

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Alice Coutinho Menezes de Paula

**APOIO À DECISÃO PARA EMPREGO DE AERONAVES
DE ASA FIXA EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA**

Trabalho de Graduação
2025

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Alice Coutinho Menezes de Paula

**APOIO À DECISÃO PARA EMPREGO DE AERONAVES
DE ASA FIXA EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA**

Orientador

Evandro José da Silva (ITA)

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Coutinho Menezes de Paula, Alice
Apoio à decisão para emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência / Alice Coutinho Menezes de Paula.
São José dos Campos, 2025.
58f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2025. Orientador: Evandro José da Silva.

1. Desastres. 2. Aeronaves de asa fixa. 3. Bow-Tie. 4. Resgate. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COUTINHO MENEZES DE PAULA, Alice. **Apoio à decisão para emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência**. 2025. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Alice Coutinho Menezes de Paula

TÍTULO DO TRABALHO: Apoio à decisão para emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2025

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização da autora.

Alice Coutinho Menezes de Paula
Rua H8A, apto 135
12228-460 – São Paulo, SP

APOIO À DECISÃO PARA EMPREGO DE AERONAVES DE ASA FIXA EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Alice Coutinho Menezes de Paula

Autora

Evandro José da Silva (ITA)

Orientador

São José dos Campos, 11 de Novembro de 2025.

À minha família, pelo apoio incondicional e pela força que sempre me inspirou a seguir em frente e nunca desistir.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, a Deus, por me conceder força, sabedoria e calma em todos os momentos desta trajetória.

Aos meus pais, Flávio e Monique, pelo apoio incondicional, pela força nos momentos de dificuldade e pela inspiração ao longo de toda a minha vida.

Aos meus irmãos, Davi e Guilherme, pela presença, pelo carinho e por caminharem ao meu lado em todos os momentos, e aos meus primos, Léo e Carol, minhas primeiras referências de força e determinação, que desde a infância me ensinaram, pelo exemplo, a nunca desistir.

Às minhas avós, Iara e Zazá, pelo apoio, pelo cuidado e pelo conforto que tornaram esta jornada mais leve.

Às minhas tias, Jackeline e Sormane, pela alegria, pelas risadas e pela leveza que sempre trouxeram à minha vida. A memória da tia Sormane seguirá para sempre comigo.

Ao apartamento 135, Bruna, Emily e Isabel, pela amizade e pelo apoio que tornaram possível a conclusão deste trabalho. Vocês são inspirações para mim. Sem vocês, eu não teria conseguido.

Aos colegas da Civil, pelos aulões, pelos ensinamentos compartilhados e pela parceria que tornou a graduação mais leve. Vocês foram essenciais.

Aos professores da Civil, que contribuíram de forma marcante para minha formação. Em especial ao Prof. Evandro, meu orientador, cuja dedicação, paciência e orientação foram fundamentais.

Aos colegas da Turma 25, a turma mais unida que já passou por este Instituto, pela amizade, pelo apoio e pelo incentivo mútuo que fizeram toda a diferença ao longo do caminho.

Aos professores do Pensi, especialmente ao Prof. Lucas Herlin, pela força e pela confiança transmitidas durante o cursinho, e ao alojamento do Pensi, pelo acolhimento e pelas amizades durante o meu período de preparação.

À Escola Carrossel, onde tudo começou, pelas primeiras lições que despertaram em mim a curiosidade, o senso de propósito e o prazer de aprender.

*“Não se deve ir atrás de objetivos fáceis,
é preciso buscar o que só pode ser alcançado
por meio dos maiores esforços.”*

— ALBERT EINSTEIN

Resumo

O presente trabalho propõe uma metodologia de apoio à decisão para o emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência, integrando três dimensões: vulnerabilidade geográfico-climática, mitigação de riscos e condições operacionais. A metodologia articula a padronização conceitual de ameaças, a quantificação do isolamento territorial por meio de um Índice de Isolamento Geográfico (IIG) e a modelagem de causas e barreiras de recuperação pelo método *Bow-Tie*. O modelo é aplicado ao desastre ocorrido em Jucuruçu (BA), entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022, marcado por enchentes e deslizamentos. O município apresenta vulnerabilidade geográfico-climática média-alta, e o método *Bow-Tie* destaca o transporte de suprimentos, a evacuação médica e o reconhecimento aéreo como funções prioritárias. A análise operacional indica o aeródromo de Teixeira de Freitas como base preferencial e recomenda o emprego combinado de aeronaves leves e médias, assegurando flexibilidade e rapidez na resposta. Os resultados demonstram o potencial da metodologia para reduzir incertezas e apoiar decisões rápidas e fundamentadas. Apesar de limitações relacionadas à simplificação do IIG e à ausência de custos e tempos operacionais, a abordagem oferece uma estrutura prática e replicável para o planejamento do emprego aéreo em desastres, contribuindo para a eficiência e a coordenação das ações de resposta.

Abstract

This study proposes a decision-support methodology for the employment of fixed-wing aircraft in emergency situations, integrating three dimensions: geoclimatic vulnerability, risk mitigation, and operational conditions. The methodology articulates the conceptual standardization of hazards, the quantification of territorial isolation through a Geographic Isolation Index (GII), and the modeling of causes and recovery barriers using the *Bow-Tie* method. The model is applied to the disaster that occurred in Jucuruçu, Bahia, between December 2021 and January 2022, marked by floods and landslides. The municipality presents medium-high geoclimatic vulnerability, and the *Bow-Tie* method highlights supply transport, medical evacuation, and aerial reconnaissance as priority recovery functions. The operational analysis identifies Teixeira de Freitas as the preferred air base and recommends the combined use of light and medium aircraft to ensure flexibility and rapid response. The results demonstrate the potential of the methodology to reduce uncertainty and support fast and evidence-based decisions. Despite limitations related to the simplified nature of the isolation index and the absence of cost and time variables, the approach offers a practical and replicable framework for planning the aerial employment of fixed-wing aircraft in disaster response, contributing to greater efficiency and coordination of emergency actions.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Classificação dos desastres naturais segundo a EM-DAT. Fonte: Preparado com base em CRED (2025).	17
FIGURA 2.2 – Classificação dos desastres tecnológicos segundo a EM-DAT. Fonte: Preparado com base em CRED (2025).	17
FIGURA 2.3 – Distribuição das ocorrências de desastres no Brasil por subgrupo (1991-2024). Fonte: Preparado com base em BRASIL (2024).	20
FIGURA 2.4 – Distribuição das ocorrências de desastres no Brasil por tipo (1991-2024). Fonte: Preparado com base em BRASIL (2024).	20
FIGURA 2.5 – Distribuição dos registros de desastres no Brasil por ano (1991-2024). Fonte: Preparado com base em BRASIL (2024).	21
FIGURA 2.6 – Distribuição das ocorrências de desastres no Brasil por tipo e por região (1991-2024). Fonte: Preparado com base em BRASIL (2024).	21
FIGURA 2.7 – Relação entre frequência e severidade média dos desastres no Brasil (1991-2024). Fonte: Preparado com base em BRASIL (2024).	22
FIGURA 2.8 – Representação esquemática da estrutura do método <i>Bow-Tie</i> . Fonte: JORDÃO (2021).	24
FIGURA 3.1 – Fluxo geral da metodologia para apoio à decisão no emprego de aeronaves de asa fixa em emergências. Fonte: Preparado pela autora.	26
FIGURA 3.2 – Mapa de densidade populacional do Brasil em 2020. Fonte: WorldPop (2025).	28
FIGURA 3.3 – Visualização logarítmica da densidade populacional em São Paulo (SP), representando zona de baixo isolamento geográfico segundo o modelo de IIG. Fonte: Preparado pela autora.	31

FIGURA 3.4 – Visualização logarítmica da densidade populacional em Nobres (MT), representando zona de médio isolamento geográfico segundo o modelo de IIG. Fonte: Preparado pela autora.	31
FIGURA 3.5 – Visualização logarítmica da densidade populacional em São Gabriel da Cachoeira (AM), representando zona de alto isolamento geográfico segundo o modelo de IIG. Fonte: Preparado pela autora.	32
FIGURA 3.6 – Mapa de Climats do Brasil. Fonte: IBGE (2002).	33
FIGURA 3.7 – Exemplo ilustrativo do diagrama <i>Bow-Tie</i> com causas, medidas de mitigação e consequências. Fonte: Preparado com base em JORDÃO (2021).	37
FIGURA 3.8 – Distribuição dos aeródromos públicos e privados no Brasil. Fonte: Preparado com base em ANAC (2025).	39
FIGURA 3.9 – Mapa das rodovias federais e estaduais do Brasil. Fonte: Garcia e Filho (2021).	41
FIGURA 4.1 – Enchente em Jucuruçu (BA), dezembro de 2021. Parte da área urbana foi completamente alagada após o transbordamento do rio Jucuruçu. Fonte: Globo (2021).	45
FIGURA 4.2 – Localização de Jucuruçu (BA) no mapa nacional de Índice de Isolamento Geográfico (IIG). Fonte: Preparado pela autora.	47
FIGURA 4.3 – Modelo <i>Bow-Tie</i> aplicado ao evento de inundação em Jucuruçu (BA). Fonte: Preparado pela autora.	49
FIGURA 4.4 – Aeródromos mais próximos ao município de Jucuruçu (BA), identificados pelo código CIAD. Fonte: Preparado com base em ANAC (2025).	50

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Padronização das tipologias de desastres do Atlas Digital de Desastres do Brasil conforme o padrão internacional EM-DAT/IRDR. Fonte: Preparado com base em CRED (2025) e BRASIL (2024).	19
TABELA 3.1 – Classificação de vulnerabilidade territorial com base na integração entre isolamento geográfico e condições climáticas associadas a cada tipo de desastre. Fonte: Preparado pela autora.	35
TABELA 3.2 – Componentes do <i>Bow-Tie</i> adaptado para desastres naturais. Fonte: Preparado com base em JORDÃO (2021).	37
TABELA 3.3 – Quadro de decisão para o emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência. Fonte: Preparado pela autora.	42
TABELA 3.4 – Características técnicas de aeronaves de asa fixa para operações emergenciais.	44
TABELA 4.1 – Classificação integrada de vulnerabilidade geográfico-climática e interpretação operacional para o município de Jucuruçu (BA). Fonte: Preparado pela autora.	48
TABELA 4.2 – Aeródromos mais próximos ao município de Jucuruçu (BA). Fonte: Preparado com base em ANAC (2025). Abreviações: Priv.=Privado; Púb.=Público; VFR D=VFR Diurno; VFR D/N=VFR Diurno/Noturno.	51
TABELA 4.3 – Síntese operacional, decisão de emprego e aeronaves compatíveis para o município de Jucuruçu (BA). Fonte: Preparado pela autora.	52

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivo	15
2	FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL	16
2.1	Classificação das ameaças	16
2.2	Padrões e relevância operacional das ameaças	19
2.2.1	Emprego de aeronaves de asa fixa em operações de emergência	22
2.2.2	Método <i>Bow-Tie</i> como estrutura de análise de risco	24
3	METODOLOGIA	26
3.1	Identificação do local e mapeamento de vulnerabilidades	27
3.1.1	Vulnerabilidade associada ao isolamento geográfico	28
3.1.2	Vulnerabilidade associada às condições climáticas	33
3.1.3	Integração das vulnerabilidades geográficas e climáticas	34
3.2	Modelagem de mitigação de riscos com o método <i>Bow-Tie</i>	35
3.2.1	Adaptação do <i>Bow-Tie</i> ao contexto de desastres naturais	36
3.3	Mapeamento de condições operacionais	38
3.3.1	Aeródromos públicos e privados	39
3.3.2	Rodovias pavimentadas e adaptáveis	40
3.4	Síntese operacional e decisão de emprego	41
3.4.1	Características das principais aeronaves	43
4	APLICAÇÃO	45
4.1	Identificação do local e mapeamento de vulnerabilidades	46

4.1.1	Vulnerabilidade associada ao isolamento geográfico	46
4.1.2	Vulnerabilidade associada às condições climáticas	47
4.1.3	Integração das vulnerabilidades geográficas e climáticas	48
4.2	Modelagem de mitigação de riscos com o método <i>Bow-Tie</i>	48
4.3	Mapeamento de condições operacionais	50
4.4	Síntese operacional e decisão de emprego	51
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56

1 Introdução

1.1 Motivação

Eventos extremos, como inundações e estiagens, produzem impactos diretos sobre comunidades vulneráveis e colocam à prova a capacidade do Estado em prover resposta rápida e coordenada. Em regiões isoladas ou com infraestrutura limitada, o transporte aéreo emerge como um meio essencial para operações de resgate, suprimento e evacuação. No entanto, as decisões sobre quando e como empregar aeronaves ainda são fortemente baseadas em experiência empírica e não em critérios sistematizados como vulnerabilidade territorial, capacidade logística e viabilidade operacional. Essa lacuna justifica o desenvolvimento de metodologias que apoiem, de forma estruturada, a decisão sobre o uso da aviação, especialmente da asa fixa, em situações de emergência.

Entre os estudos que abordam o emprego de meios aéreos em desastres Xavier, Bandeira e Bandeira (2015) analisam o papel das aeronaves de asa rotativa em operações de resposta, considerando missões de transporte logístico, busca e resgate e evacuação aeromédica em três grandes desastres: o tsunami no Oceano Índico em 2005, o furacão nos Estados Unidos em 2005 e as enchentes e deslizamentos ocorridos no Brasil em 2011. O estudo ressalta a importância dos helicópteros pela rapidez na mobilização e pela capacidade de acesso a áreas restritas, mas também evidencia limitações operacionais relacionadas ao alcance, à autonomia e ao custo. A presente pesquisa amplia essa discussão ao direcionar o foco para aeronaves de asa fixa, cujo potencial logístico se mostra mais relevante em desastres de grande extensão territorial.

Complementarmente, a dissertação "A Logística da Força Aérea Brasileira em Resposta a Desastres: o Caso da Operação Acolhida" (SILVA, 2020) analisa a atuação da Força Aérea Brasileira (FAB) na Operação Acolhida, sob a ótica da logística interforças e da modelagem de processos. O estudo identifica avanços na coordenação de recursos e na interoperabilidade com outros órgãos do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil, mas evidencia a ausência de uma doutrina consolidada e de modelos replicáveis de decisão operacional. Essa limitação reforça a necessidade de instrumentos metodológicos que superem o relato de caso e forneçam parâmetros geoespaciais e técnicos para orientar decisões de emprego aéreo em diferentes contextos territoriais.

Por sua vez, o artigo "Logística em Desastres: Otimização de Rotas de Unidades Aéreas de Resgate"(REBOUÇAS *et al.*, 2022) propõe uma aplicação de modelos de otimização combinatória ao problema de roteirização de helicópteros em operações de resposta, utilizando dados reais da enchente de 2008 no Vale do Itajaí. O estudo demonstra ganhos de eficiência e redução de custos na alocação das aeronaves, reforçando o potencial do uso de ferramentas quantitativas no apoio à decisão logística. Contudo, sua abordagem permanece restrita à fase de resposta e ao modal de asa rotativa, sem considerar variáveis territoriais de vulnerabilidade ou infraestrutura de apoio. Essa restrição abre espaço para abordagens mais amplas que incorporem tanto a dimensão espacial do desastre quanto o papel estratégico da asa fixa na fase de planejamento.

