

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

GABRIELA PASETTO FALAVIGNA

**QUANTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO RISCO DOS OBSTÁCULOS NO  
AEROPORTO INTERNACIONAL DE PORTO ALEGRE / SALGADO FILHO**

PORTO ALEGRE

2021

GABRIELA PASETTO FALAVIGNA

**QUANTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO RISCO DOS OBSTÁCULOS NO  
AEROPORTO INTERNACIONAL DE PORTO ALEGRE / SALGADO FILHO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

**Orientadora:**

Profa. Dra. Andrea Lopes Iescheck

**Coorientador:**

Prof. Dr. Sergio Florencio de Souza

PORTO ALEGRE

2021

### CIP - Catalogação na Publicação

Falavigna, Gabriela Pasetto  
Quantificação e classificação do risco dos  
obstáculos no Aeroporto Internacional de Porto  
Alegre/Salgado Filho / Gabriela Pasetto Falavigna. --  
2021.

132 f.

Orientadora: Andrea Lopes Iescheck.

Coorientador: Sergio Florencio de Souza.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em  
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de  
Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre,  
BR-RS, 2021.

1. Zona de Proteção de Aeródromo. 2. Processo de  
Análise Hierárquica (AHP). 3. Análises espaciais. 4.  
Sistema de Informação Geográfica (SIG). 5. Modelagem  
3D. I. Iescheck, Andrea Lopes, orient. II. Souza,  
Sergio Florencio de, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

## **AGRADECIMENTOS**

Ao CNPq pela concessão da bolsa de pesquisa, indispensável para a realização desse estudo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo espaço de formação e pelas experiências enriquecedoras vivenciadas durante o desenvolvimento do mestrado.

Aos meus orientadores Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Andrea Lopes Iescheck e Prof. Dr. Sergio Florencio de Souza pela oportunidade em me orientar e pelas contribuições inestimáveis na construção desse trabalho e na minha formação.

Ao Sr. Alberto Augusto Roennau Bott por ter aceitado responder o questionário elaborado para essa pesquisa, compartilhando seus conhecimentos e experiências na área da aviação civil, sem os quais a pesquisa não seria tão exitosa.

Aos Srs. Diógenes Luciano Sartor e Luiz Otavio Gemelli, funcionários da empresa Fraport Brasil, pela sua atenção e disponibilidade em esclarecer dúvidas e compartilhar informações, contribuindo para as discussões dos resultados da pesquisa.

Ao meu amigo e companheiro Gustavo Diego Bledow pela paciência, pelas conversas, sugestões, aprendizados e pelo constante estímulo, participando em vários momentos na construção desse trabalho.

À minha família pelo suporte, apoio e pela torcida constantes, estando presentes em todos os momentos da minha vida.

Inventar é imaginar o que ninguém pensou; é acreditar no que ninguém jurou; é arriscar o que ninguém ousou; é realizar o que ninguém tentou. Inventar é transcender.

Santos Dumont

## RESUMO

A presença de obstáculos na zona de proteção dos aeródromos representa problemas complexos para a segurança aérea e a economia das cidades. Essas violações podem reduzir ou cancelar procedimentos de pouso, além de impedir a ampliação de aeródromos e limitar o porte das aeronaves permitidas a operar no aeródromo. O Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromo (PBZPA) consiste em um conjunto de superfícies limitadoras de obstáculos, as quais estabelecem os limites que os objetos podem se projetar no espaço aéreo sem afetar adversamente a segurança e a regularidade das operações aéreas. O objetivo dessa pesquisa consiste em identificar, quantificar, classificar e representar o risco dos obstáculos existentes na zona de proteção do Aeroporto Internacional de Porto Alegre, a fim de ajudar no gerenciamento eficaz dos mesmos e na adoção de ações mitigadoras do risco. Nessa pesquisa foram avaliados os lotes, as edificações, os postes e as torres existentes na área de estudo que se projetam acima das superfícies limitadoras do PBZPA. A metodologia envolveu o desenvolvimento de um modelo de classificação do risco de obstáculos, a geração de representações 3D e a realização de análises espaciais. O modelo de classificação do risco de obstáculos resultou da aplicação do método de análise hierárquica (AHP) com base no conhecimento de um especialista da aviação civil. Foram definidos quatro fatores de risco e um questionário foi elaborado para obter a opinião do especialista. Os resultados mostraram que a influência mais significativa no risco de um obstáculo é o quanto esse obstáculo se projeta acima das superfícies limitadoras e que a natureza do obstáculo não influencia significativamente o risco, mas melhora o modelo. O modelo de classificação do risco de obstáculos desenvolvido pode ser adaptado para qualquer aeroporto e legislação do espaço aéreo. Na área de estudo, que compreende 174,60 km<sup>2</sup>, 0,58 km<sup>2</sup> (0,33%) representam obstáculos de risco médio, 1,26 km<sup>2</sup> (0,72%) obstáculos de risco alto e 0,05 km<sup>2</sup> (0,03%) obstáculos de risco muito alto. Isso significa que 1,89 km<sup>2</sup> (1,1%) da área de estudo, considerando lotes, edificações, postes e torres, representam riscos às operações aéreas do aeroporto.

