representa o conjunto de nós georreferenciados
- E representa o conjunto de arestas (conexões)
- $L = \{L_{\text{terreno}}, L_{\text{clima}}, L_{\text{civil}}\}$ representa o conjunto de camadas temáticas

Cada camada captura uma dimensão específica do ambiente operacional:

- **Camada de Terreno (L_{terreno}):** Incorpora elementos físicos como topografia, hidrografia, vegetação e infraestrutura construída.
- **Camada Climática (L_{clima}):** Representa condições meteorológicas e seus padrões temporais, incluindo precipitação, temperatura e visibilidade.
- **Camada de Considerações Civis (L_{civil}):** Integra dados socioeconômicos, demográficos e infraestruturais, seguindo a estrutura AECOPE (Área, Estruturas, Capacidades, Organizações, População e Eventos).

4.3 Aquisição e Processamento de Dados

4.3.1 Fontes de Dados

Utilizamos exclusivamente dados abertos provenientes de:

- **Terreno:** Modelos digitais de elevação (SRTM), hidrografia (ANA), malha viária (OpenStreetMap) e cobertura do solo (MapBiomass, Coleção 7.0).
- **Clima:** Séries históricas e previsões meteorológicas (INMET), padrões de precipitação (CEMADEN) e mapas de temperatura (WorldClim).
- **Considerações Civas:** Demografia (IBGE), infraestrutura urbana, equipamentos públicos e indicadores socioeconômicos (IPEA).

4.3.2 Pré-processamento

Os dados adquiridos são submetidos a:

- Padronização para sistema de referência comum (SIRGAS 2000)
- Harmonização de escalas e resolução espacial
- Tratamento de inconsistências e dados ausentes
- Normalização e conversão para formatos adequados para estruturação em grafos

4.4 Construção das Camadas do Grafo

4.4.1 Camada de Terreno

- **Discretização do Espaço:** Divisão da área de Sorocaba em células regulares de 100x100 metros
- **Definição de Nós:** Pontos representativos como interseções viárias, elevações significativas e pontos hidrográficos estratégicos
- **Extração de Atributos:** Derivação de declividade, rugosidade, orientação, distância a corpos d'água
- **Estabelecimento de Arestas:** Conexões baseadas em adjacência espacial, conexões viárias e relações topológicas

4.4.2 Camada Climática

- **Espacialização:** Interpolação de dados pontuais de estações meteorológicas utilizando o método de Krigagem (Kriging), que estima valores em pontos não amostrados baseando-se na autocorrelação espacial dos dados. Esta técnica foi escolhida por sua capacidade de minimizar o erro de estimativa e fornecer medidas de incerteza.
- **Temporalidade:** Incorporação de variações sazonais e ciclicidade, com atenção especial aos padrões históricos de precipitação na região de Sorocaba
- **Atributos Derivados:** Índices de severidade climática, probabilidade de eventos extremos
- **Conexões:** Relações baseadas em similaridade de padrões e continuidade atmosférica

4.4.3 Camada de Considerações Cívicas

- **Unidades de Análise:** Setores censitários de Sorocaba, áreas de influência de infraestruturas
- **Atributos Sociodemográficos:** Densidade populacional, vulnerabilidade social, acesso a serviços
- **Infraestrutura:** Localização e capacidade de instalações críticas (hospitais, escolas) e instalações relacionadas ao PRO SUB
- **Matriz AECOPE:** Espacialização sistemática dos componentes da matriz com ênfase em áreas de potencial risco nuclear

4.5 Integração para Compatibilidade com GNN

4.5.1 Estruturação de Dados para PyTorch Geometric

- **Matriz de Features de Nós** ($X \in \mathbb{R}^{n \times d}$): Concatenação dos atributos normalizados de todos os nós
- **Índice de Arestas** ($E \in \mathbb{R}^{2 \times m}$): Representação das conexões intra e inter-camadas
- **Atributos de Arestas** ($U \in \mathbb{R}^{m \times c}$): Pesos e características das conexões
- **Tipos de Nós** ($T \in \{0, 1, 2\}^n$): Vetor indicando a camada de origem de cada nó