Dessa forma, esta pesquisa se insere no cruzamento entre a logística humanitária e o planejamento territorial, buscando preencher uma lacuna ainda pouco explorada: a integração entre vulnerabilidade geográfica, mitigação de riscos e condições operacionais da aviação de asa fixa em emergências. Essa abordagem pretende fortalecer as bases analíticas que sustentam a tomada de decisão em contextos críticos, contribuindo para ampliar a eficiência e a capacidade de resposta das operações aéreas.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de apoio à decisão para o emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência, considerando vulnerabilidades geográficas e climáticas, medidas de mitigação de riscos e condições operacionais de infraestrutura. A proposta busca oferecer uma estrutura analítica capaz de identificar onde e sob quais condições o uso da aviação de asa fixa é mais necessário e viável na resposta a desastres no contexto brasileiro.

2 Fundamentação Conceitual

Esta seção apresenta os conceitos, classificações e modelos que fundamentam as etapas da metodologia proposta. Inicialmente, são abordados os principais sistemas internacionais e nacionais de classificação de desastres, que orientam a seleção das ameaças a serem analisadas. Na sequência, discutem-se os padrões de ocorrência e impacto dos principais tipos de desastre no Brasil, servindo de base para a escolha dos cenários de maior relevância operacional. Também é explorado o emprego de aeronaves de asa fixa em situações emergenciais, que sustenta as dimensões operacionais do estudo. Por fim, descreve-se o método *Bow-Tie*, adotado como estrutura teórica para representar relações causais e controles de mitigação.

2.1 Classificação das ameaças

A compreensão e a classificação dos desastres constituem um dos fundamentos centrais da gestão de riscos e da formulação de metodologias de análise territorial. No contexto deste trabalho, o enquadramento conceitual das ameaças é essencial para definir os tipos de eventos a serem considerados nas etapas de mapeamento de vulnerabilidade e decisão de emprego de aeronaves.

A EM-DAT (*Emergency Events Database*) (CRED, 2025) é uma base de dados internacional criada em 1988 pelo *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*, vinculado à Universidade Católica de *Louvain* (UCLouvain). Desde então, a EM-DAT tem se consolidado como uma das principais fontes globais de informação sobre desastres, reunindo mais de 27 mil registros de eventos desde 1900. Seu objetivo central é subsidiar a ação humanitária e a redução de riscos de desastres por meio da coleta e padronização de dados sobre a ocorrência, magnitude e impactos socioeconômicos de eventos que excedem a capacidade local de resposta. Um evento é classificado como desastre na EM-DAT quando apresenta pelo menos um dos seguintes critérios:

- Dez ou mais fatalidades;
- Cem ou mais pessoas afetadas;
- Declaração oficial de estado de emergência;

- Solicitação de assistência internacional.

A base é alimentada por múltiplas fontes oficiais e é utilizada como referência para análises de vulnerabilidade, priorização de ações e planejamento de políticas de prevenção e resposta. A EM-DAT adota uma classificação hierárquica de ameaças, dividindo-as em dois grandes grupos: naturais e tecnológicas. O grupo de desastres naturais segue a nomenclatura proposta pelo *Peril Classification and Hazard Glossary* (IRDR, 2014), que organiza os eventos em seis subgrupos principais e cada um com seus tipos, conforme apresentado na Figura 2.1.



FIGURA 2.1 – Classificação dos desastres naturais segundo a EM-DAT. Fonte: Preparado com base em CRED (2025).

Os grupos de desastres tecnológicos são classificados em três subgrupos principais, e cada um com seus respectivos tipos, conforme apresentado na Figura 2.2.



FIGURA 2.2 – Classificação dos desastres tecnológicos segundo a EM-DAT. Fonte: Preparado com base em CRED (2025).

Cada tipo de desastre é, ainda, dividido em subtipos, que detalham as variações específicas de cada evento. No entanto, para os fins deste estudo, foi considerado apenas os níveis de grupo,

subgrupo e tipo, uma vez que esses níveis representam as características físicas predominantes do evento, que são os fatores diretamente relacionados à viabilidade e adequação operacional do emprego de aeronaves.

No caso brasileiro, a principal referência é o Atlas Digital de Desastres do Brasil (BRASIL, 2024), elaborado pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, vinculada ao Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), em cooperação com o Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil (Ceped/UFSC). A plataforma reúne registros de desastres ocorridos no país desde 1991, utilizando informações declaradas pelos municípios no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD). Esses dados são verificados pela Defesa Civil Nacional e organizados por tipo de desastre, categoria de impacto e localização municipal, permitindo consultas por meio de gráficos, tabelas, mapas interativos e metadados.

A plataforma consolida os registros de desastres ocorridos no país desde 1991 até os dias atuais, utilizando informações declaradas pelos municípios no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD). Os dados são verificados pela Defesa Civil Nacional e organizados por tipo de desastre, categoria de impacto e localização municipal, permitindo consultas por meio de gráficos, tabelas, mapas interativos e metadados.

O Atlas tem como propósito subsidiar políticas públicas de prevenção, mitigação e resposta, além de apoiar a formulação de estratégias de gestão de risco e de resposta humanitária. No entanto, diferentemente da EM-DAT, a base brasileira não adota uma padronização internacional de classificação de ameaças, apresentando variações na nomenclatura e sobreposição entre categorias. Dessa forma, foi necessário padronizar os registros nacionais segundo a nomenclatura proposta pelo *Peril Classification and Hazard Glossary*, utilizada pela EM-DAT.

Inicialmente, o Atlas apresentava 14 tipos de desastres registrados, abrangendo eventos como estiagem e seca, enxurradas, inundações, vendavais e ciclones, granizo, movimento de massa, incêndios florestais, rompimentos de barragens, entre outros. Após a padronização conforme o modelo internacional, esses tipos foram reclassificados em grupos e subgrupos equivalentes, permitindo uma comparação direta com as categorias reconhecidas globalmente. O processo de padronização resulta na Tabela 2.1, que estabelece a correspondência entre as tipologias brasileiras e suas equivalentes segundo o padrão EM-DAT/IRDR.

Grupo	Subgrupo	Tipo	Tipo (padrão EM-DAT/IRDR)
Natural	Climatológico	Estiagem e Seca	Estiagem
Natural	Climatológico	Incêndio Florestal	Incêndio florestal
Natural	Hidrológico	Enxurradas	Inundação
Natural	Hidrológico	Inundações	Inundação
Natural	Hidrológico	Alagamentos	Inundação
Natural	Hidrológico	Movimento de Massa	Deslizamento
Natural	Hidrológico	Chuvas Intensas	Inundação
Natural	Meteorológico	Vendavais e Ciclones	Tempestade
Natural	Meteorológico	Granizo	Tempestade
Natural	Meteorológico	Tornado	Tempestade
Natural	Meteorológico	Onda de Frio	Temperatura extrema
Natural	Biológico	Doenças infecciosas	Epidemia
Natural	Geofísico	Erosão	Movimento de massa (seco)
Tecnológico	Acidente Industrial	Rompimento/Colapso de barragens	Colapso estrutural

TABELA 2.1 – Padronização das tipologias de desastres do Atlas Digital de Desastres do Brasil conforme o padrão internacional EM-DAT/IRDR. Fonte: Preparado com base em CRED (2025) e BRASIL (2024).

Essa correspondência conceitual constitui a base teórica da etapa de identificação e mapeamento de vulnerabilidades da metodologia. Ao normalizar os registros brasileiros com a taxonomia internacional, o estudo garante consistência na definição dos tipos de ameaça e possibilita comparar padrões nacionais com parâmetros globais de risco. A partir disso, as análises subsequentes exploram a frequência, severidade e distribuição espacial das ameaças, de modo a identificar os cenários mais relevantes para o planejamento e o emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência.

2.2 Padrões e relevância operacional das ameaças

A análise das ocorrências registradas no Atlas Digital de Desastres do Brasil permite compreender a distribuição e a frequência dos diferentes tipos de ameaça no território nacional, oferecendo uma base empírica para o mapeamento de vulnerabilidades e para a definição de cenários operacionais de maior relevância.

Entre 1991 e 2024, o Atlas registra mais de 70 mil eventos em todo o território nacional. A Figura 2.3 apresenta a distribuição das ocorrências por subgrupo de desastre, destacando o

predomínio dos eventos climatológicos (49,5%), seguidos pelos hidrológicos (39,1%) e meteorológicos (9,9%).

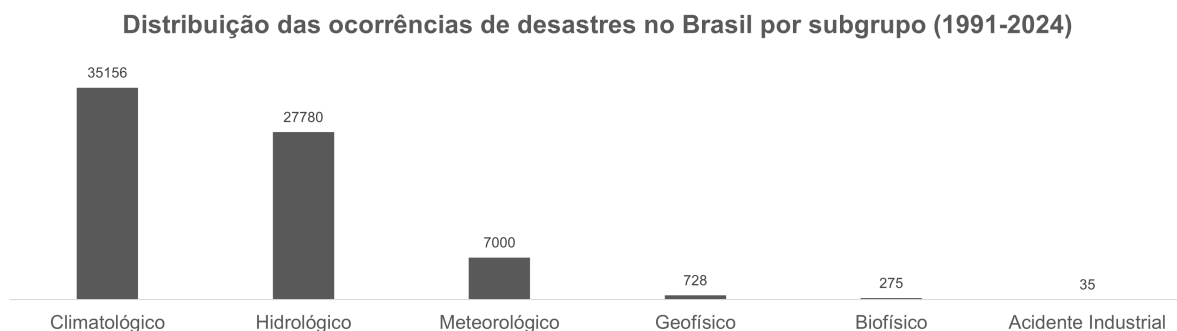


FIGURA 2.3 – Distribuição das ocorrências de desastres no Brasil por subgrupo (1991-2024). Fonte: Preparado com base em BRASIL (2024).

Em termos de tipos específicos de desastres, a Figura 2.4 mostra a predominância de estiagens e secas (31.984 ocorrências, 45,1%), seguidas de inundações (26.095, 36,8%) e tempestades (6.749, 9,5%). Esses três tipos concentram mais de 90% de todos os registros nacionais. Na sequência, aparecem incêndios florestais (4,5%), deslizamentos (2,4%) e eventos pontuais como epidemias, colapsos estruturais e movimentos de massa secos (deslocamentos de solo ou rocha que ocorrem sem a presença significativa de água, como desmoronamentos, quedas de blocos e corridas de detritos secos), com representatividade inferior a 1% cada.



FIGURA 2.4 – Distribuição das ocorrências de desastres no Brasil por tipo (1991-2024). Fonte: Preparado com base em BRASIL (2024).

A análise temporal, ilustrada na Figura 2.5, mostra um crescimento expressivo no número de ocorrências registradas na base a partir dos anos 2000, atingindo um pico entre 2020 e 2024, quando foram registrados mais de 4.500 eventos anuais.



FIGURA 2.5 – Distribuição dos registros de desastres no Brasil por ano (1991-2024). Fonte: Preparado com base em BRASIL (2024).

A distribuição regional das ocorrências, ilustrada na Figura 2.6, revela um padrão regional bem definido:

- As estiagens concentram-se majoritariamente no Nordeste (20.201) e no Sul (6.120), regiões com forte dependência das variações pluviométricas;
- As inundações predominam no Sul (9.147) e Sudeste (7.818), associadas principalmente à vulnerabilidade climática decorrente da atuação recorrente de frentes frias;
- As tempestades também são recorrentes no Sul (4.855);
- Os incêndios florestais têm maior incidência no Centro-Oeste (1.350) e Sudeste (852), coincidindo com áreas de vegetação sazonalmente seca;
- Os deslizamentos e movimentos de massa concentram-se no Sudeste, em especial nas áreas de relevo acidentado e de ocupação urbana sobre encostas instáveis.

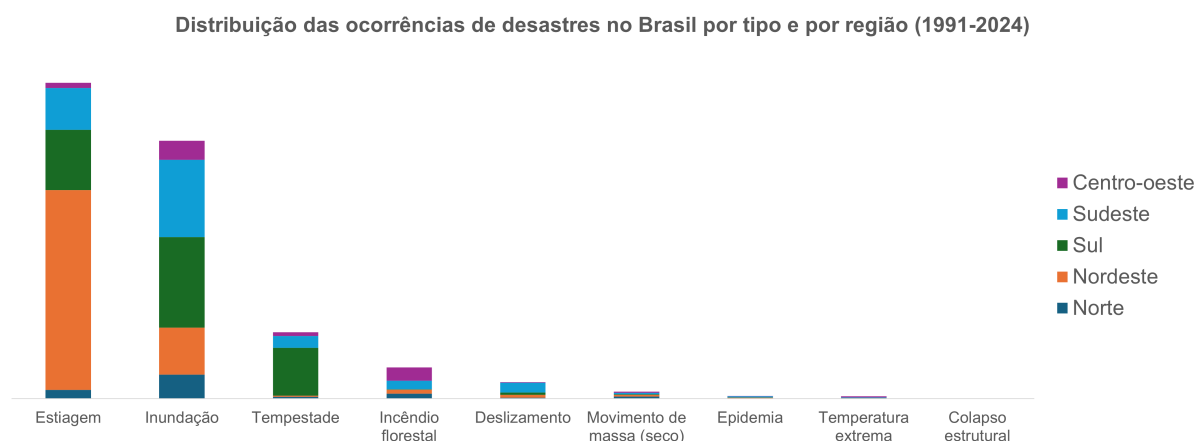


FIGURA 2.6 – Distribuição das ocorrências de desastres no Brasil por tipo e por região (1991-2024). Fonte: Preparado com base em BRASIL (2024).

O gráfico de dispersão apresentado na Figura 2.7, construído em escala logarítmica para permitir a comparação entre variáveis de diferentes ordens de magnitude, relaciona a frequência

das ocorrências com a severidade média (obtida pela razão entre o total de pessoas afetadas e o número de eventos de cada tipo). As estiagens destacam-se simultaneamente pela alta frequência e elevada severidade média (2.738 pessoas afetadas por evento), configurando-se como o principal tipo de desastre no Brasil em termos de impacto humano e territorial. As inundações, embora apresentem severidade média inferior (307 pessoas afetadas por evento), ocorrem com altíssima recorrência, o que as torna igualmente críticas. Em contraste, eventos como epidemias e colapsos estruturais apresentam baixa frequência, mas severidade elevada, refletindo seu potencial destrutivo localizado.

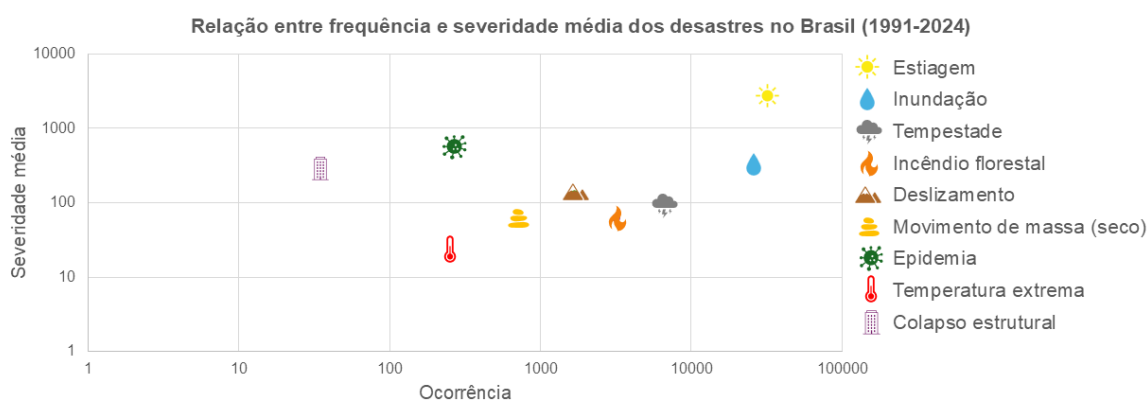


FIGURA 2.7 – Relação entre frequência e severidade média dos desastres no Brasil (1991–2024). Fonte: Preparado com base em BRASIL (2024).