**Palavras-chave:** Zona de Proteção de Aeródromo. Processo de Análise Hierárquica (AHP). Análises espaciais. Modelagem 3D.

## ABSTRACT

Obstacles in aerodromes protection zones pose complex problems for air safety and the economy of cities. These violations can reduce or cancel landing procedures, in addition to preventing the expansion of aerodromes and limiting the size of aircraft allowed to operate at airports. The Aerodrome Protection Zone Basic Plan (PBZPA) consists of a set of obstacles limiting surfaces that establish the limits that objects can protrude into airspace without affect the safety and regularity of air operations. This research aims to identify, quantify, classify, and represent the risk of obstacles in the Porto Alegre International Airport protection zone, assisting in the effective management of obstacles and approaches to risk mitigation actions. In this research, the urban land parcels (plots), buildings, poles and towers within study area that protrude the PBZPA's limiting surfaces were evaluated. The methodology comprises developing the obstacles risk classification model, generating 3D representations, and performing spatial analysis. The obstacles risk classification model resulted from applying the analytic hierarchy process (AHP) based on a specialist in civil aviation knowledge. Four risk factors were defined and a questionnaire to obtain an expert opinion was prepared. The results showed that the most significant influence on the risk of an obstacle is how much that obstacle protrudes the limiting surfaces and the nature of the obstacle does not significantly influence the risk but improves the model. The obstacles risk classification model developed can be adapted for any airport and airspace legislation. In the study area, which covers 174.60 km<sup>2</sup>, 0.58 km<sup>2</sup> (0.33%) have medium-risk obstacles, 1.26 km<sup>2</sup> (0.72%) have high-risk obstacles, and 0.05 km<sup>2</sup> (0.03%) have very high-risk obstacles. These results mean that 1.89 km<sup>2</sup> (1.1%) of the study area, considering plots, buildings, poles, and towers, poses risks to airport air operations.

**Keywords:** Aerodrome Protection Zone. Analytic Hierarchy Process (AHP). Spatial analysis. 3D Modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Superfícies limitadoras de obstáculos.....	19
Figura 2 – Matriz recíproca.....	24
Figura 3 – Estrutura hierárquica.....	24
Figura 4 – Etapas da metodologia.....	36
Figura 5 – Área de estudo.....	39
Figura 6 – Lotes e edificações.....	44
Figura 7 – Altitude média dos lotes.....	44
Figura 8 – Altitude máxima das edificações.....	45
Figura 9 – Postes, torres e antenas.....	46
Figura 10 – MDS de uma região no entorno do aeroporto.....	47
Figura 11 – MDT de uma região no entorno aeroporto.....	48
Figura 12 – PBZPA do Aeródromo Salgado Filho.....	49
Figura 13 – Fração de uma das ortofotos que compõem a área de estudo.....	50
Figura 14 – Representação dos eixos viários.....	51
Figura 15 – Superfícies limitadoras de obstáculos com rampas.....	86
Figura 16 – Detalhe das superfícies de aproximação (azul) e de transição (magenta), da superfície cônica (verde) e da superfície de interesse público (vermelho).....	86
Figura 17 - Helipontos e seus PBZPH.....	87
Figura 18 – PBZPA do Aeródromo Salgado Filho.....	88
Figura 19 – Representações do MD-PBZPA.....	89
Figura 20 – Representação da altitude dos postes e das torres.....	91
Figura 21 – Lotes críticos e atingidos pelo PBZPA.....	93
Figura 22 – Viabilidade construtiva dos lotes.....	96
Figura 23 – Edificações críticas e atingidas pelo PBZPA.....	97
Figura 24 – Torres de transmissão e telecomunicação atingidas pelo PBZPA.....	100
Figura 25 – Postes críticos e atingidos pelo PBZPA.....	101
Figura 26 – Fatores e notas de risco.....	109
Figura 27 – Mapa de risco dos obstáculos do SBPA.....	111
Figura 28 – Obstáculos do aeroporto e respectivos níveis de risco.....	113
Figura 29 – Configuração espacial atual da área de expansão do aeroporto.....	114
Figura 30 – Risco dos obstáculos próximos à cabeceira 11 da pista do aeroporto.....	116