4.5.2 Conexões Inter-camadas

- **Sobreposição Espacial:** Conexões baseadas em co-localização geográfica
- **Relações Funcionais:** Conexões derivadas de conhecimento de domínio sobre interações entre camadas
- **Propagação de Efeitos:** Modelagem matemática de como eventos em uma camada afetam elementos em outras

4.6 Implementação e Validação

4.6.1 Ferramentas Utilizadas

- Python como linguagem principal com bibliotecas geoespaciais (GeoPandas, GDAL)
- NetworkX para construção e análise preliminar de grafos
- PyTorch Geometric para estruturação final compatível com GNN
- QGIS para visualização e validação espacial

4.6.2 Validação Estrutural

- Verificação de integridade topológica e conectividade
- Análise de distribuição de graus e outras propriedades estruturais
- Testes de carregamento em frameworks de GNN
- Visualizações seletivas para verificação qualitativa

4.7 Estudo de Caso: Sorocaba-SP

A metodologia será aplicada na região de Sorocaba-SP, escolhida estrategicamente devido aos seguintes fatores:

- **Presença do PRO SUB:** A região abriga instalações associadas ao Programa de Submarinos da Marinha, representando infraestrutura crítica para segurança nacional.
- **Potencial risco nuclear:** As atividades relacionadas ao desenvolvimento de submarinos de propulsão nuclear envolvem considerações específicas quanto a riscos QBRN.

- **Características urbanas complexas:** Sorocaba apresenta uma malha urbana de média complexidade, com setores industriais, residenciais e áreas de expansão, adequada para testar a metodologia proposta.
- **Disponibilidade de dados:** Existência de bases de dados abertas e detalhadas sobre a região, incluindo dados censitários, meteorológicos e ambientais.

O estudo demonstrará o processo completo de construção do grafo multicamadas e sua preparação para futura integração com modelos de GNN. Os resultados serão avaliados quanto à fidelidade da representação e adequação estrutural para aprendizado profundo em grafos, com foco específico na modelagem de vulnerabilidades relacionadas a potenciais eventos QBRN.

Capítulo 5

RESULTADOS ESPERADOS

5.1 Contribuições Metodológicas

A pesquisa proposta visa alcançar avanços metodológicos significativos para a análise geoespacial militar:

- **Framework Estruturado:** Desenvolvimento de uma metodologia sistemática para construção de grafos geoespaciais multicamadas utilizando exclusivamente dados abertos, criando uma base estruturada para análise de vulnerabilidades urbanas.
- **Formalização de Relações:** Estabelecimento de um modelo matemático para representação das complexas interações entre terreno, condições meteorológicas e considerações civis, permitindo análises quantitativas rigorosas.
- **Base para Aplicações Avançadas:** Estruturação de uma representação de dados adequada para futura aplicação de técnicas avançadas como Redes Neurais de Grafos (GNN), estabelecendo fundações para pesquisas subsequentes.
- **Alinhamento com PITCIC:** Integração de metodologias computacionais avançadas com processos operacionais consolidados, permitindo a evolução do planejamento militar sem ruptura com práticas existentes.

5.2 Produtos Técnicos

A pesquisa resultará em um conjunto de produtos técnicos com aplicabilidade direta:

- **Biblioteca de Código Aberto:** Implementação de uma biblioteca para construção e análise de grafos geoespaciais multicamadas, facilitando a replicação da metodologia em diferentes contextos.

- **Protocolos de Processamento:** Definição de fluxos de trabalho estruturados para aquisição, processamento e integração de dados geoespaciais em estruturas de grafos multicamadas.
- **Estruturas de Dados Otimizadas:** Modelos de armazenamento e representação de informações geoespaciais adaptados especificamente para processamento por GNN.
- **Estudo de Caso Documentado:** Aplicação detalhada da metodologia na região de Sorocaba-SP, servindo como referência para implementações futuras em outras áreas urbanas.