Essa evidência estatística fundamenta a seleção dos cenários de maior relevância operacional. A combinação de alta frequência e grande extensão territorial nas estiagens e inundações, somada à dispersão espacial dos incêndios florestais e à gravidade de epidemias em regiões isoladas, indica que esses quatro tipos de ameaça representam o conjunto mais compatível com a aplicação da metodologia proposta.

2.2.1 Emprego de aeronaves de asa fixa em operações de emergência

A predominância de desastres climáticos e hidrológicos no Brasil — climatológicos (49,5%), hidrológicos (39,1%) e meteorológicos (9,9%) — indica que estiagens (45,1%) e inundações (36,8%) concentram a maior parte das ocorrências, seguidas por tempestades (9,5%) e incêndios florestais (4,5%). Esses quatro tipos representam mais de 95% dos registros nacionais e configuram o conjunto de ameaças mais relevantes.

Em termos de severidade média, as estiagens destacam-se com 2.738 pessoas afetadas por ocorrência, seguidas de epidemias (576) e inundações (307). Esses valores evidenciam que estiagens e inundações combinam alta frequência e impacto humano expressivo, configurando-se como os principais tipos de desastre para análise de viabilidade do emprego de aeronaves de asa fixa.

Esses resultados, aliados às diretrizes da OACI e das Diretrizes de Oslo (ICAO, 2024; OCHA, 2024), orientam a priorização de cenários compatíveis com esse tipo de aeronave: eventos recorrentes, de ampla extensão territorial e com necessidade de transporte logístico em regiões de infraestrutura limitada.

Casos reais sustentam essa escolha. Em inundações de grande escala como na Base Aérea de Canoas, que foi habilitada para voos de passageiros e cargas durante as enchentes de 2024, viabilizando logística aérea emergencial na região metropolitana de Porto Alegre (Força Aérea Brasileira, 2024). Em incêndios florestais no Pará em 2020, a FAB empregou o C-130 Hércules com sistema MAFFS para combate e apoio logístico (Força Aérea Brasileira, 2020). Na crise Yanomami, em 2023, houve ponte aérea de insumos, pacientes e equipes com participação da FAB e de operadores contratados, evidenciando o papel da asa fixa para alcance e volume (Agência Brasil, 2024). Em inundações na Bahia, em 2021, a FAB reportou transporte aéreo logístico em apoio humanitário, reforçando a adequação da asa fixa quando há demanda regional e pistas utilizáveis (Força Aérea Brasileira, 2021).

Essas experiências confirmam a eficiência da asa fixa em desastres de grande extensão territorial, duração prolongada e necessidade logística contínua, como estiagens, inundações, incêndios florestais e epidemias em áreas isoladas. Por outro lado, em eventos localizados e súbitos, como deslizamentos e colapsos estruturais, predominam restrições espaciais e temporais que tornam mais apropriado o uso de aeronaves de asa rotativa.

A literatura e os casos operacionais convergem para três princípios que orientam o emprego de aeronaves de asa fixa em emergências:

1. Compatibilidade espacial: adequada para desastres de grande área afetada, que exigem cobertura regional e alta capacidade logística;
2. Compatibilidade temporal: mais eficiente em eventos prolongados, como estiagens e enchentes, que demandam apoio sustentado;
3. Dependência infraestrutural: o emprego depende da disponibilidade de pistas operacionais, sejam aeródromos formais ou trechos rodoviários adaptáveis.

Esses fundamentos sustentam o vínculo entre a teoria e a prática operacional, assegurando que as etapas de análise de vulnerabilidade, mitigação e decisão de emprego aéreo mantenham coerência com as diretrizes internacionais e a realidade logística brasileira.

Assim, a análise quantitativa e a revisão técnica indicam que as principais ameaças brasileiras compatíveis com o emprego de aeronaves de asa fixa são:

1. Estiagem: alta frequência e alta severidade. Adequada para o transporte de água, alimentos e medicamentos a comunidades isoladas e para o apoio logístico regional durante períodos prolongados de seca.

2. Inundação: alta frequência e severidade moderada. Indicada para reconhecimento aéreo, transporte de equipes de resgate e suprimentos e manutenção de conexões logísticas quando vias terrestres ou aeroportos estão inoperantes.
3. Incêndio florestal: frequência moderada e severidade baixa, mas ampla dispersão territorial. Útil para detecção, mapeamento e combate aéreo com sistemas de dispersão, além de transporte de carga e equipes.
4. Epidemia: baixa frequência e alta severidade. Relevante para transporte de insumos médicos, evacuação aeromédica e apoio a operações sanitárias em regiões de difícil acesso.

2.2.2 Método *Bow-Tie* como estrutura de análise de risco

O método *Bow-Tie* é uma ferramenta de análise de risco centrada em um acontecimento crítico. Sua denominação decorre da forma semelhante a uma gravata borboleta, resultante da junção entre uma árvore de falhas, à esquerda, e uma árvore de acontecimentos, à direita, conforme mostrado na Figura 2.8. Essa estrutura permite representar, em um único diagrama, tanto as causas que podem levar ao evento crítico quanto as consequências que podem advir dele, oferecendo uma visão integrada de todo o cenário de risco.

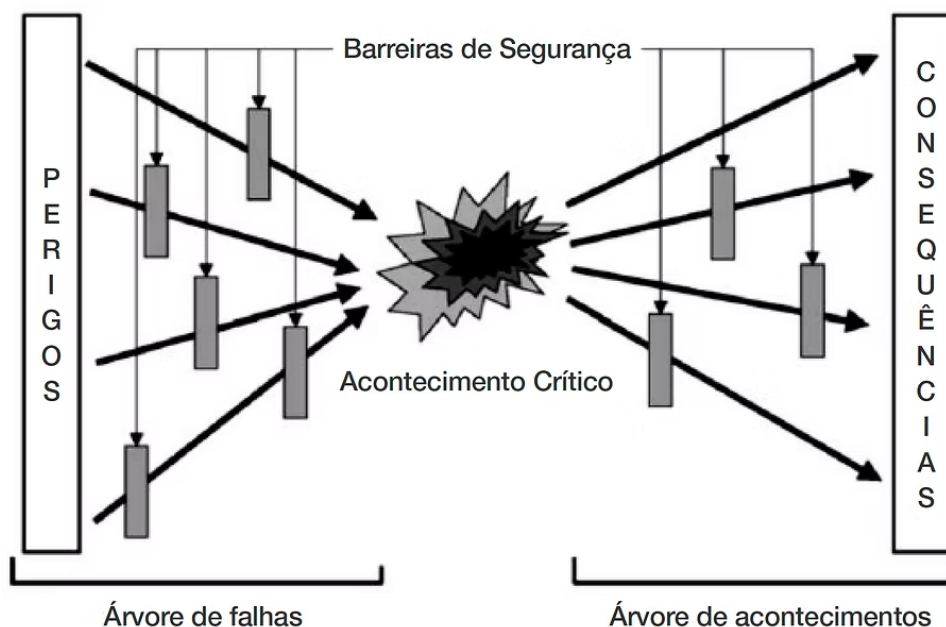


FIGURA 2.8 – Representação esquemática da estrutura do método *Bow-Tie*. Fonte: JORDÃO (2021).

Do ponto de vista estrutural, o diagrama é composto por dois ramos simétricos em relação ao evento central. O ramo esquerdo, derivado da lógica da árvore de falhas, representa a sequência de causas, falhas ou condições que podem conduzir ao acontecimento crítico. Já o ramo direito, correspondente à árvore de acontecimentos, que descreve a progressão dos efeitos e impactos

que se originam após a ocorrência do evento. Assim, o lado esquerdo do diagrama mapeia as causas e seus fatores de risco, enquanto o lado direito representa as consequências e seus desdobramentos (JORDÃO, 2021).

Entre esses elementos são representadas as barreiras de segurança, que indicam os pontos de controle existentes e a respectiva zona de atuação. Tais barreiras se dividem em duas categorias:

- Barreiras de prevenção: posicionadas entre os fatores de risco e o acontecimento crítico, têm a função de impedir que o evento se concretize;
- Barreiras de recuperação: situadas entre o acontecimento crítico e suas consequências, atuam para reduzir a gravidade dos impactos quando o evento já ocorreu.

A distinção entre essas duas classes é fundamental: a falha de uma barreira preventiva conduz diretamente ao acontecimento crítico, enquanto a falha de uma barreira de proteção não impede o evento, mas pode agravar suas consequências. Essa estrutura permite uma visualização clara e imediata de quais barreiras estão associadas a cada cenário, facilitando a identificação de lacunas de controle e a priorização de medidas corretivas.

A quantificação ou qualificação dos riscos associados a cada elemento do diagrama é um componente essencial da metodologia. Por meio dessa análise, é possível identificar ausências de barreiras ou fragilidades específicas, orientando o desenvolvimento de soluções que reduzam tanto a probabilidade de ocorrência quanto a severidade das consequências de um evento adverso (JORDÃO, 2021).

O caráter integrador do *Bow-Tie* permite associar cada barreira a mecanismos técnicos, organizacionais ou operacionais, facilitando a visualização dos pontos de intervenção e o planejamento de medidas de mitigação. A principal vantagem do método reside em sua clareza visual e lógica estruturada, que permite compreender rapidamente a dinâmica de um risco, suas causas, consequências e os pontos de intervenção possíveis. Essa característica o torna particularmente adequado para contextos complexos, como o gerenciamento de desastres, em que é necessário levar em consideração variáveis físicas, humanas e operacionais em uma representação única.

No contexto desta pesquisa, o diagrama é utilizado como base conceitual para a etapa de mitigação de riscos. Ele permite representar, para cada tipo de desastre, o encadeamento entre vulnerabilidades territoriais e climáticas, o evento de desastre em si e as possíveis formas de mitigação associadas ao emprego de aeronaves de asa fixa.

3 Metodologia

A metodologia proposta neste trabalho foi desenvolvida para apoiar a tomada de decisão quanto ao emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência, considerando as características geográficas, climáticas e operacionais do território brasileiro. O objetivo é construir uma estrutura analítica capaz de identificar onde, quando e sob quais condições o uso dessas aeronaves é mais necessário e viável.

O fluxo geral da metodologia é apresentado na Figura 3.1, que sintetiza as quatro etapas principais e o encadeamento entre seus respectivos *inputs* e *outputs*.

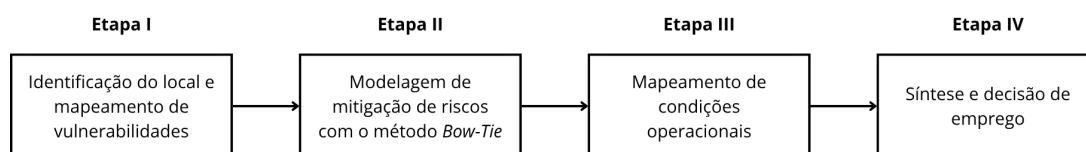


FIGURA 3.1 – Fluxo geral da metodologia para apoio à decisão no emprego de aeronaves de asa fixa em emergências. Fonte: Preparado pela autora.

Pode-se descrever cada etapa da seguinte maneira:

- 1. Etapa I – Identificação do local e mapeamento de vulnerabilidades:** analisa as condições físicas e ambientais do território, considerando o isolamento geográfico e o clima predominante. O resultado é a classificação da vulnerabilidade geográfico-climática da região e a identificação do tipo de ameaça mais relevante.
 - *Input:* coordenadas geográficas, dados de densidade populacional, mapa de climas do Brasil.
 - *Output:* grau de vulnerabilidade referente ao evento em questão.
- 2. Etapa II – Modelagem de mitigação de riscos com o método Bow-Tie:** traduz as vulnerabilidades identificadas em relações causais, apontando as causas, consequências e possíveis medidas de mitigação. Essa modelagem ajuda a compreender o papel das aeronaves dentro de cada tipo de desastre.
 - *Input:* tipo de desastre e vulnerabilidade identificada na etapa anterior.

- *Output*: medidas preventivas e reativas aplicáveis, além da função operacional das aeronaves.
3. **Etapa III – Mapeamento de condições operacionais:** avalia a viabilidade técnica do emprego aéreo, verificando a existência de infraestrutura disponível: aeródromos públicos, privados ou trechos rodoviários adaptáveis para pousos emergenciais.
- *Input*: bases de infraestrutura aeronáutica e rodoviária.
 - *Output*: potenciais locais próximos com infraestrutura aérea existente ou adaptável.
4. **Etapa IV – Síntese operacional e decisão de emprego:** integra os resultados anteriores em um modelo de decisão multicritério que combina vulnerabilidade, mitigação e infraestrutura para definir o nível de prioridade e o tipo de operação recomendada.
- *Input*: resultados das três etapas anteriores.
 - *Output*: tabela de decisão para o emprego de aeronaves de asa fixa.

Cada uma das etapas apresentadas será aprofundada nas subseções seguintes, com a descrição dos dados utilizados, dos procedimentos de análise e dos resultados obtidos.

3.1 Identificação do local e mapeamento de vulnerabilidades

A vulnerabilidade, no contexto de gestão de riscos e desastres, é entendida como a condição determinada por fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade de indivíduos, comunidades, bens ou sistemas aos impactos de ameaças. Essa definição, estabelecida pelo *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR, 2017) visa promover um entendimento comum sobre os componentes do risco de desastre. Nesse contexto, a vulnerabilidade reflete a predisposição de um território a sofrer perdas e danos em função de suas condições estruturais e ambientais, e não apenas a ocorrência de eventos extremos em si.

A primeira etapa da metodologia consiste na identificação da localidade de estudo e no mapeamento das vulnerabilidades associadas. Inicialmente, define-se o ponto central ou região de interesse a partir de suas coordenadas geográficas (latitude e longitude). A partir dessas coordenadas, são extraídos dois conjuntos de informações principais:

1. O Índice de Isolamento Geográfico (IIG) correspondente àquela localidade, proposto nesta pesquisa, que traduz o grau de isolamento territorial a partir da densidade populacional e da distribuição espacial dos assentamentos humanos.
2. O clima predominante da região, obtido a partir do Mapa de Climas do Brasil (IBGE, 2002).

Essas duas dimensões representam vulnerabilidades de natureza física e ambiental, fundamentais para o apoio à decisão estratégica no emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência. O entendimento dessas condições territoriais permite reconhecer onde o acesso é limitado ou difícil e onde as condições climáticas demandam maior capacidade operacional aérea.

3.1.1 Vulnerabilidade associada ao isolamento geográfico

Primeiramente, para quantificar a variável de vulnerabilidade de isolamento geográfico, utilizou-se a base de densidade populacional da *WorldPop* (WorldPop, 2025). O *WorldPop* é um projeto internacional que desenvolve pesquisas e métodos para a construção de dados geospaciais abertos e de alta resolução, a partir de modelos que combinam dados censitários, imagens de satélite e covariáveis geográficas, sobre distribuição populacional, demografia e dinâmica, com foco em países de baixa e média renda, como o Brasil. Estas estimativas são fornecidas em formato matricial georreferenciado (TIF).

A base utilizada neste estudo corresponde ao Brasil em 2020, com densidade populacional representada em unidades de pessoas por pixel. A Figura 3.2 apresenta a distribuição espacial da população brasileira.