Figura 31 – Risco dos obstáculos próximos à cabeceira 29 da pista do aeroporto.	116
Figura 32 – Risco dos obstáculos próximos à cabeceira 29 da pista do aeroporto.	117
Figura 33 – Risco dos obstáculos.	117
Figura 34 – Risco dos obstáculos.	118
Figura 35 – Risco dos obstáculos.	118
Figura 36 – Risco dos obstáculos.	119

### **Artigo 1**

<b>Figure 1:</b> Location of the study area.	03
<b>Figure 2:</b> Methodology steps.	04
<b>Figure 3:</b> PBZPA 3D Digital Model.	05
<b>Figure 4:</b> Plots classified by average height.	06
<b>Figure 5:</b> Buildings classified by maximum height.	06
<b>Figure 6:</b> Plots classification according to PBZPA.	07
<b>Figure 7:</b> Constructive viability of plots.	08
<b>Figure 8:</b> 3D representation of buildings reached or not by the PBZPA.	09
<b>Figure 9:</b> Detail of buildings reached by PBZPA.	09
<b>Figure 10:</b> Classification of buildings according to the PBZPA.	10

### **Artigo 2**

<b>Figure 1:</b> Location of Porto Alegre International Airport.	04
<b>Figure 2:</b> Methodology's flowchart.	05
<b>Figure 3:</b> Risk factors: (a) Distance; (b) Location; (c) Type; (d) Protrusion.	06
<b>Figure 4:</b> Risk factors weights.	13

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala fundamental dos números absolutos. ....	23
Tabela 2 – Índice de consistência randômico médio (R. I.).....	27
Tabela 3 – Quantificação dos lotes atingidos e considerados críticos. ....	95
Tabela 4 – Quantificação das edificações atingidas e consideradas críticas. ....	99
Tabela 5 – Quantificação dos postes e das torres atingidos e críticos.....	102

### **Artigo 1**

<b>Table 1:</b> Information of the identified plots.....	08
<b>Table 2:</b> Information of identified buildings.....	10

### **Artigo 2**

<b>Table 1:</b> Saaty's fundamental scale.....	07
<b>Table 2:</b> Average random consistency index (R.I.).....	08
<b>Table 3:</b> Pairwise comparison matrix.....	11
<b>Table 4:</b> Partial derivatives matrix.....	11
<b>Table 5:</b> Perturbation matrix.....	12
<b>Table 6:</b> Modified pairwise comparison matrix.....	13
<b>Table 7:</b> Classes of the risk factors and risk scores.....	13

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Analytic Hierarchy Process
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANP	Analytic Network Process
CEEE	Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica
CGNA	Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea
COMAER	Comando da Aeronáutica
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ICA	Instituto de Cartografia Aeronáutica
ICAO	International Civil Aviation Organization
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
OPEA	Objeto Projetado no Espaço Aéreo
OSGeo	Open Source Geospatial Foundation
PBZPA	Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromo
PBZPH	Plano Básico de Zona de Proteção de Heliponto
PEZPA	Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo
PMPA	Prefeitura Municipal de Porto Alegre
PZPANA	Plano de Zona de Proteção de Auxílios à Navegação Aérea
PZPREAH	Plano de Zona de Proteção de Rotas Especiais de Aviões e Helicópteros
SBPA	Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
TM-POA	Transversa de Mercator para Porto Alegre
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS	World Geodetic System