5.3 Aplicações Práticas

Os resultados da pesquisa oferecerão suporte a aplicações práticas relevantes para o planejamento militar:

- **Análise de Vulnerabilidade Urbana:** Identificação sistemática de áreas vulneráveis a eventos críticos QBRN, de segurança e climáticos, com base na integração de múltiplas dimensões analíticas, com foco específico nos riscos associados às instalações do PRO SUB em Sorocaba.
- **Planejamento Prévio:** Aprimoramento do processo de planejamento antecipado de operações militares em ambientes urbanos complexos, permitindo simulações e análises de cenários.
- **Priorização de Recursos:** Fundamentação objetiva para alocação de recursos limitados em contextos de múltiplas vulnerabilidades, baseada em análises quantitativas de pontos críticos.
- **Treinamento e Capacitação:** Desenvolvimento de materiais didáticos e exemplos práticos para formação de pessoal especializado em análise geoespacial avançada para planejamento militar.

Capítulo 6

ANÁLISE E DISCUSSÃO PRELIMINAR

6.1 Potencialidades da Abordagem Proposta

A abordagem baseada em grafos geoespaciais multicamadas oferece potencialidades significativas para o planejamento militar em cenários urbanos complexos:

- **Representação Integrada:** A capacidade de modelar simultaneamente múltiplas dimensões do ambiente operacional (terreno, clima, considerações civis) numa estrutura unificada permite análises mais abrangentes e contextualizadas.
- **Captura de Relações Não-lineares:** A estrutura de grafo possibilita a identificação de relações complexas e não-lineares entre elementos do ambiente operacional, superando limitações de abordagens analíticas tradicionais.
- **Adaptabilidade a Diferentes Cenários:** A metodologia proposta é flexível o suficiente para ser aplicada em diversos contextos urbanos, incluindo outras áreas além de Sorocaba que apresentem vulnerabilidades similares.
- **Expansibilidade:** A estrutura desenvolvida pode ser futuramente expandida para incorporar novas camadas de análise ou integrar-se com outras metodologias e técnicas analíticas.

6.2 Desafios e Limitações

A implementação da metodologia proposta enfrenta desafios que precisam ser considerados:

- **Qualidade dos Dados Abertos:** A precisão, atualização e disponibilidade dos dados abertos utilizados impactam diretamente a qualidade da representação em grafo, particularmente em áreas com menor cobertura de dados.
- **Complexidade Computacional:** A construção e análise de grafos multicamadas para áreas urbanas extensas pode exigir recursos computacionais significativos, especialmente quando preparados para processamento por GNN.
- **Validação em Contextos Reais:** A validação rigorosa da metodologia em situações de crise reais apresenta desafios práticos e éticos, demandando abordagens alternativas de validação, como simulações e exercícios controlados.
- **Integração com Práticas Existentes:** A incorporação de novas metodologias baseadas em grafos no fluxo de trabalho operacional existente requer estratégias de capacitação e gestão de mudança.

6.3 Implicações para Pesquisas Futuras

Os resultados desta pesquisa estabelecerão bases para desenvolvimentos futuros em múltiplas direções:

- **Aplicação de GNN:** O framework proposto criará as condições para implementação de arquiteturas de Redes Neurais de Grafos especializadas em análise geoespacial militar, permitindo análises preditivas avançadas.
- **Integração Multimodal:** Possibilidade de incorporação de outras fontes de dados, como imagens de satélite, sensoriamento remoto e dados em tempo real de sensores urbanos.
- **Análise Preditiva:** Evolução para capacidades de previsão de vulnerabilidades e simulação de cenários, incorporando modelagem temporal avançada.
- **Aplicações Civas:** Adaptação da metodologia para análise de riscos em contextos civis, como planejamento urbano resiliente, gestão de desastres naturais e proteção de infraestruturas críticas.

Capítulo 7

CRONOGRAMA

O desenvolvimento da pesquisa está planejado para o período de 6 meses, seguindo as etapas detalhadas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Cronograma de execução da pesquisa.