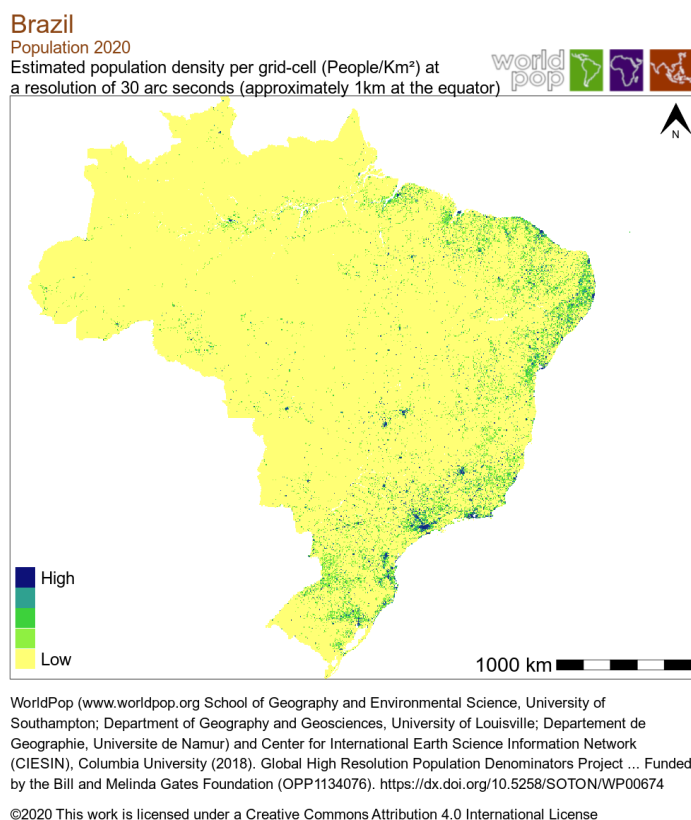


FIGURA 3.2 – Mapa de densidade populacional do Brasil em 2020. Fonte: WorldPop (2025).

A partir dessa base, foi desenvolvido um Índice de Isolamento Geográfico (IIG), proposto nesta pesquisa, com o objetivo de mensurar o grau de isolamento relativo de cada ponto do território nacional. O índice constitui uma contribuição metodológica original, permitindo traduzir, de forma quantitativa e espacialmente contínua, a dimensão territorial da vulnerabilidade associada ao isolamento físico. Essa medida é essencial para identificar áreas onde o apoio aéreo tende a ser mais crítico em situações de emergência.

O IIG resulta em valores contínuos de 0 a 1, em que 0 representa áreas densamente povoadas e conectadas (baixo isolamento) e 1 representa regiões remotas (alto isolamento). O cálculo foi realizado por meio de um algoritmo implementado em *Python*, combinando duas dimensões complementares:

- Distância até o assentamento mais próximo, que indica o afastamento físico em relação a centros populacionais.
- Densidade populacional local, que expressa o grau demográfico na vizinhança imediata.

A Equação 3.1 representa a fórmula geral adotada no modelo.

$$IIG = \alpha \cdot D_{\text{norm}} + (1 - \alpha) \cdot (1 - P_{\text{norm}}) \quad (3.1)$$

Em que α é o peso atribuído à componente de distância, D_{norm} é a distância normalizada ao centro populacional mais próximo e P_{norm} é a densidade populacional média local normalizada. Dessa forma, o processamento foi estruturado em cinco etapas principais:

1. Carregamento e reamostragem da base *raster*: A grade populacional original, de alta resolução (~1 km), foi reamostrada com um fator de redução de 8x, resultando em uma nova resolução de aproximadamente 8 km por pixel. O método de agregação foi a soma, essencial para conservar a contagem total de população nos novos pixels maiores. Essa etapa reduziu a dimensão da matriz de 54.172×46.814 para 6.771×5.851 pixels, tornando o cálculo em escala nacional computacionalmente mais eficiente e rápido.
2. Identificação de assentamentos: Um pixel na grade reamostrada foi classificado como "assentamento" se sua população total fosse maior ou igual a 30.000 pessoas. Considerando a nova área do pixel (~64 km²), este limiar equivale a uma densidade mínima de aproximadamente 469 habitantes/km², garantindo que apenas núcleos urbanos consolidados fossem considerados pontos de quebra de isolamento.
3. Cálculo da distância euclidiana (D_{norm}): Para cada pixel que não era um assentamento, o modelo calculou a distância em linha reta (em pixels) até o assentamento mais próximo. O mapa de distâncias resultante foi então normalizado para o intervalo [0, 1], onde 0

representa distância zero (o próprio assentamento) e 1 representa o ponto mais remoto de todo o território nacional.

4. Cálculo da densidade populacional local (P_{norm}): Para medir a escassez populacional na vizinhança de cada pixel, foi adotado um raio de 50 km. Na grade reduzida, isso corresponde a uma janela de análise de 13×13 pixels. Utilizando um filtro uniforme, o modelo calculou a população média dentro dessa janela para cada pixel do mapa. O resultado também foi normalizado para o intervalo $[0, 1]$, onde 0 representa a vizinhança menos populosa e 1 a mais populosa.
5. Combinação ponderada das métricas: As duas métricas normalizadas foram combinadas usando a Equação 3.1. O peso α foi definido como 0.7, atribuindo 70% da importância do índice à distância física (remotividade) e 30% à escassez populacional local. Isso reflete a hipótese de que o isolamento logístico é primariamente uma função da distância a um polo urbano.

A verificação do modelo de cálculo do IIG foi realizada por meio da análise de três pontos de controle em localidades que representam os três diferentes níveis de isolamento no Brasil (alto, médio, baixo):

- São Paulo (SP): Latitude -23.5512, Longitude -46.6343, região metropolitana densamente povoada e altamente conectada;
- Nobres (MT): Latitude -14.7100, Longitude -56.3200, município localizado na transição entre o cerrado e o norte do Pantanal, caracterizando uma condição intermediária de conectividade e densidade populacional;
- Amazônia (AM): Latitude 0.9080, Longitude -68.3785, região remota próxima a São Gabriel da Cachoeira, com evidente baixa densidade populacional.

Para validar visualmente os resultados do índice, conforme ilustrado nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5, foram gerados mapas a partir da base populacional original, centrados nas coordenadas de cada ponto de controle. Nessas visualizações, foram extraídas janelas do arquivo TIF original correspondente às regiões de interesse.

Aplicou-se uma escala logarítmica (LogNorm) na representação da densidade populacional, a fim de evidenciar simultaneamente áreas muito povoadas e assentamentos esparsos. Com isso, foi possível observar com clareza a diferença de padrões entre regiões altamente urbanizadas, áreas intermediárias e zonas remotas. Um marcador foi adicionado em cada gráfico para indicar a coordenada exata do ponto de consulta, permitindo a correspondência direta com o valor calculado do IIG.

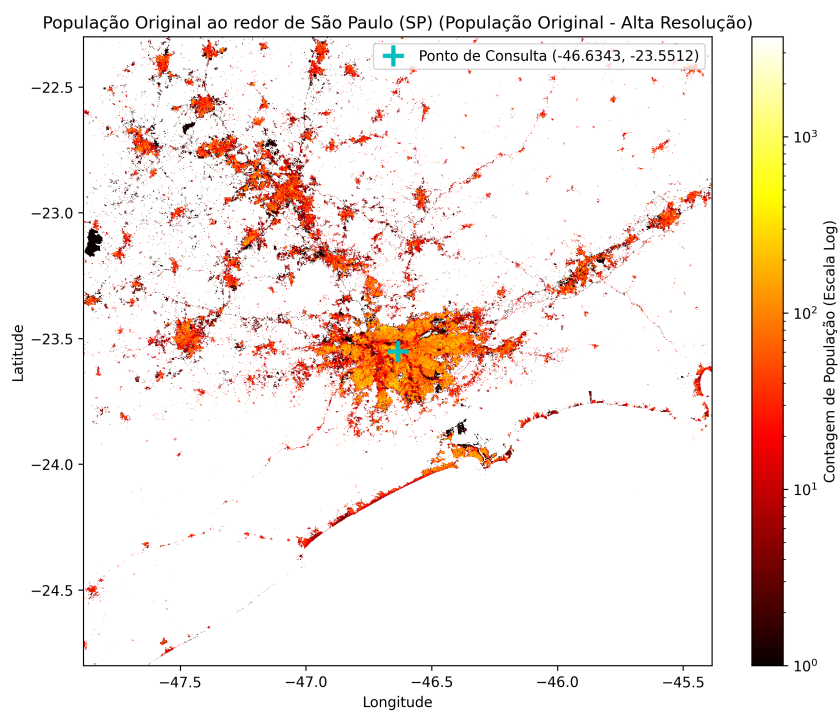


FIGURA 3.3 – Visualização logarítmica da densidade populacional em São Paulo (SP), representando zona de baixo isolamento geográfico segundo o modelo de IIG. Fonte: Preparado pela autora.

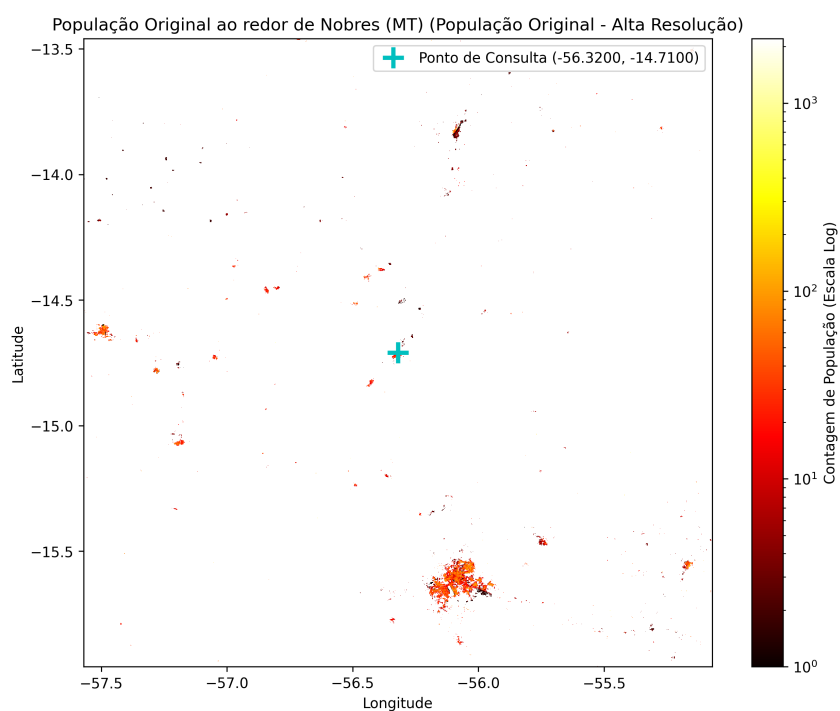


FIGURA 3.4 – Visualização logarítmica da densidade populacional em Nobres (MT), representando zona de médio isolamento geográfico segundo o modelo de IIG. Fonte: Preparado pela autora.

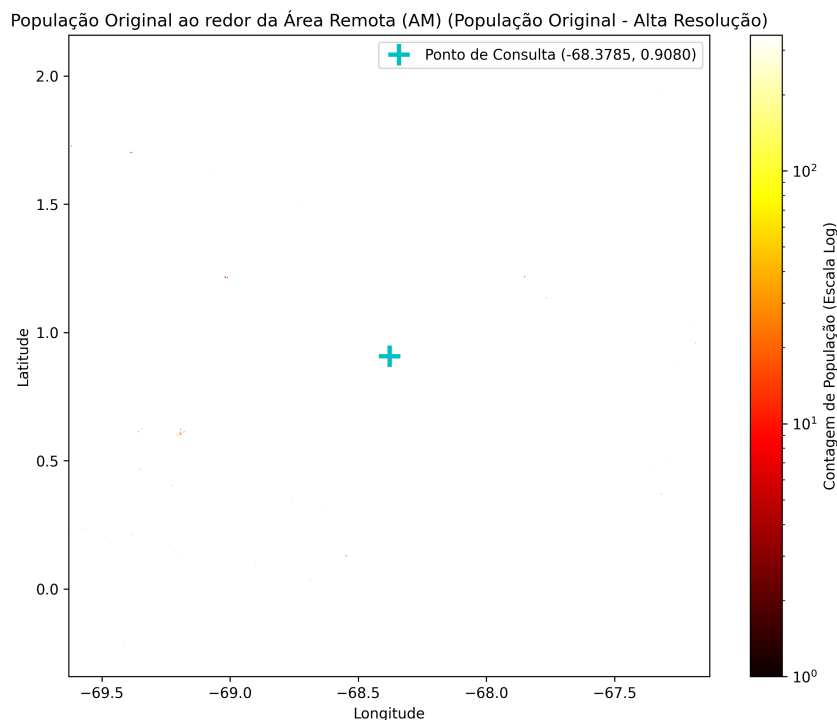


FIGURA 3.5 – Visualização logarítmica da densidade populacional em São Gabriel da Cachoeira (AM), representando zona de alto isolamento geográfico segundo o modelo de IIG. Fonte: Preparado pela autora.

Os resultados obtidos foram:

- São Paulo: IIG = 0.064 (baixo isolamento)
- Nobres (MT): IIG = 0.4865 (médio isolamento);
- Região Amazônica: IIG = 0.881 (alto isolamento)

Esses resultados confirmam a consistência do modelo, demonstrando sua capacidade de diferenciar adequadamente contextos territoriais contrastantes. A diferença de magnitude entre os índices reflete a sensibilidade do IIG ao gradiente de conectividade nacional, evidenciando sua aplicabilidade como indicador geoespacial de vulnerabilidade física e de suporte à decisão operacional em emergências.

Entretanto, é importante destacar que o IIG apresenta limitações decorrentes de sua própria formulação. Por basear-se exclusivamente na densidade populacional e na distância até assentamentos, o índice não capta a efetiva conectividade territorial, ou seja, não incorpora informações sobre rodovias, vias navegáveis ou demais infraestruturas de transporte que influenciam o acesso real a determinados pontos do território. Assim, o IIG deve ser interpretado como um indicador de isolamento potencial, de caráter estrutural e demográfico, e não como uma medida direta de acessibilidade logística.

3.1.2 Vulnerabilidade associada às condições climáticas

O clima é um dos principais fatores que determinam a vulnerabilidade ambiental do território brasileiro. Ele atua tanto como elemento de predisposição, ao criar condições favoráveis para a ocorrência de determinados tipos de desastres, quanto como um fator de agravamento, ao influenciar a intensidade e a duração de seus efeitos. Regimes de chuvas prolongados, ondas de calor, estiagens persistentes ou períodos de alta umidade, por exemplo, podem não apenas desencadear eventos extremos, mas também dificultar a recuperação das áreas afetadas e prolongar as condições de risco.

O Brasil possui uma diversidade climática muito grande. Para representar essa variedade, este estudo adota a classificação de Nimer de 1979, consolidada no Mapa de Climas do Brasil, publicado pelo IBGE (IBGE, 2002). Essa classificação utiliza dois critérios principais:

1. A temperatura média do mês mais frio, que define o caráter térmico.
2. O número de meses secos, que caracteriza o regime de umidade.

A partir das coordenadas geográficas da localidade de estudo, é possível identificar, por sobreposição espacial, o clima predominante na área analisada. Essa informação é então utilizada para inferir quais tipos de desastres naturais apresentam maior probabilidade de ocorrência e maior persistência temporal no contexto local.