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
<b>2.1</b>	<b>Legislação do espaço aéreo</b> .....	17
<b>2.2</b>	<b>Processo de Análise Hierárquica (AHP)</b> .....	22
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	36
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo</b> .....	38
<b>3.2</b>	<b>Dados geoespaciais</b> .....	41
3.2.1	<i>Lotes e Edificações</i> .....	43
3.2.2	<i>Torres e Postes</i> .....	45
3.2.3	<i>Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT)</i> ...	46
3.2.4	<i>PBZPA</i> .....	48
3.2.5	<i>Ortofotos e Eixos viários</i> .....	49
<b>3.3</b>	<b>Softwares</b> .....	52
<b>4</b>	<b>PRODUÇÕES ACADÊMICAS</b> .....	53
	<i>Artigo 1: 3D Modeling to Identify and Quantify Obstacles in Aerodrome Protection Zone</i> .....	54
	<i>Artigo 2: Obstacles Risk Classification Model in Aerodromes Protection Zones using the Multi-Criteria Decision Analysis AHP</i> .....	66
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	84
<b>5.1</b>	<b>MD-PBZPA</b> .....	85
<b>5.2</b>	<b>Altimetria postes e torres</b> .....	90
<b>5.3</b>	<b>Identificação e quantificação de obstáculos</b> .....	92
<b>5.4</b>	<b>Mapa de risco dos obstáculos</b> .....	105
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES</b> .....	120
	<b>FINANCIAMENTO</b> .....	123
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	124
	<b>APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO</b> .....	129

## 1 INTRODUÇÃO

Violações na zona de proteção dos aeródromos representam problemas para a segurança aérea, bem como para a economia das cidades. A presença de obstáculos na zona de proteção pode causar restrições às operações aéreas, como a redução de alternativas de pouso e cancelamento de procedimentos de pouso das aeronaves (SANTOS; MÜLLER, 2014); além disso, pode impedir a ampliação dos aeródromos, limitar o porte das aeronaves permitidas a operar no aeródromo, limitar a oferta de assentos para passageiros e o espaço nos porões para armazenamento de cargas. Diante disso, a manutenção da segurança das operações aéreas é considerada uma questão crítica para a aviação civil.

O Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromo (PBZPA) consiste em um conjunto de superfícies limitadoras de obstáculos, que estabelece as restrições impostas ao aproveitamento das propriedades dentro da zona de proteção de um aeródromo (DECEA, 2019). Essas superfícies limitadoras de obstáculos definem os limites que os objetos podem se projetar no espaço aéreo sem afetar adversamente a segurança e a regularidade das operações aéreas (BRASIL, 2015).

O objeto de estudo dessa pesquisa está inserido no contexto da segurança aérea e consiste nos obstáculos que violam a zona de proteção dos aeródromos, ou seja, são os objetos que ultrapassam os limites altimétricos estabelecidos pelas superfícies limitadoras definidas no PBZPA dos aeroportos. Especificamente, serão avaliados os lotes, as edificações, os postes e as torres existentes na área de estudo que não respeitam a altitude máxima permitida pelas superfícies do PBZPA e que, portanto, podem afetar adversamente a segurança e a regularidade das operações aéreas do aeroporto.

Medeiros e Correia (2010) fizeram um estudo sobre inconformidades na infraestrutura de aeroportos brasileiros quanto à segurança aérea e observaram que oito dos vinte maiores aeroportos brasileiros em movimento de passageiros apresentavam irregularidades. O nome desses aeroportos não foi citado no estudo a pedido da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Essas inadequações referem-se principalmente à ausência da área de segurança de fim de pista e à presença de obstáculos na faixa de pista e de obstáculos que violam as superfícies limitadoras de obstáculos. De acordo com o estudo, todos os oito aeroportos apresentavam

obstáculos na faixa de pista, seis possuíam obstáculos que violavam a superfície de transição e dois aeroportos, obstáculos que violavam a superfície de aproximação e decolagem. Tais irregularidades, que são de interesse dessa pesquisa, representam mais de 30% das inconformidades relatadas no estudo.

A segurança da aeronave em torno da vizinhança de um aeródromo, durante a aproximação, a decolagem e o taxiamento é um pré-requisito absoluto no transporte aéreo (AUDU, 2016) e a correta identificação de obstáculos na periferia dos aeroportos é primordial para garantir a segurança e a regularidade das operações aéreas. Nesse contexto, existem vários trabalhos referentes a proposições de metodologias para identificar e quantificar obstáculos a aeroportos (PARRISH; NOWAK, 2009; PINELLI; VERACINI, 2015; AUDU, 2016; FALAVIGNA; IESCHECK; SOUZA, 2020).