2*Atividade	Mês					
	1º	2º	3º	4º	5º	6º
Revisão bibliográfica aprofundada	X	X				
Levantamento e aquisição de dados	X	X				
Pré-processamento e preparação dos dados		X	X			
Desenvolvimento dos algoritmos de construção do grafo			X	X		
Implementação das camadas do grafo				X	X	
Integração das camadas					X	X
Adaptação para compatibilidade com GNN					X	X
Estudo de caso e validação						X
Análise dos resultados						X
Redação e revisão da dissertação			X	X	X	X
Defesa da dissertação						X

Capítulo 8

CONCLUSÃO

A metodologia proposta para construção de grafos geoespaciais multicamadas representa uma abordagem inovadora para análise integrada de terreno, condições meteorológicas e considerações civis, aproveitando a abundância de dados abertos disponíveis para criar uma base estruturada para o planejamento de operações militares em cenários urbanos vulneráveis a eventos críticos.

A integração sistemática de múltiplas camadas de informação geoespacial em uma estrutura unificada de grafo permite capturar as interdependências entre diferentes domínios de análise, superando limitações de abordagens compartimentadas. A formalização matemática das relações entre elementos do ambiente operacional viabiliza análises quantitativas rigorosas, fundamentando decisões estratégicas com maior objetividade.

A aplicação específica desta metodologia à região de Sorocaba-SP, escolhida estrategicamente devido à sua relevância no contexto do Programa de Submarinos da Marinha (PRO SUB) e potenciais riscos nucleares associados, demonstra o potencial da abordagem para analisar situações complexas de segurança nacional. Esta escolha permite testar a metodologia em um cenário real que combina características urbanas diversificadas com infraestruturas críticas específicas.

Ao focalizar exclusivamente no desenvolvimento de uma metodologia baseada em dados abertos e acessíveis, esta pesquisa estabelece um paradigma prático e replicável, que pode ser implementado em diversos contextos operacionais sem dependência de fontes restritas de informação. Simultaneamente, a estrutura proposta é intencionalmente projetada para permitir futura integração com técnicas avançadas de inteligência artificial, particularmente Redes Neurais de Grafos.

Esta pesquisa posiciona-se na intersecção entre geoprocessamento avançado, análise militar e ciência de dados, estabelecendo fundações metodológicas sólidas para evolução das práticas de planejamento. A abordagem transcende o caso específico do planejamento militar, oferecendo potenciais contribuições para campos correlatos como gestão de emergências, planejamento urbano resiliente e análise de vulnerabilidades em infraestruturas críticas.

Os desafios inerentes à implementação desta metodologia não são triviais, incluindo questões de qualidade dos dados abertos, complexidade de integração e validação em cenários reais. Contudo, as contribuições esperadas em termos de capacidade analítica, fundamentação objetiva para tomada de decisão e potencial para avanços subsequentes justificam plenamente o investimento metodológico proposto.

Capítulo 9

REFERÊNCIAS

Referências Bibliográficas

- [1] BRASIL. Exército. Comando de Operações Terrestres. Processo de Integração Terreno, Condições Meteorológicas, Inimigo e Considerações Civas – PITCIC. EB70-MC-10.336. 1 ed. Brasília, DF: COTER, 2023.
- [2] BOCCALETTI, S.; BIANCONI, G.; CRIADO, R.; DEL GENIO, C.I.; GÓMEZ-GARDEÑES, J.; ROMANCE, M.; SENDIÑA-NADAL, I.; WANG, Z.; ZANIN, M. The structure and dynamics of multilayer networks. *Physics Reports*, v. 544, n. 1, p. 1-122, 2014.
- [3] WU, Z.; PAN, S.; CHEN, F.; LONG, G.; ZHANG, C.; YU, P.S. A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, v. 32, n. 1, p. 4-24, 2021.
- [4] ZHANG, Y.; LIU, X.; ZHOU, X.; WANG, Y.; WANG, C.; LU, C.; LI, Z. Incorporating multimodal context information into traffic speed forecasting through graph deep learning. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 37, n. 9, p. 1909-1935, 2023.
- [5] ZHOU, X.; ZHANG, X.; SHEN, Z.; WANG, Z.; ZHANG, Y. Large-scale cellular traffic prediction based on graph convolutional networks with transfer learning. *Neural Computing and Applications*, v. 34, p. 5549-5559, 2022.
- [6] KIPF, T.N.; WELING, M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2017.
- [7] VELIČKOVIĆ, P.; CUCURULL, G.; CASANOVA, A.; ROMERO, A.; LIÒ, P.; BENGIO, Y. Graph Attention Networks. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2018.
- [8] ROSSI, E.; CHAMBERLAIN, B.; FRASCA, F.; EYNARD, D.; MONTI, F.; BRONSTEIN, M. Temporal Graph Networks for Deep Learning on Dynamic Graphs. *ICML Workshop on Graph Representation Learning*, 2020.
- [9] YUAN, H.; YU, H.; GUI, S.; JI, S. Explainability in graph neural networks: A taxonomic survey. *arXiv preprint arXiv:2012.15445*, 2021.