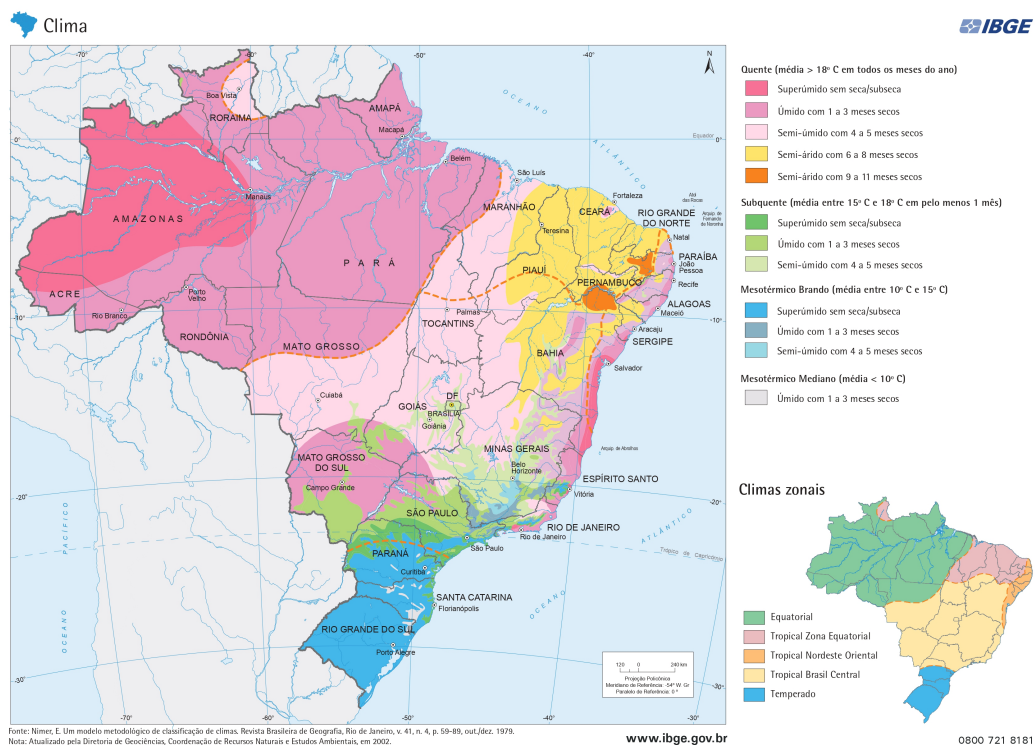


FIGURA 3.6 – Mapa de Climas do Brasil. Fonte: IBGE (2002).

Nesse sentido, as principais zonas climáticas brasileiras e suas relações com os desastres naturais predominantes são:

- **Clima Equatorial:** predomina na Amazônia, com temperaturas elevadas durante todo o ano e chuvas intensas e regulares, sem estação seca definida. A elevada umidade favorece inundações prolongadas e movimentos de massa em margens de rios.
- **Clima Tropical da Zona Equatorial:** caracteriza-se por chuvas concentradas no verão e curtos períodos secos. É vulnerável tanto a inundações sazonais quanto a incêndios florestais na transição entre as estações.
- **Clima Tropical do Nordeste Oriental:** abrange o semiárido nordestino e parte do norte de Minas Gerais. A irregularidade pluviométrica e os longos períodos sem chuva o tornam o domínio mais suscetível a secas e estiagens prolongadas.
- **Clima Tropical do Brasil Central:** típico do Planalto Central, com verões chuvosos e invernos secos. Apresenta dupla vulnerabilidade, sujeita a enchentes localizadas no início do período úmido e incêndios florestais durante a estação seca.
- **Clima Temperado:** predomina na Região Sul, com chuvas bem distribuídas e influência de frentes frias. É propenso a inundações de grande magnitude e deslizamentos de encostas associados a eventos extremos de precipitação.

Essa caracterização permite associar, de forma direta, o tipo de ameaça climática mais relevante para cada domínio do território brasileiro. A combinação dessa informação com o Índice de Isolamento Geográfico (IIG) fornece a base para a classificação integrada de vulnerabilidade, utilizada para apoiar o planejamento e a priorização do emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência.

3.1.3 Integração das vulnerabilidades geográficas e climáticas

A integração das duas dimensões analisadas (isolamento geográfico e condições climáticas associadas a cada tipo de desastre) permite avaliar, de forma sistemática, a vulnerabilidade territorial em qualquer região do país. Enquanto o Índice de Isolamento Geográfico (IIG) mede a dificuldade de acesso e mobilização de recursos, a análise climática identifica tanto a propensão do ambiente à ocorrência de determinado tipo de evento extremo quanto a sua capacidade de prolongar ou intensificar seus efeitos (por exemplo, secas em climas semiáridos ou inundações em zonas equatoriais úmidas).

Na prática, essa integração é obtida por meio do cruzamento entre o valor do IIG calculado para as coordenadas da localidade de estudo e o domínio climático predominante identificado

no mapa do IBGE. A combinação desses dois fatores permite classificar o território em níveis de vulnerabilidade distintos, conforme a Tabela 3.1.

Categoria	Crítérios gerais	Interpretação operacional
Baixa vulnerabilidade	Regiões com baixo isolamento ($IIG < 0,3$) e clima sem correlação significativa com o tipo de desastre.	Baixa dependência de apoio aéreo; resposta terrestre suficiente.
Média vulnerabilidade	Regiões com isolamento moderado ($0,3 \leq IIG < 0,6$) ou clima parcialmente correlacionado com o tipo de desastre.	Emprego aéreo útil em apoio logístico complementar.
Alta vulnerabilidade	Regiões com alto isolamento ($IIG \geq 0,6$) e clima fortemente correlacionado ao desastre (por exemplo, semiárido para estiagem, tropical úmido para inundações, tropical seco para incêndios).	Alta prioridade para planejamento e emprego de aeronaves de asa fixa em operações emergenciais.

TABELA 3.1 – Classificação de vulnerabilidade territorial com base na integração entre isolamento geográfico e condições climáticas associadas a cada tipo de desastre. Fonte: Preparado pela autora.

O resultado desta etapa é, portanto, uma estrutura metodológica para avaliação de vulnerabilidade geográfico-climática, que pode ser aplicada a qualquer área de interesse. A partir de dados geoespaciais e climáticos, é possível determinar o grau de vulnerabilidade de uma região e, conseqüentemente, a necessidade potencial de apoio aéreo em situações de emergência.

3.2 Modelagem de mitigação de riscos com o método *Bow-Tie*

A etapa de mitigação tem como propósito identificar e estruturar ações capazes de reduzir tanto a probabilidade de ocorrência quanto os impactos dos desastres identificados nas fases anteriores da metodologia. A partir das vulnerabilidades geográfico-climáticas identificadas, esta fase aplica o método *Bow-Tie* para representar, de forma integrada, as cadeias de risco associadas a cada tipo de desastre e os pontos onde medidas de controle podem ser implementadas. O foco está na empregabilidade de aeronaves de asa fixa como instrumento complementar de mitigação e apoio à resposta emergencial.

O *Bow-Tie* permite visualizar, em um mesmo modelo, a relação causal entre fatores de risco (vulnerabilidades), causas imediatas, evento crítico, conseqüências e barreiras de controle. No

contexto desta pesquisa, o diagrama cumpre duas funções principais:

1. Traduzir vulnerabilidades físicas e ambientais em medidas concretas de intervenção.
2. Servir como base para a etapa seguinte da metodologia, dedicada à avaliação da infraestrutura disponível e à decisão sobre a viabilidade operacional do uso de aeronaves de asa fixa.

3.2.1 Adaptação do *Bow-Tie* ao contexto de desastres naturais

O modelo *Bow-Tie* foi adaptado neste trabalho para representar, de forma simplificada e causal, a relação entre vulnerabilidades territoriais, causas, controles e impactos em cenários de desastres naturais. Essa adaptação adota uma lógica linear voltada à gestão de riscos ambientais, na qual as vulnerabilidades do território alimentam o evento crítico, enquanto causas e controles definem os pontos de intervenção possíveis.

As vulnerabilidades mapeadas, derivadas do isolamento geográfico e de condições climáticas adversas, representam o ponto de partida do modelo e indicam a predisposição natural de uma região à ocorrência de determinado desastre. Entre essas vulnerabilidades e o evento situam-se as barreiras de prevenção, voltadas a impedir a ocorrência do desastre ou reduzir sua probabilidade.

O evento crítico corresponde ao próprio desastre natural, como estiagem, inundação, incêndio florestal ou epidemia, que ocorre quando as barreiras preventivas falham ou se mostram insuficientes. Após o evento, atuam as barreiras de recuperação, voltadas à redução da gravidade dos impactos. Neste contexto, destacam-se o emprego de aeronaves de asa fixa para transporte de suprimentos e evacuação médica, o lançamento aéreo de cargas e o apoio logístico à assistência humanitária.

Por fim, as consequências abrangem os impactos diretos e indiretos sobre população, ambiente e infraestrutura, como escassez hídrica, danos materiais, perdas econômicas e isolamento populacional. Essa estrutura permite identificar, para cada tipo de desastre, os pontos de intervenção antes e depois do evento, oferecendo uma visão integrada das medidas preventivas e reativas que compõem a mitigação de riscos. A estrutura causal adotada pode ser visualizada na Figura 3.7.

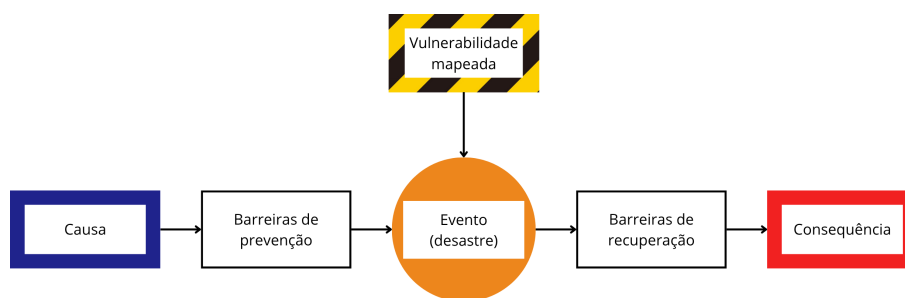


FIGURA 3.7 – Exemplo ilustrativo do diagrama *Bow-Tie* com causas, medidas de mitigação e consequências. Fonte: Preparado com base em JORDÃO (2021).

A seguir, a Tabela 3.2 apresenta uma síntese dos principais componentes do *Bow-Tie* adaptado para o contexto de desastres naturais.

Elemento	Função no modelo	Interpretação no contexto de desastres
Vulnerabilidade mapeada	Condicionante estrutural do risco, que predispõe o território à ocorrência do evento crítico	Nível de isolamento geográfico e clima
Causa	Fator específico que, somado às vulnerabilidades, contribui para a ocorrência do evento	Baixa capacidade de armazenagem, drenagem deficiente, acúmulo de material combustível
Barreiras de prevenção	Medidas que reduzem a probabilidade de ocorrência do evento crítico	Construção de reservatórios, manejo preventivo da vegetação, sistemas de drenagem e alerta precoce, controle de queimadas
Evento crítico	Manifestação do desastre natural quando as barreiras preventivas falham ou são insuficientes	Estiagem, inundação, incêndio florestal, epidemia
Barreiras de recuperação	Ações que reduzem a gravidade dos impactos após a ocorrência do evento	Emprego de aeronaves de asa fixa para transporte de suprimentos e evacuação, lançamento aéreo de carga, apoio logístico e humanitário
Consequências	Impactos diretos e indiretos decorrentes do evento crítico	Escassez hídrica, danos materiais, perdas econômicas

TABELA 3.2 – Componentes do *Bow-Tie* adaptado para desastres naturais. Fonte: Preparado com base em JORDÃO (2021).

Essa configuração evidencia a sequência causal entre vulnerabilidade, causas, barreiras e consequências, permitindo identificar, para cada tipo de desastre, os pontos em que intervenções preventivas e ações de recuperação podem ser aplicadas.

O resultado desta etapa é um mapeamento consolidado de medidas de mitigação, obtido pela aplicação do modelo *Bow-Tie* adaptado. Esse mapeamento organiza, de forma sistemática:

- O nível de vulnerabilidade geográfica e climática identificado na etapa anterior;
- O conjunto de barreiras preventivas e de recuperação aplicáveis a cada cenário analisado.

Essas informações compõem a base analítica da etapa seguinte da metodologia, dedicada ao mapeamento das condições operacionais. A partir dos controles identificados, será possível avaliar a viabilidade técnica do apoio aéreo e as condições de infraestrutura necessárias (como pistas adaptáveis, aeródromos ou áreas de pouso emergencial) para o emprego eficaz de aeronaves de asa fixa em operações de mitigação e resposta.

3.3 Mapeamento de condições operacionais

A última etapa da metodologia tem como objetivo avaliar a viabilidade operacional do emprego de aeronaves de asa fixa nos cenários de desastre e vulnerabilidade identificados nas fases anteriores. Enquanto a primeira etapa tratou da identificação e do mapeamento das vulnerabilidades geográficas e climáticas, e a segunda da definição das medidas de mitigação associadas a cada tipo de desastre, esta fase busca responder se o apoio aéreo é operacionalmente viável e em que condições.

O objetivo final desta etapa é determinar, de forma sistemática, se o emprego de aeronaves de asa fixa é viável, recomendável ou inviável para cada localidade analisada, considerando fatores como infraestrutura disponível, acessibilidade e limitações físicas do terreno. A análise considera dois componentes principais, aplicados de forma sequencial e complementar:

1. Infraestrutura aérea existente, composta por aeródromos públicos e privados.
2. Infraestrutura rodoviária adaptável, representada por trechos pavimentados que possam ser utilizados para pousos eventuais.

O princípio adotado é a priorização de infraestruturas pré-existentes, privilegiando instalações operacionais antes de considerar soluções contingenciais. Assim, a análise inicia-se pelos aeródromos e, na ausência destes, avança para a verificação de rodovias adaptáveis.

3.3.1 Aeródromos públicos e privados

O primeiro passo consiste em verificar a existência de aeródromos operacionais próximos ao ponto de desastre. Foram utilizados dados oficiais da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), que reúnem aeródromos de uso público e uso privativo, ambos georreferenciados e acompanhados de informações sobre tipo de pista, comprimento, pavimento, altitude e status operacional (ANAC, 2025).

A Figura 3.8 apresenta o mapa de distribuição conjunta dos aeródromos públicos e privados no território nacional. Essa visualização permite identificar regiões com maior densidade de infraestrutura aérea e, portanto, maior capacidade de resposta logística.

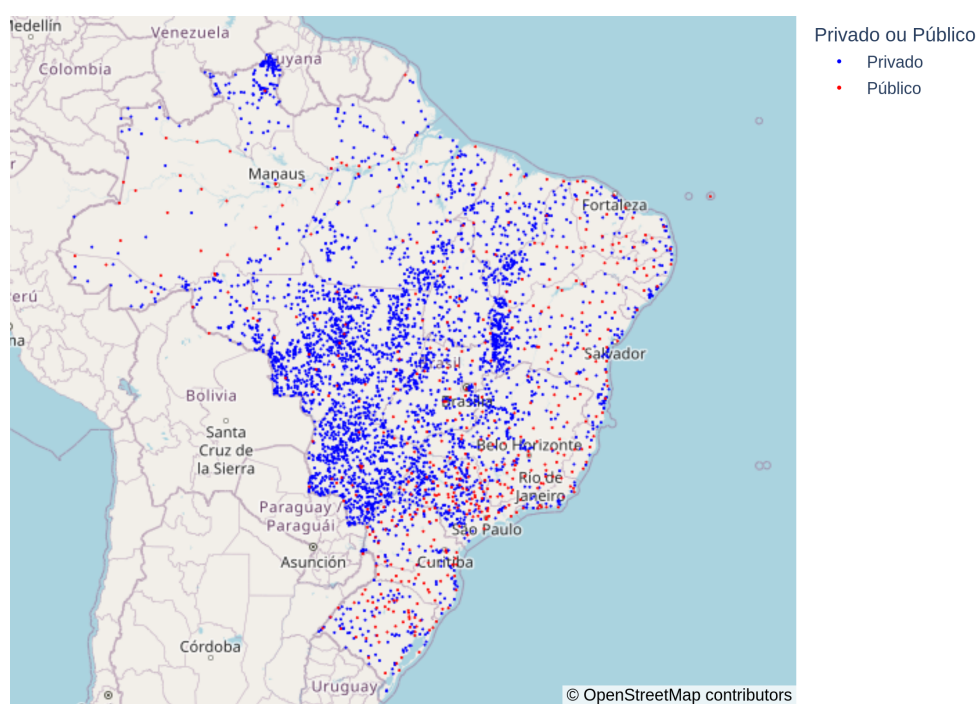


FIGURA 3.8 – Distribuição dos aeródromos públicos e privados no Brasil. Fonte: Preparado com base em ANAC (2025).