Além da identificação e quantificação de obstáculos a aeroportos há a necessidade de avaliação do risco que esses obstáculos representam à segurança aérea. O conhecimento do nível de risco de cada obstáculo é importante para o gerenciamento eficaz dos mesmos e para abordagens de ações mitigadoras para redução do risco às operações aéreas. Saber as áreas que apresentam o risco mais elevado às operações aéreas é imprescindível para garantir um nível aceitável de segurança operacional nos aeroportos e para que os gestores sejam capazes de realizar melhorias na estrutura aeroportuária de forma eficiente (BARROSO; CORREIA, 2014).

Segundo Hall *et al.* (2008), as pesquisas sobre avaliação de riscos na área da aviação podem ser divididas em quatro grupos, são eles: projeto do aeroporto, risco de terceiros, risco de implementação e risco operacional. Com base nessa divisão, Fortes e Correia (2012) agruparam os estudos sobre risco em duas áreas: risco operacional e projeto do aeroporto. A primeira área abrange os estudos relacionados ao risco de colisão com obstáculos durante a aproximação de uma aeronave ao aeroporto. E a segunda área envolve os estudos sobre avaliação do risco considerando cenários de excursão de pista e de acidentes após o pouso ou durante a decolagem de uma aeronave e pesquisas sobre a adequabilidade das dimensões de pistas, da área de segurança de fim de pista, das dimensões das superfícies limitadoras de obstáculos e das distâncias entre a pista e as áreas de taxiagem do aeroporto.

Existem várias pesquisas inseridas na segunda área, sendo frequentes estudos sobre excursão de pista (FORTES; CORREIA, 2012; CORREIA; NETO, 2014; BARROSO; CORREIA, 2014). Poucos são os estudos conduzidos na primeira área, principalmente os que consideram as superfícies limitadoras, estabelecidas no PBZPA dos aeroportos, na avaliação do risco dos obstáculos que violam a zona de proteção dos aeródromos. Essa pesquisa está inserida no grupo “risco operacional”, conforme divisão de Hall *et al.* (2008), ou seja, na primeira área descrita por Fortes e Correia (2012). Além de existirem poucos estudos sobre o assunto, não há uma padronização a respeito de como classificar o risco desses obstáculos. Existe uma diretriz da ICAO (*International Civil Aviation Organization*) sobre classificação do risco de segurança. Nessa diretriz, o risco dos obstáculos é classificado quanto à probabilidade de um acidente ocorrer e aos possíveis impactos econômicos, sociais e ambientais relacionados a esse acidente, sendo enquadrado nas categorias intolerável, tolerável e aceitável (ICAO, 2018).

A avaliação do risco de obstáculos a aeroportos compreende um cenário complexo, em que vários fatores devem ser considerados simultaneamente na modelagem do risco. O Processo de Análise Hierárquica (AHP – *Analytic Hierarchy Process*) é um método de avaliação multicritério, desenvolvido por Saaty em 1980, empregado em cenários complexos de tomada de decisão. Esse método baseia-se na decomposição do problema em níveis de hierarquia para melhor compreensão e avaliação do mesmo. De um modo geral, as etapas envolvidas no método consistem em: definir os fatores relevantes ao estudo; organizar os fatores em uma matriz de comparação, chamada “matriz de comparação pareada”; realizar comparações par a par (julgamentos) para estabelecer a importância relativa dos fatores e, por fim, obter a relevância (peso) de cada fator para a análise. Para avaliar a consistência dos resultados são calculados o índice de consistência e a razão de inconsistência da matriz. Valores obtidos até 0,10 (10%) para a razão de inconsistência são considerados toleráveis (SAATY, 1984).

Pesquisas sobre avaliação do risco de obstáculos em cenários de excursão de pista geralmente consideram na análise a localização geográfica dos obstáculos em relação à pista do aeroporto e enquadram os obstáculos conforme a classificação da ICAO (FORTES; CORREIA, 2012; CORREIA; NETO, 2014; BARROSO; CORREIA,

2014). Nesses estudos, quanto mais próximo o obstáculo está da pista do aeroporto, maior risco ele apresenta às operações de pouso e decolagem das aeronaves.