- [10] GAO, S. Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI). University of Wisconsin–Madison, 2021.
- [11] BATTAGLIA, P.W.; HAMRICK, J.B.; BAPST, V.; SANCHEZ-GONZALEZ, A.; ZAMBALDI, V.; MALINOWSKI, M.; TACCHETTI, A.; RAPOSO, D.; SANTORO, A.; FAULKNER, R.; GULCEHRE, C. Relational inductive biases, deep learning, and graph networks. *arXiv preprint arXiv:1806.01261*, 2018.
- [12] FEY, M.; LENSSEN, J.E. Fast graph representation learning with PyTorch Geometric. *arXiv preprint arXiv:1903.02428*, 2019.
- [13] WANG, X.; BO, D.; SHI, C.; FAN, S.; YE, Y.; YU, P.S. A survey on heterogeneous graph embedding: Methods, techniques, applications and sources. *arXiv preprint arXiv:1911.00416*, 2019.
- [14] SAYED, N.; BRATTICH, E.; PRANDI, R.; TIESI, A.; BAROZZI, R.; COLUCCI, E.; BENETELLO, F. Urban areas geodatabases and remote sensing techniques for critical infrastructures and key resources identification, assessment and protection. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, v. 42, 2018.
- [15] CAO, J.; ZENG, X.; ZHANG, Y.; WANG, S.; HUANG, B.; ZHANG, F. Urban Function Recognition Through Graph Neural Networks: A Methodological Perspective. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 115, p. 103107, 2023.

Capítulo 10

GLOSSÁRIO

- **AECOPE:** Área, Estruturas, Capacidades, Organizações, População e Eventos - Metodologia de análise de considerações civis.
- **ANA:** Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.
- **CEMADEN:** Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais.
- **GAT:** Graph Attention Networks - Redes Neurais de Grafos com mecanismo de atenção.
- **GCN:** Graph Convolutional Networks - Redes Neurais Convolucionais de Grafos.
- **GDAL:** Geospatial Data Abstraction Library - Biblioteca para processamento de dados geoespaciais.
- **GNN:** Graph Neural Networks - Redes Neurais de Grafos.
- **IBGE:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- **INMET:** Instituto Nacional de Meteorologia.
- **IPEA:** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.
- **PITCIC:** Processo de Integração Terreno, Condições Meteorológicas, Inimigo e Considerações Civis.
- **PRO SUB:** Programa de Desenvolvimento de Submarinos da Marinha do Brasil.
- **PyG:** PyTorch Geometric - Framework para implementação de GNN.
- **QBRN:** Químico, Biológico, Radiológico e Nuclear.
- **QGIS:** Quantum GIS - Software livre para análise de dados geoespaciais.
- **SIRGAS 2000:** Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas.

- **SRTM:** Shuttle Radar Topography Mission - Modelo digital de elevação global.
- **TGN:** Temporal Graph Networks - Redes Neurais de Grafos com capacidade temporal.
- **WorldClim:** Base de dados climáticos global.