Para cada ponto de desastre analisado, calcula-se a distância entre suas coordenadas e o aeródromo mais próximo, identificando o nível de acessibilidade aérea. Esse cálculo é realizado a partir das coordenadas geográficas fornecidas pela base da ANAC. Além da proximidade, é fundamental avaliar as condições físicas da pista (comprimento, tipo de pavimento e altitude), também disponíveis na base, para determinar se a operação é de fato viável em termos operacionais e de segurança.

Como critério de acessibilidade, considera-se operacionalmente adequado o aeródromo situado a até duas horas de deslocamento terrestre do ponto de interesse, estimado com base em trajetos rodoviários obtidos pelo *Google Maps*).

O resultado desta subetapa consiste na identificação do aeródromo operacional mais pró-

ximo ao ponto de interesse e na avaliação de suas condições físicas e estruturais para pouso e decolagem. Quando não há aeródromo viável dentro desse limite operacional, procede-se à análise complementar de acessibilidade terrestre, voltada à identificação de trechos rodoviários pavimentados e potencialmente adaptáveis para operações de pouso emergencial.

3.3.2 Rodovias pavimentadas e adaptáveis

Na ausência de aeródromos operacionais próximos, o segundo componente de análise é a identificação de rodovias pavimentadas e potencialmente adaptáveis para pousos emergenciais de aeronaves de asa fixa.

A identificação e avaliação desses trechos são fundamentadas no framework proposto por Lemos (2024), que estabelece uma metodologia sistemática para seleção de segmentos rodoviários com potencial de uso aeronáutico em situações de emergência. O método é composto por cinco macroetapas principais:

1. Cálculo das dimensões mínimas do trecho rodoviário (comprimento e largura adequados para pouso e decolagem);
2. Identificação de rodovias pavimentadas próximas ao ponto de desastre;
3. Verificação da linearidade e exclusão de trechos sobre pontes;
4. Avaliação das condições superficiais e geométricas (pavimento, acostamento, obstáculos laterais);
5. Verificação da declividade longitudinal, garantindo a segurança operacional.

A aplicação desse processo possibilita identificar trechos tecnicamente viáveis para operação de aeronaves em caráter emergencial, considerando tanto a adequação geométrica quanto as condições físicas do pavimento. A Figura 3.9 apresenta a malha de rodovias federais e estaduais brasileiras utilizada como base de referência para essa análise (GARCIA; FILHO, 2021).

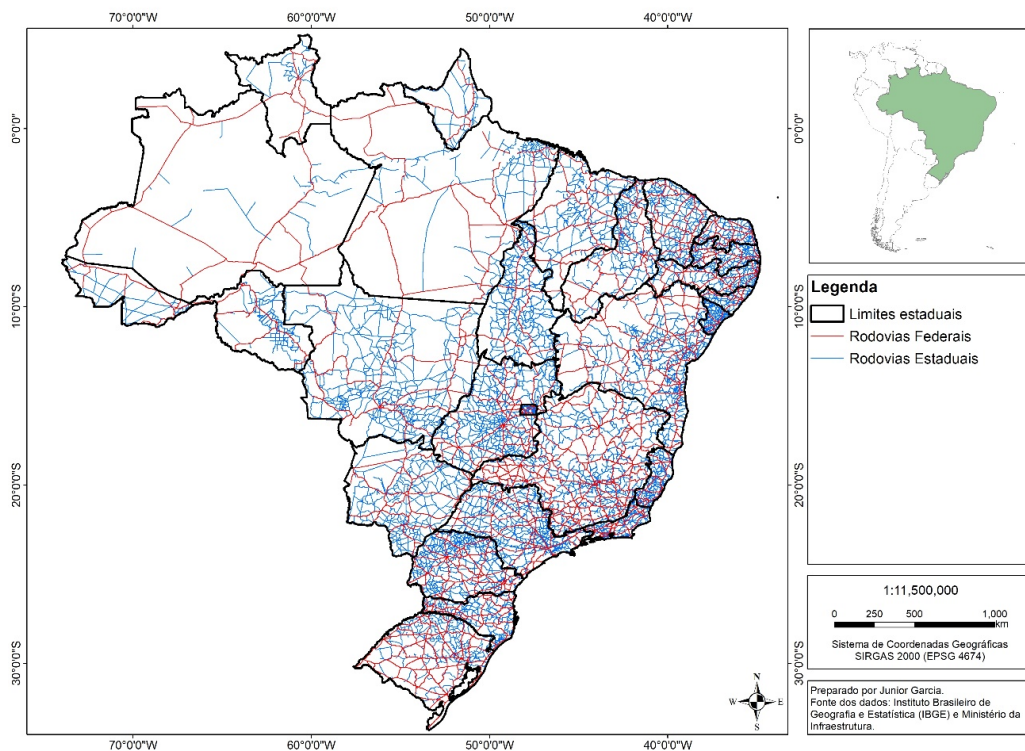


FIGURA 3.9 – Mapa das rodovias federais e estaduais do Brasil. Fonte: Garcia e Filho (2021).

O resultado desta subetapa é a identificação de trechos rodoviários com potencial de adaptação para operações aéreas, ampliando a cobertura logística em regiões sem aeródromos.

3.4 Síntese operacional e decisão de emprego

A etapa final da metodologia tem como objetivo integrar os resultados das análises anteriores (vulnerabilidade geográfico-climática, mitigação de riscos e condições operacionais) para apoiar a decisão sobre o emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência. Essa síntese consolida informações de naturezas distintas em uma estrutura de decisão que orienta a priorização das operações aéreas e a escolha do tipo de aeronave mais adequado a cada cenário.

O processo decisório baseia-se na combinação de três dimensões principais:

1. Vulnerabilidade territorial: reflete a necessidade potencial de apoio aéreo em função do isolamento geográfico e da exposição climática ao tipo de desastre analisado.
2. Mitigação de riscos: define a função operacional das aeronaves identificada no modelo *Bow-Tie*, como transporte de suprimentos, evacuação médica, reconhecimento aéreo ou combate a incêndios.

3. Condições operacionais: avaliam a viabilidade técnica de execução da operação, considerando a existência e o estado da infraestrutura aérea (aeródromos ou rodovias adaptáveis).

Com base nesses critérios, cada localidade pode ser enquadrada em uma tipologia de decisão de emprego ampliada, apresentada na Tabela 3.3.

Vulnerabilidade	Mitigação identificada	Condições operacionais	Decisão de emprego
Alta	Função definida e pronta: transporte de suprimentos, evacuação, reconhecimento ou combate a incêndio	Aeródromo ou trecho rodoviário adaptável viável e próximo	Emprego imediato: operação aérea central na resposta.
Alta	Função definida, porém com baixa prontidão local (meios ou controles indisponíveis)	Infraestrutura ausente ou degradada	Emprego planejado com instalação prévia de base de apoio ou pista temporária.
Média	Função definida e aplicável a apoio logístico	Aeródromo distante (>2h) ou pista limitada	Emprego condicionado: possível após adequações logísticas.
Média	Função definida e presença de rotas terrestres eficientes	Boa acessibilidade terrestre	Emprego complementar: apoio ao transporte de suprimentos e reconhecimento.
Baixa	Função definida e meios locais suficientes	Boa infraestrutura local	Não prioritário: resposta terrestre adequada.
Baixa	Função pontual (monitoramento ou entrega emergencial)	Ausência de infraestrutura aérea próxima	Emprego sob demanda: missões pontuais de curta duração.

TABELA 3.3 – Quadro de decisão para o emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência. Fonte: Preparado pela autora.

Essa estrutura de decisão permite traduzir o diagnóstico territorial em ação operacional, orientando gestores e planejadores quanto ao uso mais adequado e eficiente de aeronaves de asa fixa em situações de emergência.

3.4.1 Características das principais aeronaves

Após a decisão de emprego, realiza-se a verificação da compatibilidade entre as condições operacionais locais e os requisitos mínimos das aeronaves consideradas. Essa etapa tem como objetivo identificar quais modelos podem ser utilizados nas condições existentes e quais demandariam adequações prévias de infraestrutura.

A análise considera padrões técnicos que determinam a viabilidade do pouso e da decolagem, sendo o comprimento e a largura da pista requisitos fundamentais a serem observados. Esses valores devem atender aos mínimos operacionais especificados para cada aeronave. Quando esses critérios não são plenamente atendidos, o emprego aéreo é classificado como condicionado, recomendando-se adequações na pista ou a utilização de bases temporárias adaptadas.

Entre as aeronaves viáveis, a seleção deve priorizar aquelas que melhor atendem ao tipo de missão definido na etapa de mitigação, considerando a capacidade de carga, o alcance e a velocidade de cruzeiro. A seguir são descritas as principais aeronaves avaliadas neste estudo e suas aplicações mais adequadas em cenários emergenciais:

- Cessna 208B Grand Caravan – aeronave leve e versátil, ideal para missões de curta distância, evacuação médica e transporte de suprimentos em regiões com pistas curtas, não pavimentadas ou de baixa resistência. Amplamente empregada por forças humanitárias em desastres de média escala.
- Pilatus PC-12 NGX – monomotor turboélice de maior alcance e velocidade, indicado para transporte executivo, reconhecimento e apoio logístico regional. Opera com segurança em pistas não pavimentadas, mantendo boa autonomia para voos intermunicipais em áreas isoladas.
- Pilatus PC-24 – jato leve capaz de operar em pistas curtas e não pavimentadas, indicado para missões que exigem rapidez e cobertura de maior raio operacional, como transporte de equipes técnicas ou evacuação de alto valor estratégico.
- Embraer EMB-120 Brasília – bimotor regional, apropriado para transporte de carga ou passageiros entre polos regionais com infraestrutura intermediária. Sua capacidade de carga e alcance o tornam útil para missões de reabastecimento de médio porte.
- CASA C-105 Amazonas — aeronave de transporte tático da Força Aérea Brasileira, adaptada para lançamento aéreo de suprimentos e deslocamento de tropas ou equipamentos em regiões remotas. Opera em pistas curtas e é indicada para operações prolongadas ou de grande volume.
- Embraer KC-390 Millennium — jato multimissão de alta capacidade, projetado para transporte estratégico, evacuação aeromédica em massa e lançamento de cargas pesa-

das. Utilizado em missões de longa distância ou que envolvem elevados pesos e volumes, sendo empregado em respostas a desastres de grande escala.

As características técnicas das principais aeronaves utilizadas em operações emergenciais estão apresentadas na Tabela 3.4, que reúne parâmetros de desempenho e infraestrutura mínima necessária para operação segura. Esses dados permitem comparar, de forma objetiva, os requisitos de cada modelo com as condições locais avaliadas na etapa de mapeamento operacional, servindo como referência direta para a definição das aeronaves viáveis em cada cenário. Os valores de desempenho apresentados são típicos e podem variar conforme a motorização, configuração de carga paga e quantidade de combustível utilizada.

TABELA 3.4 – Características técnicas de aeronaves de asa fixa para operações emergenciais.

Aeronave	Tipo	Env. ^a (m)	L. Trem ^b (m)	MTOW ^c (kg)	Carga ^d (kg)	V _{crz} ^e (km/h)	Alc. ^f (km)	C. Pista ^g (m)	L. Pista ^h (m)
Cessna 208B Grand Caravan ¹	TurboProp	15,88	3,56	3.629	1.393	344	1.632	626	18
Pilatus PC-12 NGX ²	TurboProp	16,28	4,52	4.740	1.060	520	1.964	776	18
Pilatus PC-24 ³	Jato	16,99	3,32	8.500	1.406	815	3.200	941	23
Embraer EMB-120 Brasília ⁴	TurboProp	19,78	7,31	11.500	3.270	550	1.750	1.400	30
CASA C-105 Amazonas ⁵	TurboProp	27,59	–	23.200	9.250	480	3.700	800	30
Embraer KC-390 (C-390 Millennium) ⁶	Jato	35,05	–	87.000	26.000	870	5.019	1.200	30

Legenda: ^aEnvergadura; ^bLargura do trem de pouso; ^cPeso máximo de decolagem (MTOW); ^dCarga útil; ^eVelocidade de cruzeiro; ^fAlcance máximo; ^gComprimento de pista requerido; ^hLargura de pista requerida.

Fontes: ¹(Textron Aviation Inc., 2025); ²(Pilatus Aircraft Ltd., 2025a); ³(Pilatus Aircraft Ltd., 2025b); ⁴(SKYbrary Aviation Safety, 2025), (EMBRAER S.A., 2019); ⁵(AIRBUS Defence and Space, 2023); ⁶(EMBRAER Defesa & Segurança, 2025).

Dessa forma, esta subseção complementa a síntese operacional ao transformar o diagnóstico técnico em recomendações concretas de meios aéreos. A correlação entre os parâmetros de pista, resistência e desempenho das aeronaves fornece uma base prática para o planejamento do emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência.

4 Aplicação

Entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022, cidades do sul e extremo sul da Bahia foram severamente afetadas por fortes chuvas, que resultaram em enchentes, alagamentos e deslizamentos de terra. Entre as mais atingidas estiveram Itamaraju, Prado e Jucuruçu, onde o transbordamento do rio Jucuruçu inundou parte da área urbana e destruiu moradias, como ilustrado na Figura 4.1.



FIGURA 4.1 – Enchente em Jucuruçu (BA), dezembro de 2021. Parte da área urbana foi completamente alagada após o transbordamento do rio Jucuruçu. Fonte: Globo (2021).

Segundo o Jornal Grande Bahia, a Superintendência de Proteção e Defesa Civil da Bahia (SUDEC) estimou que o evento deixou 26 mortos e mais de 850 mil pessoas afetadas em todo o estado (BAHIA, 2022). Em Jucuruçu, dezenas de famílias perderam suas casas e parte da população precisou ser evacuada, com registro de danos severos à infraestrutura urbana e habitacional.

Pela gravidade dos impactos registrados, o município de Jucuruçu (BA) foi selecionado como caso de aplicação da metodologia proposta neste estudo. A partir deste ponto, as quatro etapas metodológicas são aplicadas de forma sequencial ao evento, com o objetivo de demonstrar o processo de análise e apoiar a decisão sobre o emprego de aeronaves de asa fixa em

situações de emergência.

4.1 Identificação do local e mapeamento de vulnerabilidades

A primeira etapa da aplicação consiste na caracterização territorial da área afetada e na identificação de vulnerabilidades geográficas e climáticas.