Barroso e Correia (2014) utilizaram o método AHP para avaliar o risco de obstáculos ao Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro; a importância relativa dos fatores, bem como a relevância de cada fator considerado na análise foi derivada de respostas dadas por um especialista, por meio de um questionário elaborado pelos autores. Nesse estudo, foram considerados dez fatores de risco, escolhidos com base na tabela de gravidade do risco de segurança da ICAO (ICAO, 2009), que são: inúmeras mortes; lesão grave a pessoas; lesão leve a pessoas; equipamento destruído; grande dano ao equipamento; pequeno dano ao equipamento; impossibilidade do operador de executar sua tarefa; redução da habilidade do operador de executar sua tarefa; grande impacto ambiental e pequeno impacto ambiental. A razão de inconsistência obtida para a matriz de comparação foi de 17%, o que ultrapassa o valor considerado tolerável pelo método. Os autores, no entanto, não revisaram a matriz de comparação como recomendado no método AHP, pois consideraram que em cenários complexos o valor de inconsistência não invalida os resultados alcançados, servindo mais como um aviso aos usuários. Ao final do método foram obtidos valores de risco para cada obstáculo avaliado, em que o valor mais alto representa o obstáculo com o maior risco associado.

Wang, Hu e Tao (2004) utilizaram o método AHP para modelar o risco de obstáculos que violam as superfícies limitadoras de obstáculos. Em seu estudo, os obstáculos ao Aeroporto Santa Barbara, Califórnia (EUA), foram analisados considerando as superfícies limitadoras, estabelecidas pela respectiva legislação do espaço aéreo, e quatro fatores de risco, são eles: distância, localização, tipo e projeção. O primeiro fator (distância) consiste na distância entre o obstáculo e o eixo da pista de pouso/decolagem; aos obstáculos próximos à pista foram atribuídos os mais altos níveis de risco. O segundo fator (localização) refere-se ao enquadramento dos obstáculos nas superfícies limitadoras; aos obstáculos inseridos nas superfícies de aproximação, aproximação/transição e na superfície horizontal interna foram atribuídos os mais altos níveis de risco. O terceiro fator (tipo) refere-se à natureza dos obstáculos (relevo, edificações, árvores e torres); às edificações e às torres foram atribuídos os mais altos níveis de risco. Por fim, o quarto fator (projeção) consiste na projeção dos obstáculos acima de cada superfície limitadora; aos



obstáculos que se projetam acima das superfícies de aproximação, aproximação/transição e da superfície horizontal interna foram atribuídos os mais altos níveis de risco. A importância relativa dos fatores foi obtida de forma empírica. Após a ponderação dos fatores, o fator projeção apresentou o maior peso, seguido dos fatores localização, distância e tipo. O resultado consistiu em um mapa de risco, em que os obstáculos foram classificados como de alto, médio e baixo risco. A razão de inconsistência obtida para a matriz de comparação desse estudo foi de 1%. Apesar de o valor estar dentro do intervalo considerado tolerável pelo método, não considerar o quanto os obstáculos se projetam acima das superfícies limitadoras na classificação do risco pode levar a inconsistências nos resultados, já que obstáculos que se projetam mais ou menos acima da mesma superfície apresentarão níveis de risco associados diferentes.

Diante do exposto, é apresentado o seguinte problema de pesquisa: Considerando os obstáculos que violam a zona de proteção dos aeródromos, como classificar o risco que esses obstáculos representam à segurança e à manutenção das operações aéreas dos aeroportos?

E como hipótese da pesquisa: Se existem obstáculos que se projetam acima das superfícies limitadoras, estabelecidas pelo PBZPA dos aeroportos, se forem definidos fatores de risco para esses obstáculos e se for estabelecida a matriz de comparação pareada dos fatores de risco, então a partir do método AHP pode-se classificar o risco que os obstáculos representam à segurança e à manutenção das operações aéreas dos aeroportos.

Assim, propõe-se como objetivo geral dessa pesquisa classificar o risco dos obstáculos existentes na zona de proteção do Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho (SBPA), para auxiliar o gerenciamento eficaz dos obstáculos e abordagens de ações mitigadoras a fim de evitar o comprometimento da segurança e da manutenção das operações aéreas do aeroporto. Inserido no objetivo geral e com a finalidade de verificar a hipótese proposta, deseja-se com essa pesquisa alcançar os seguintes objetivos específicos: identificar e quantificar os obstáculos que violam a zona de proteção do aeroporto; definir fatores de risco para os obstáculos; obter a relevância (peso) de cada fator de risco para a análise e avaliar os diferentes níveis de risco apresentados pelos obstáculos com relação ao comprometimento da segurança e da manutenção das operações aéreas do

aeroporto. Para alcançar os objetivos propostos foi elaborado um questionário e foram geradas representações tridimensionais e temáticas da área de estudo, bem como foram realizadas análises espaciais e álgebra de mapas em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), a partir do uso de dados geoespaciais e do método de decisão multicritério AHP.

