

Aluno: LUIS FELIPE COMODO SEELIG

Orientador: RENATO ELISEU COSTA

Curso: MBA em Data Science e Analytics

Sistema Inteligente de Apoio à Evacuação Urbana com Integração de GNN e Cobertura ERB

Introdução

A crescente complexidade das dinâmicas urbanas, associada à maior exposição de áreas densamente povoadas a eventos extremos — como desastres ambientais, incidentes Químicos, Biológicos, Radiológicos e Nucleares (QBRN), e ameaças à infraestrutura crítica — impõe desafios significativos para a gestão de crises e a proteção da população civil. Nesse contexto, a coordenação eficaz de evacuações que sejam simultaneamente rápidas, seguras e com conectividade garantida emerge como um dos principais gargalos operacionais, especialmente para a transmissão de alertas e orientações em tempo real (JONER; AVILA; MATTEDI, 2021; SOUSA et al., 2020).

Os avanços recentes na inteligência artificial aplicada ao geoprocessamento têm proporcionado novas abordagens para enfrentar esse problema. Destacam-se as **Redes Neurais de Grafos (Graph Neural Networks – GNNs)**, arquiteturas computacionais capazes de modelar e inferir padrões em estruturas complexas compostas por entidades interconectadas — como malhas viárias, edificações, infraestruturas de telecomunicação e zonas de risco (WU et al., 2020; ZHOU et al., 2020). Estes modelos têm demonstrado resultados promissores em aplicações relacionadas à mobilidade urbana, detecção de anomalias, monitoramento ambiental e otimização logística (LI et al., 2018; BRONSTEIN et al., 2021).

Em paralelo, a crescente disponibilidade de dados geoespaciais detalhados sobre infraestruturas críticas — como as **Estações Rádio Base (ERBs)** regulamentadas pela

Anatel, instalações estratégicas (hospitais, escolas, ginásios), redes viárias e elementos hidrográficos — viabiliza a construção de **modelos multicamadas baseados em grafos**, alinhados com o framework militar **PITCIC** (Processo de Integração Terreno, Condições Meteorológicas, Inimigo e Considerações Civas). Essa abordagem metodológica permite a integração sistemática de múltiplas dimensões do ambiente operacional, fornecendo base sólida para simulações de propagação de ameaças em áreas urbanas complexas (ZHOU et al., 2020).

Neste cenário, o presente projeto propõe o desenvolvimento de um **sistema inteligente de apoio à evacuação urbana**, baseado na integração inovadora entre dados de cobertura de ERBs e o modelo geoespacial multicamadas fundamentado no PITCIC. O sistema utilizará Redes Neurais de Grafos para:

1. Prever a dispersão de agentes QBRN considerando condições meteorológicas, topografia e características urbanas;
2. Identificar populações sob cobertura ativa de ERBs nas zonas afetadas, em risco iminente ou em áreas seguras;
3. Direcionar, via sistema de mensagens de emergência, recomendações personalizadas conforme a localização e o risco específico: rotas de evacuação para áreas seguras, orientações de busca por atendimento médico para zonas já afetadas, ou direcionamento para locais de refúgio como estádios e ginásios para populações em áreas circunvizinhas.

A originalidade desta proposta reside na incorporação das ERBs como camada adicional no grafo geoespacial multicamadas do PITCIC, transformando a infraestrutura de telecomunicações de mero canal de comunicação em componente estratégico para mapeamento populacional dinâmico e disseminação regionalizada de alertas. O trabalho preenche uma lacuna científica significativa na literatura sobre alertas georreferenciados em cenários QBRN, além de oferecer uma solução prática e implementável para instituições responsáveis pela gestão de emergências, como Forças Armadas, Defesa Civil e órgãos municipais de proteção e defesa.

Objetivo

Objetivo Geral:

Desenvolver um sistema inteligente de apoio à evacuação urbana com base na integração

de dados geoespaciais multicamadas do modelo PITCIC e da infraestrutura de Estações Rádio Base (ERBs), utilizando Redes Neurais de Grafos (GNNs) para prever áreas de risco de contaminação QBRN e orientar, de forma regionalizada, populações afetadas ou em risco por meio de mensagens de emergência direcionadas.

Objetivos Específicos:

- Modelar um grafo geoespacial multicamadas representando a malha urbana, a topografia, a hidrografia, a densidade populacional e a localização das ERBs.
- Integrar os dados técnicos de cobertura das ERBs ao grafo PITCIC, permitindo a identificação de populações conectadas a cada estação rádio base.
- Desenvolver um modelo preditivo com GNNs para simular a dispersão espacial de agentes QBRN, considerando variáveis como relevo, vento e curso d'água.
- Implementar regras automatizadas de decisão, a partir das saídas da GNN, para definir o tipo e o conteúdo de mensagens de emergência por zona de cobertura ERB.
- Validar o sistema por meio de simulações, medindo acurácia das predições, cobertura populacional atingida e tempo de resposta do sistema.

Metodologia ou Material e Métodos

Esta pesquisa será conduzida de forma **quantitativa, aplicada e exploratória**, com foco na construção de um sistema de apoio à evacuação urbana baseado em dados geoespaciais e aprendizado de máquina. As atividades serão divididas em quatro grandes fases:

1. Levantamento e Integração de Dados

- Coleta de dados abertos (Anatel, OpenCellID, IBGE, OSM) referentes às ERBs, setor censitário, vias, hidrografia e edificações prioritárias.
- Georreferenciamento e padronização dos dados em ferramentas como QGIS, GeoPandas e PostGIS.