4.1.1 Vulnerabilidade associada ao isolamento geográfico

O município de Jucuruçu localiza-se no extremo sul do estado da Bahia, a aproximadamente 720 km de Salvador, integrando a microrregião de Itamaraju. Suas coordenadas geográficas de referência são:

- Latitude = -16.8298 e Longitude = -40.1649

Com base no modelo de Índice de Isolamento Geográfico (IIG) proposto na metodologia, o valor calculado para Jucuruçu foi $IIG = 0.4043$, correspondendo à categoria de isolamento médio. A Figura 4.2 apresenta a localização de Jucuruçu e dos principais centros urbanos de seu entorno, em um raio geodésico de 130 km, abrangendo as cidades de Eunápolis, Teixeira de Freitas e Porto Seguro, todas com população superior a 100 mil habitantes. Essa comparação permite visualizar a distância entre Jucuruçu e as áreas com maior infraestrutura regional, reforçando a condição de isolamento relativo do município.

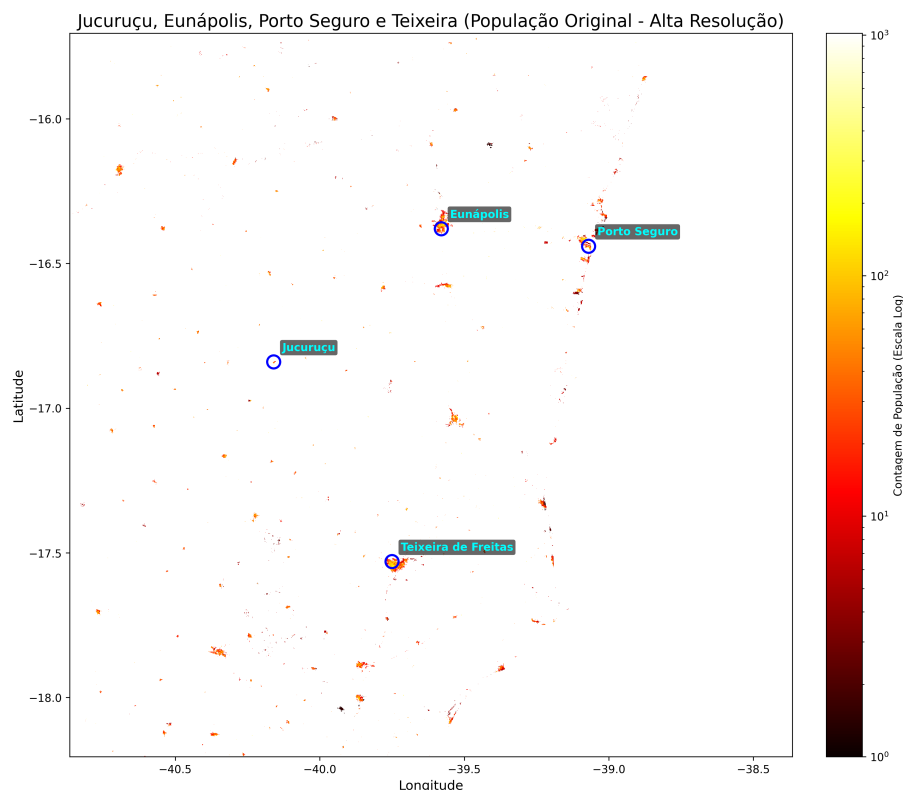


FIGURA 4.2 – Localização de Jucuruçu (BA) no mapa nacional de Índice de Isolamento Geográfico (IIG). Fonte: Preparado pela autora.

O valor de $IIG = 0.4043$ classifica Jucuruçu como um município de isolamento geográfico médio. Embora não se trate de uma localidade completamente remota, o município apresenta acessibilidade limitada e dependência de rotas específicas para conexão com centros urbanos de maior porte. Essa condição restringe o fluxo de pessoas, bens e serviços e pode comprometer a mobilidade de recursos e a rapidez da resposta logística em situações de emergência.

4.1.2 Vulnerabilidade associada às condições climáticas

O município de Jucuruçu está inserido no domínio do clima Tropical do Brasil Central, conforme a classificação de Nimer (1979) adotada pelo IBGE (IBGE, 2002). Esse tipo climático caracteriza-se por verões quentes e chuvosos e invernos secos, com forte concentração das precipitações entre novembro e março.

O evento de enchentes ocorrido entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022 coincidiu com o período de maior pluviosidade anual da região, quando a atuação combinada de sistemas atmosféricos ampliou significativamente o volume de chuva.

Essas condições favoreceram a persistência de chuvas intensas e contínuas, ultrapassando a capacidade de drenagem local e resultando no transbordamento do rio Jucuruçu. O cenário evidencia uma vulnerabilidade climática elevada durante o verão, período em que a combina-

ção de alta umidade e relevo acidentado potencializa a ocorrência e duração de enchentes e deslizamentos.

4.1.3 Integração das vulnerabilidades geográficas e climáticas

O cruzamento entre o Índice de Isolamento Geográfico (IIG) e o domínio climático permite estimar a vulnerabilidade integrada do município de Jucuruçu (BA).

Com $IIG = 0,4043$, Jucuruçu apresenta isolamento geográfico médio, caracterizado por acessos rodoviários regionais, porém suscetíveis a interrupções. O clima Tropical do Brasil Central, por sua vez, implica alta vulnerabilidade climática devido à concentração de chuvas intensas entre novembro e março.

A combinação desses fatores resulta em vulnerabilidade geográfico-climática média-alta, conforme mostrado na Tabela 4.1. Essa classificação indica condição de acesso restrito em períodos chuvosos, com potencial comprometimento logístico durante emergências.

Classificação integrada	Crítérios gerais	Interpretação operacional
Média-Alta	$IIG > 0,3$ (isolamento médio) e clima com correlação significativa com o tipo de desastre.	Emprego aéreo útil em apoio logístico e transporte emergencial.

TABELA 4.1 – Classificação integrada de vulnerabilidade geográfico-climática e interpretação operacional para o município de Jucuruçu (BA). Fonte: Preparado pela autora.

4.2 Modelagem de mitigação de riscos com o método *Bow-Tie*

A segunda etapa da aplicação consiste em representar, por meio do método *Bow-Tie*, a relação entre vulnerabilidades, causas, barreiras de controle e consequências associadas ao evento de inundação em Jucuruçu (BA). O modelo tem como objetivo identificar os pontos críticos de risco e as ações preventivas e reativas que podem reduzir tanto a probabilidade de ocorrência quanto a gravidade dos impactos do desastre.

A Figura 4.3 apresenta o diagrama elaborado para o caso estudado. No centro, situa-se o evento crítico (a inundação e o transbordo do rio Jucuruçu), resultante da combinação entre vulnerabilidades territoriais e condições climáticas extremas.



FIGURA 4.3 – Modelo *Bow-Tie* aplicado ao evento de inundação em Jucuruçu (BA). Fonte: Preparado pela autora.

A vulnerabilidade geográfico-climática média-alta da região, caracterizada pelo isolamento moderado e pela alta exposição a chuvas intensas no verão, foi considerada o ponto de partida do modelo. Cabe destacar que as causas listadas no diagrama têm caráter ilustrativo: representam exemplos plausíveis de fatores associados a cenários de inundação, não decorrendo de uma análise técnica detalhada da infraestrutura urbana de Jucuruçu. A partir dessa vulnerabilidade, são descritas as principais causas imediatas que contribuem para o evento, como drenagem urbana insuficiente, assoreamento do leito do rio, ocupação irregular em áreas ribeirinhas e falta de sistemas de alerta hidrometeorológico.

Entre essas causas e o evento situam-se as barreiras de prevenção, voltadas a evitar a perda de controle e reduzir a probabilidade de ocorrência do desastre. Entre elas destacam-se a melhoria da drenagem urbana, o desassoreamento e manutenção do rio Jucuruçu, o reflorestamento de margens, o zoneamento restritivo em áreas de várzea e a implantação de sistemas de monitoramento e alerta precoce.

O evento crítico (a inundação) representa o ponto central do modelo. Quando as barreiras preventivas falham ou se mostram insuficientes, entram em ação as barreiras de recuperação, que atuam para mitigar as consequências e restabelecer as condições de normalidade. Nesse contexto, o emprego de aeronaves de asa fixa assume papel central, oferecendo capacidade de resposta rápida e acesso a áreas isoladas.

As principais barreiras de recuperação viabilizadas pelo uso de aeronaves incluem:

- Transporte aéreo de suprimentos, alimentos, água potável e kits médicos;
- Lançamento aéreo de equipamentos de drenagem e apoio técnico emergencial;
- Evacuação médica e transporte de pessoas em situação de risco;
- Reconhecimento aéreo para avaliação de danos e apoio à tomada de decisão;
- Apoio logístico a equipes de resposta e reconstrução em áreas de difícil acesso;

- Restabelecimento de comunicações por meio de transporte de equipamentos.

No lado direito do modelo, as consequências identificadas incluem a destruição de moradias e infraestrutura, o isolamento populacional, a interrupção de serviços e vias de acesso e o risco sanitário decorrente da escassez de insumos. Observa-se que as medidas aéreas se inserem como barreiras de recuperação, reduzindo a gravidade dos impactos e ampliando a eficiência da resposta emergencial.

Os resultados dessa modelagem subsidiam a etapa seguinte da metodologia, dedicada à síntese operacional e à decisão de emprego das aeronaves de asa fixa em situações de emergência.

4.3 Mapeamento de condições operacionais

Com base nas coordenadas do município de Jucuruçu (BA), foi calculada a distância até os aeródromos constantes na base da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2025). A Figura 4.4 apresenta a localização dos aeródromos mais próximos, identificados pelo código CIAD, e a Tabela 4.2 sintetiza suas principais características operacionais.

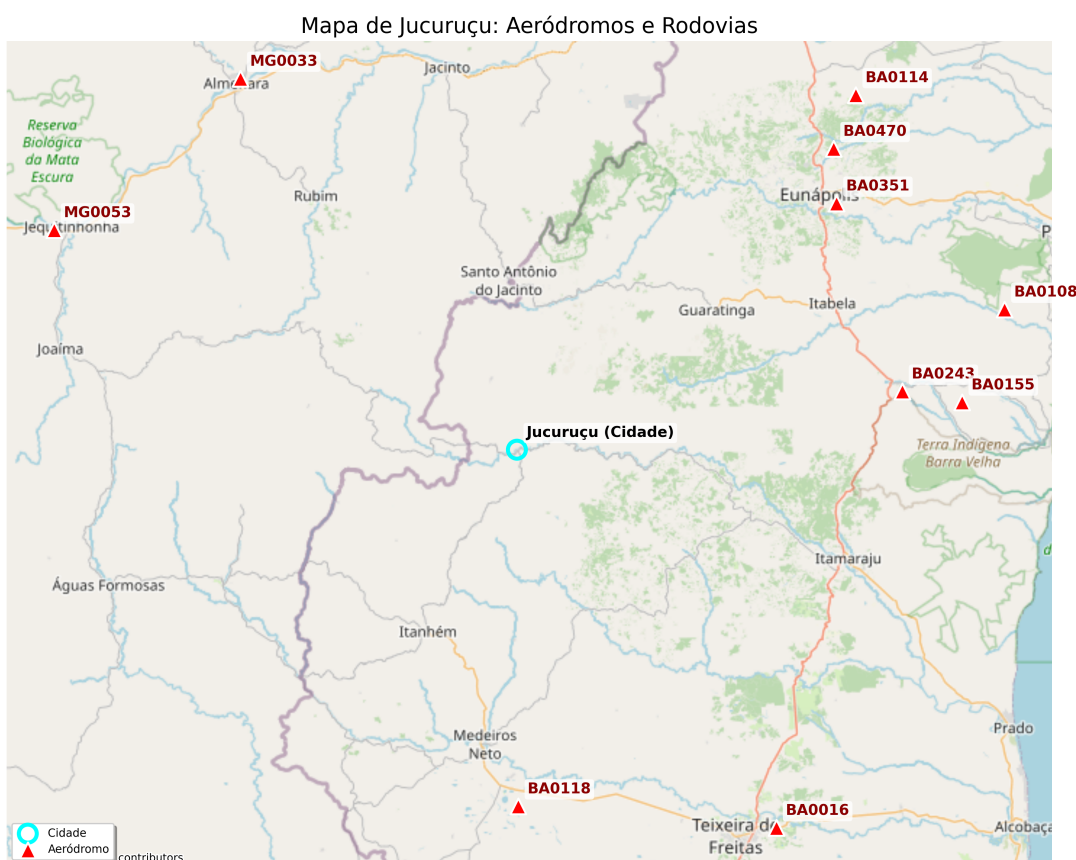


FIGURA 4.4 – Aeródromos mais próximos ao município de Jucuruçu (BA), identificados pelo código CIAD. Fonte: Preparado com base em ANAC (2025).

CIAD	Local	Tipo	Dist. euc. (km)	Dist. viária (km,h)	Oper.	Dim. (m)	Pista e Resistência
BA0118	Caravelas/BA	Priv.	73	104 (2h18)	VFR D	1220×30	Terra, 5700/0,5
BA0243	Itabela/BA	Priv.	79	135 (2h23)	VFR D	1000×18	Terra, 5400/0,5
BA0351	Eunápolis/BA	Priv.	81	150 (3h17)	VFR D	550×18	Terra, 5700/0,5
BA0470	Eunápolis/BA	Priv.	88	159 (3h23)	VFR D	1150×20	Terra, 5700/0,5
BA0155	Porto Seguro/BA	Priv.	91	149 (2h43)	VFR D	650×18	Terra, 5600/0,5
MG0033	Almenara/MG	Púb.	92	153 (3h30)	VFR D/N	1400×30	Asfalto, PCN 8/F/B/Y/U
BA0016	Teixeira de Freitas/BA	Púb.	93	162 (2h23)	VFR D/N	1460×30	Asfalto, PCN 31/F/A/X/T
BA0114	Eunápolis/BA	Priv.	99	182 (3h52)	VFR D	820×20	Terra, 5400/0,5
MG0053	Jequitinhonha/MG	Púb.	102	167 (3h23)	VFR D	1130×23	Asfalto, PCN 6/F/C/Z/U
BA0108	Porto Seguro/BA	Priv.	103	201 (3h54)	VFR D/N	1300×30	Terra, 5700/0,5

TABELA 4.2 – Aeródromos mais próximos ao município de Jucuruçu (BA). Fonte: Preparado com base em ANAC (2025). Abreviações: Priv.=Privado; Púb.=Público; VFR D=VFR Diurno; VFR D/N=VFR Diurno/Noturno.

As distâncias viárias foram estimadas via *Google Maps*, considerando o trajeto entre o centro urbano e cada aeródromo. O aeródromo mais próximo é o de Caravelas (BA0118), situado a aproximadamente 104 km de Jucuruçu, com deslocamento estimado em cerca de 2 h 18 min. Apesar da proximidade, sua pista de terra pode impor limitações operacionais, especialmente em condições meteorológicas adversas.

Outra alternativa relevante é o Aeroporto de Teixeira de Freitas (BA0016), localizado a cerca de 162 km (2 h 23 min) de distância rodoviária, com pista asfaltada, melhor capacidade estrutural e possibilidade de operação diurna e noturna.

Mesmo que ambas as opções ultrapassem ligeiramente o limite de duas horas de deslocamento definido como referência operacional, são consideradas viáveis para o apoio aéreo ao município. Dentre elas, o Aeroporto de Teixeira de Freitas se destaca como a opção mais adequada em termos de segurança, infraestrutura e previsibilidade operacional. Outros aeródromos próximos permanecem disponíveis e podem ser considerados conforme a natureza da missão e as condições locais no momento do evento.

4.4 Síntese operacional e decisão de emprego

A etapa final da aplicação consolida os resultados obtidos para o município de Jucuruçu (BA), integrando a vulnerabilidade geográfico-climática, as medidas de mitigação e as condições operacionais levantadas. O diagnóstico indica vulnerabilidade geográfico-climática média-alta, com isolamento geográfico moderado e alta suscetibilidade a enchentes no período chuvoso. O modelo *Bow-Tie* destacou o transporte de suprimentos, a evacuação médica e o reconhecimento aéreo como barreiras de recuperação prioritárias, evidenciando o papel do apoio

aéreo na mitigação dos impactos.

Entre os aeródromos analisados, Teixeira de Freitas (BA0016) apresenta as melhores condições operacionais — pista asfaltada de 1.460 m de comprimento, largura de 30 m e operação diurna e noturna e maior resistência do pavimento (PPD) — sendo adequado para aeronaves de médio porte. O aeródromo de Caravelas (BA0118), embora mais próximo (104 km), possui pista não pavimentada e é recomendado apenas para operações em condições meteorológicas favoráveis e com aeronaves leves.

Considerando as dimensões e o tipo de pista disponíveis, as aeronaves Cessna 208B Grand Caravan e Pilatus PC-12 NGX apresentam plena compatibilidade operacional, sendo adequadas para transporte leve, evacuação médica e missões de reconhecimento. Em operações de maior escala, o CASA C-105 Amazonas também pode ser empregado a partir de Teixeira de Freitas, oferecendo maior capacidade de carga e alcance regional. Aeronaves de maior porte, como o Embraer KC-390, requerem pavimento reforçado, sendo indicadas apenas para apoio logístico estratégico em bases maiores, conforme as características técnicas apresentadas na Tabela 3.4.

Dado o número expressivo de pessoas afetadas e as barreiras de recuperação identificadas no modelo *Bow-Tie*, recomenda-se priorizar o emprego combinado de aeronaves leves e médias. O Cessna 208B Grand Caravan e o Pilatus PC-12 NGX são os mais adequados para fases iniciais da resposta, garantindo acesso rápido a localidades isoladas e flexibilidade de operação em pistas não pavimentadas. O CASA C-105 Amazonas deve ser mobilizado para a fase subsequente, com foco em transporte logístico de maior volume (alimentos, água, equipamentos de drenagem e kits médicos) e apoio às equipes de reconstrução. Já o Pilatus PC-24 e o Embraer EMB-120 podem complementar o apoio aéreo intermunicipal, especialmente para o transporte de pessoal técnico e evacuação em média escala. O KC-390 permanece restrito a missões estratégicas ou de apoio interestadual, devido às exigências de pista e custo operacional.

A Tabela 4.3 apresenta a síntese operacional para o município de Jucuruçu, incluindo as aeronaves compatíveis com as condições locais.

Vulnerabilidade	Mitigação identificada	Condições operacionais	Decisão de emprego	Aeronaves recomendadas
Média-alta	Transporte, evacuação e reconhecimento aéreo	Aeródromo de Teixeira de Freitas viável; Caravelas como alternativa limitada	Emprego imediato: operação essencial ao apoio logístico e humanitário.	Cessna 208B Grand Caravan, Pilatus PC-12 NGX, Pilatus PC-24, Embraer EMB-120 Brasília, CASA C-105 Amazonas

TABELA 4.3 – Síntese operacional, decisão de emprego e aeronaves compatíveis para o município de Jucuruçu (BA). Fonte: Preparado pela autora.

Dessa forma, o emprego aéreo em Jucuruçu é considerado viável e prioritário, com base na existência de infraestrutura operacional próxima e na importância das missões aéreas como barreiras de recuperação. A utilização combinada de aeronaves leves e médias assegura flexibi-

idade logística e amplia a eficiência das ações de resposta em situações de emergência.

5 Conclusão

Este trabalho propôs e demonstrou uma metodologia para apoiar a decisão de emprego de aeronaves de asa fixa em emergências, integrando três dimensões: vulnerabilidade geográfico-climática, mitigação de riscos e condições operacionais. A contribuição central foi articular, em um fluxo único, a padronização conceitual de ameaças, a quantificação do isolamento territorial por meio de um índice de isolamento geográfico (IIG) e a tradução de causas e barreiras de recuperação com base no método *Bow-Tie*. O resultado é um fluxo de decisão aplicado que indica quando o uso de asa fixa é necessário, viável e prioritário.

A aplicação no desastre em Jucuruçu (BA) mostrou a utilidade prática do método. O município foi classificado com vulnerabilidade geográfico-climática média-alta. O método *Bow-Tie* destacou transporte de suprimentos, evacuação e reconhecimento como barreiras de recuperação prioritárias em cenário de inundação. A análise de infraestrutura indicou Teixeira de Freitas como base preferencial e Caravelas como alternativa com restrições. A síntese recomendou o emprego combinado de aeronaves leves e médias para fases iniciais e sustentação logística, com escalonamento para aeronave tática de maior capacidade quando o fluxo de carga cresce.

O método, contudo, apresenta limitações inerentes ao seu nível de generalização. O IIG reflete o isolamento potencial com base em densidade populacional e distância a assentamentos, sem considerar a conectividade real por rodovias ou a sazonalidade das rotas. A tipologia de decisão não incorpora custos, tempos de deslocamento ou restrições regulatórias, e os parâmetros das aeronaves são de referência, não substituindo análises de desempenho específicas. Adicionalmente, a tabela de aeronaves típicas não contempla a resistência do pavimento das pistas, parâmetro que, em aplicações práticas, deve ser avaliado por meio da relação entre o *Pavement Classification Number* (PCN) e o *Aircraft Classification Number* (ACN), ou de metodologias equivalentes (PCR/ACR). Além disso, o estudo de caso único limita a abrangência territorial dos resultados. Esses pontos indicam oportunidades de aprimoramento, como a integração de dados reais de acessibilidade e meteorologia, a inclusão de módulos de custo e tempo de resposta e a validação da metodologia em múltiplos cenários operacionais.

Para trabalhos futuros, destaca-se a necessidade de validar sistematicamente o Índice de Isolamento Geográfico (IIG), uma das principais contribuições deste trabalho, por meio de comparações com indicadores de acessibilidade real, dados de mobilidade e séries históricas

de resposta a emergências. Essa etapa permitiria aferir a robustez e a capacidade preditiva do índice. Também se aponta como avanço relevante a quantificação da vulnerabilidade climática, atualmente tratada de forma categórica; métricas derivadas de extremos pluviométricos, frequência de eventos severos ou índices hidrometeorológicos poderiam tornar essa dimensão mais sensível às particularidades regionais.

No conjunto, a metodologia oferece uma estrutura prática e replicável para o planejamento do emprego de aeronaves de asa fixa em desastres, reduzindo incertezas e apoiando decisões rápidas e fundamentadas.

Referências

- Agência Brasil. **FAB inicia entrega de cestas básicas aos Yanomami**. Jan 2024. <https://agenciabrasil.ebc.com.br/direitos-humanos/noticia/2024-01/fab-inicia-entrega-de-cestas-basicas-aos-yanomami>. Acesso em: 19 out. 2025
- AIRBUS Defence and Space. **C295 MPA – The Versatile Maritime Hunter**. Getafe, Spain, 2023. Reference: TMMP0003/01/2023. Copyright © 2023 Airbus Defence and Space. All rights reserved.
- ANAC. **Lista de Aeródromos Civis Cadastrados no Brasil**. 2025. Acesso em: 28 out. 2025. Available at: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aeroportos-e-aerodromos/lista-de-aerodromos-civis-cadastrados>
- BAHIA, J. G. **Defesa Civil estima em cerca de 850 mil população da Bahia afetada pelas chuvas de novembro e dezembro de 2021**. jan 2022. Acesso em: [colocar data de acesso]. Available at: <https://jornalgrandebahia.com.br/2022/01/defesa-civil-estima-em-cerca-de-850-mil-populacao-da-bahia-afetada-pelas-chuvas-de-novembro-e-dezembro-de-2021/>
- BRASIL. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. 2024. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, Brasília, DF, 2024. Available at: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/index.xhtml>. Accessed: 12 oct. 2025.
- CRED. **Emergency Events Database – EM-DAT**. 2025. Université Catholique de Louvain, Brussels, 1988–. Available at: <https://www.emdat.be>. Accessed: 11 oct. 2025. Online database on global disaster events
- EMBRAER Defesa & Segurança. **KC-390 Millennium — Multi-Mission Transport Aircraft Brochure**. Gavião Peixoto, SP, Brasil, mar. 2025. Reference: KC-390 Millennium Brochure (English Edition). Copyright © 2025 Embraer S.A. All rights reserved.
- EMBRAER S.A. **Airport Planning Manual — EMB-120 Brasilia (A.P. 120/731)**. Revision 1. São José dos Campos, SP, Brasil, set. 2019. Copyright © 2019 Embraer S.A. Esta edição substitui A.P. 120/731, Revision 2 (22 May 1987).
- Força Aérea Brasileira. **Operação Verde Brasil 2 – FAB no combate a incêndios florestais no Pará**. Sep 2020. <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/36320/>. Acesso em: 19 out. 2025
- Força Aérea Brasileira. **Missão Humanitária: FAB reforça apoio às vítimas das enchentes na Bahia**. Dec 2021. <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/38471/>. Acesso em: 19 out. 2025

Força Aérea Brasileira. **Aviação – Base Aérea de Canoas conclui as operações com aviação comercial**. Oct 2024. <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/43303/>. Acesso em: 19 out. 2025

GARCIA, J. R.; FILHO, J. E. R. V. A nova geografia da agropecuária brasileira e os desafios logísticos. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie**, n. 50, acesso em: 29 out. 2025, 2021. Available at: <https://journals.openedition.org/confins/37395>

GLOBO, O. “**Com 1.500 desabrigados, prefeito de cidade baiana atingida pela enchente descreve ‘horror’**”. dec 2021. Acesso em: [colocar data de acesso]. Available at: <https://oglobo.globo.com/brasil/com-1500-desabrigados-prefeito-de-cidade-baiana-atingida-pela-enchente-descreve-horror-25318679>

IBGE. **Mapa de Climas do Brasil segundo a classificação de Nimer (1979)**. 2002. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf. Acesso em: 19 out. 2025.

ICAO. **International Civil Aviation Organization**. 2024. Montreal: ICAO, 2024. Available at: <https://www.icao.int/>. Accessed: 12 oct. 2025.

IRDR. **Peril Classification and Hazard Glossary**. 2014. Beijing: IRDR Data Working Group, 2014. Available at: <https://www.irdrinternational.org>. Accessed: 11 oct. 2025. Hazard and disaster risk terminology reference

JORDÃO, G. R. Metodologia bow-tie para análise de riscos. **Revista Gestão de Riscos, Brasileiro INTERISK**, disponível em: <https://www.brasiliano.com.br/revista-gr-116-analise-gab>. Acesso em: 25 out. 2025., 2021

LE MOS, S. C. **Identificação de trechos rodoviários destinados à operação eventual de aeronaves de asa fixa**. 2024. Trabalho de Graduação, Engenharia Civil, São José dos Campos. Available at: <https://www.civil.ita.br/graduacao/tgs/resumos/display.php?File=tg2024-06.php>

OCHA. **United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs**. 2024. New York: United Nations, 2024. Available at: <https://www.unocha.org/>. Accessed: 12 oct. 2025.

Pilatus Aircraft Ltd. **PC-12 Technical Data**. 2025. Disponível em: <https://www.pilatus-aircraft.com/en/pc-12/technical-data>. Acesso em: 02 nov. 2025.

Pilatus Aircraft Ltd. **PC-24 Technical Data**. 2025. Disponível em: <https://www.pilatus-aircraft.com/en/pc-24/technical-data>. Acesso em: 02 nov. 2025.

REBOUÇAS, S. *et al.* Logística em desastres: otimização de rotas de unidades aéreas de resgate. **Spectrum – Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa**, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), v. 1, p. 44–49, estudo de aplicação do problema de roteirização de helicópteros na resposta a desastres, 2022. Available at: <https://spectrum.ita.br/article/view/166>

SILVA, M. S. d. **A logística da Força Aérea Brasileira em resposta a desastres: o caso da Operação Acolhida**. Dissertation (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, RJ, 2020.

Estudo de caso sobre a atuação da FAB na Operação Acolhida. Available at:

[https://www.maxwell.vrac.puc-](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_tds.php?strSecao = resultado&nrSeq = 0000001821743)

[rio.br/Busca_tds.php?strSecao = resultado&nrSeq = 0000001821743](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_tds.php?strSecao = resultado&nrSeq = 0000001821743)

SKYbrary Aviation Safety. **EMB-120 Brasilia (Aircraft Type E120)**. 2025. Disponível em:

<https://skybrary.aero/aircraft/e120>. Acesso em: 02 nov. 2025.

Textron Aviation Inc. **Cessna Caravan — Specifications**. 2025. Disponível em:

https://cessna.txtav.com/en/turboprop/caravan#_model-specs. Acesso em: 02 nov. 2025.

UNDRR. **The Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction**. 2017. Geneva: United Nations, 2017. Available at:

<https://www.undrr.org/terminology/vulnerability>. Accessed: 15 oct. 2025. Official UN terminology for disaster risk reduction

WorldPop. **WorldPop – Open Spatial Demographic Data and Research**. 2025.

Southampton: WorldPop, 2025. Disponível em: <https://hub.worldpop.org/>. Acesso em: 19 out. 2025.

XAVIER, I. R.; BANDEIRA, R. A. d. M.; BANDEIRA, A. d. P. F. Análise do emprego de helicópteros para transporte aéreo logístico em resposta a desastres naturais. *In*:

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES (ANPET).

XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Proceedings [...]. Ouro Preto, MG, 2015. p. 376–384. Logística humanitária e transporte aéreo em operações de resposta a desastres. Available at: <https://www.anpet.org.br/anais2015/>

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">12 de novembro de 2025</p>	3. DOCUMENTO Nº <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-058/2025</p>	4. Nº DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">58</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Apoio à decisão para emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência			
6. AUTORA(ES): Alice Coutinho Menezes de Paula			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELA AUTORA: Desastres; Aeronaves de asa fixa; Bow-Tie; Resgate			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Pistas (de pouso e decolagem); Emergência; Aeronaves; Asas fixas; Sistemas de apoio a decisão; Operações de resgate; Infraestrutura (transporte); Segurança operacional; Transportes.			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Evandro José da Silva. Publicado em 2025.			
11. RESUMO: <p>O presente trabalho propõe uma metodologia de apoio à decisão para o emprego de aeronaves de asa fixa em situações de emergência, integrando três dimensões: vulnerabilidade geográfico-climática, mitigação de riscos e condições operacionais. A metodologia articula a padronização conceitual de ameaças, a quantificação do isolamento territorial por meio de um Índice de Isolamento Geográfico (IIG) e a modelagem de causas e barreiras de recuperação pelo método <i>Bow-Tie</i>. O modelo é aplicado ao desastre ocorrido em Jucuruçu (BA), entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022, marcado por enchentes e deslizamentos. O município apresenta vulnerabilidade geográfico-climática média-alta, e o método <i>Bow-Tie</i> destaca o transporte de suprimentos, a evacuação médica e o reconhecimento aéreo como funções prioritárias. A análise operacional indica o aeródromo de Teixeira de Freitas como base preferencial e recomenda o emprego combinado de aeronaves leves e médias, assegurando flexibilidade e rapidez na resposta. Os resultados demonstram o potencial da metodologia para reduzir incertezas e apoiar decisões rápidas e fundamentadas. Apesar de limitações relacionadas à simplificação do IIG e à ausência de custos e tempos operacionais, a abordagem oferece uma estrutura prática e replicável para o planejamento do emprego aéreo em desastres, contribuindo para a eficiência e a coordenação das ações de resposta.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO </p>			