2. Construção do Grafo Geoespacial (PITCIC + ERBs)

- Modelagem do ambiente urbano como grafo multicamadas, unindo informações de terreno, clima, considerações civis e agora telecomunicações.
- Inserção dos nós (instalações críticas, cruzamentos, ERBs) e arestas (conectividade viária, relações de cobertura e proximidade).

3. Modelagem Preditiva com GNNs

- Implementação de modelos em PyTorch Geometric, utilizando arquiteturas GCN, GAT ou TGN.
- Treinamento para previsão de zonas afetadas e identificação de rotas seguras, considerando efeitos QBRN.

4. Simulação e Geração de Alertas

- Criação de um módulo de decisão para disparo de alertas via ERBs.
- Definição de mensagens específicas para cada zona de risco (atendimento médico, fuga, refúgio).
- Validação com cenários simulados, aferindo acurácia, cobertura populacional e tempo de resposta.

Resultados Esperados

Espera-se que a realização desta pesquisa resulte em um sistema inteligente funcional capaz de integrar dados geoespaciais multicamadas com informações técnicas de Estações Rádio Base (ERBs), utilizando Redes Neurais de Grafos (GNNs) para prever, com razoável acurácia, zonas urbanas sob risco de contaminação por agentes QBRN. A partir dessa modelagem, o sistema deverá ser capaz de:

- Classificar e priorizar setores urbanos conforme o grau de exposição e urgência de evacuação;
- Direcionar alertas automatizados e regionalizados, enviados via ERBs, contendo orientações customizadas de acordo com a situação de risco local;

- Apontar rotas de evacuação viáveis e seguras, considerando conectividade, topografia e integridade da infraestrutura de telecomunicações;
- Sugerir pontos de acolhimento estratégicos, como hospitais, ginásios ou estádios, de acordo com a posição geográfica e grau de risco.

Com isso, o trabalho pretende demonstrar que a integração entre infraestrutura de telecomunicações, análise geoespacial e modelos de IA baseados em grafos pode gerar uma solução robusta e replicável para gestão de crises urbanas. Espera-se também que a pesquisa forneça evidências da viabilidade técnica e operacional de sistemas de alerta antecipado baseados em ERBs, colaborando para a evolução de políticas públicas de proteção civil e de estratégias operacionais de defesa.

Por fim, espera-se que o protótipo desenvolvido possa ser utilizado como prova de conceito para futuras implementações por órgãos como a Defesa Civil, prefeituras ou comandos militares regionais, evidenciando o impacto positivo da aplicação de Data Science e Analytics na mitigação de desastres e na proteção de populações vulneráveis.

Cronograma de Atividades

Etapa	Início	Término
Levantamento bibliográfico e referencial teórico	27/03/2025	03/04/2025
Estruturação do projeto de pesquisa (entrega oficial)	27/03/2025	03/04/2025
Coleta e organização dos dados geoespaciais e técnicos das ERBs	05/04/2025	25/04/2025
Construção do grafo PITCIC com integração da camada ERB	26/04/2025	20/05/2025
Modelagem preditiva com GNNs e testes iniciais	21/05/2025	09/06/2025
Geração de cenários simulados e resultados preliminares	10/06/2025	17/06/2025
Implementação do sistema de alerta e simulação de envio de SMS	18/06/2025	15/07/2025
Avaliação dos resultados e ajustes no modelo	16/07/2025	15/08/2025
Redação do TCC (capítulos: introdução à conclusão)	16/08/2025	15/09/2025
Revisão, formatação e entrega final do TCC	16/09/2025	30/09/2025

Referências

- [1] BRONSTEIN, M. M.; BRUNA, J.; COHEN, T.; VELIČKOVIĆ, P. Geometric deep learning: Grids, groups, graphs, geodesics, and gauges. *arXiv preprint arXiv:2104.13478*, 2021.

- [2] JONER, K.; AVILA, M. R. R.; MATTEDI, M. A. Territorialidade e desastre: a gestão dos desastres no Brasil com base no estudo de caso da Defesa Civil em Santa Catarina. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13, e20200061, 2021.
- [3] CENTRO DE DOCTRINA DO EXÉRCITO. **EB70-MC-10.336 - Manual de Campanha: Processo de Integração Terreno, Condições Meteorológicas, Inimigo e Considerações Civas – PITCIC**. 1. ed. Brasília: COTER, 2022.
- [4] LI, Y.; YU, R.; SHAHABI, C.; LIU, Y. Diffusion convolutional recurrent neural network: Data-driven traffic forecasting. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2018.
- [5] SOUSA, A. M. de; LIMA, V. B.; SILVA, D. F. da. Aplicações de tecnologias móveis em situações de emergência: uma revisão sistemática. *Revista de Gestão e Projetos (GeP)*, v. 11, n. 2, p. 45–59, 2020.
- [6] 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.
- [7] ZHOU, J.; CUI, G.; ZHANG, Z.; YANG, C.; LIU, Z.; WANG, L.; LI, C.; SUN, M. Graph neural networks: A review of methods and applications. *AI Open*, v. 1, p. 57–81, 2020.