A presente dissertação está estruturada na forma de artigos científicos e apresenta a seguinte organização: no primeiro item, Introdução, foi apresentado o objeto de estudo e seu contexto, a problematização, o estado da arte, o problema de pesquisa, a hipótese e os objetivos geral e específicos do presente trabalho; no segundo item, Fundamentação Teórica, são trazidos os conceitos e o referencial bibliográfico utilizado durante a pesquisa; no terceiro item, Metodologia, são descritas as etapas metodológicas, a área de estudo considerada para o desenvolvimento da pesquisa, bem como a justificativa para a sua escolha, e são apresentados os dados geoespaciais e os *softwares* utilizados; no quarto item, Produções Acadêmicas, são apresentados os artigos científicos produzidos durante o mestrado, os quais detalham a metodologia adotada no trabalho e apresentam a estruturação dos dados digitais, as análise espaciais e o método AHP; no quinto item, Resultados e Discussões, são apresentados os resultados obtidos com a pesquisa e são realizadas discussões acerca desses resultados; e, por fim, no sexto item, Conclusão e Recomendações, são feitas considerações a respeito do trabalho, bem como recomendações para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a base teórica utilizada para o desenvolvimento da dissertação. Os conceitos aqui apresentados se referem aos elementos aeroportuários e às zonas de proteção de aeródromo; será abordada a legislação que regulamenta o espaço aéreo, bem como os aspectos técnicos que definem as superfícies limitadoras de obstáculos. Além disso, será apresentado o método de análise multicritério AHP, que foi utilizado na metodologia.

### 2.1 Legislação do espaço aéreo

O Comando da Aeronáutica, por meio da Portaria nº 957/GC3, de 09 de julho de 2015, regulamenta o espaço aéreo brasileiro e dispõe sobre as restrições aos objetos projetados no espaço aéreo que possam afetar adversamente a segurança ou a regularidade das operações aéreas (BRASIL, 2015). No artigo 2º da referida Portaria são definidos vários elementos aeroportuários e, para o melhor entendimento dos termos e expressões utilizados nesse trabalho, são apresentadas a seguir algumas definições consideradas importantes para a pesquisa.

- a) **Aeródromo:** área definida em terra ou na água (que inclui todas as suas edificações, instalações e equipamentos) destinada total ou parcialmente à chegada, partida e movimentação de aeronaves na superfície.
- b) **Aeroporto:** aeródromo público dotado de edificações, instalações e equipamentos para apoio às operações de aeronaves e de embarque/desembarque de pessoas e/ou processamento de cargas.
- c) **Altitude:** distância vertical de um nível, ponto ou objeto considerado como um ponto, medida a partir do nível médio do mar.
- d) **Altitude/Altura Livre de Obstáculos (OCA/H):** a mais baixa altitude/altura acima da elevação do aeródromo ou da cabeceira da pista, conforme o caso, utilizada no estabelecimento do critério de separação de obstáculos apropriado.
- e) **Altura:** distância vertical de um nível, ponto ou objeto considerado como um ponto, medido a partir de uma superfície de referência.
- f) **Cabeceira (THR):** início da parcela da pista utilizável para a operação de pouso ou decolagem.
- g) **Elevação do Aeródromo:** altitude do ponto mais elevado na área de pouso.
- h) **Faixa de Pista:** área definida no aeródromo que inclui a pista de pouso e as zonas de parada, se disponíveis, destinada a proteger a aeronave durante as operações de pouso e decolagem e a reduzir o risco de danos à aeronave, em caso de saída dos limites da pista. Para efeito do

estabelecimento das superfícies limitadoras de obstáculos, as zonas de parada não serão consideradas, mesmo que disponíveis.

i) **Objeto:** objeto, de qualquer natureza, temporária ou permanente, fixa ou móvel, sujeito à análise sob os aspectos de uso do espaço aéreo nacional, utilizando-se os parâmetros estabelecidos nesta Portaria e em norma complementar do COMAER.

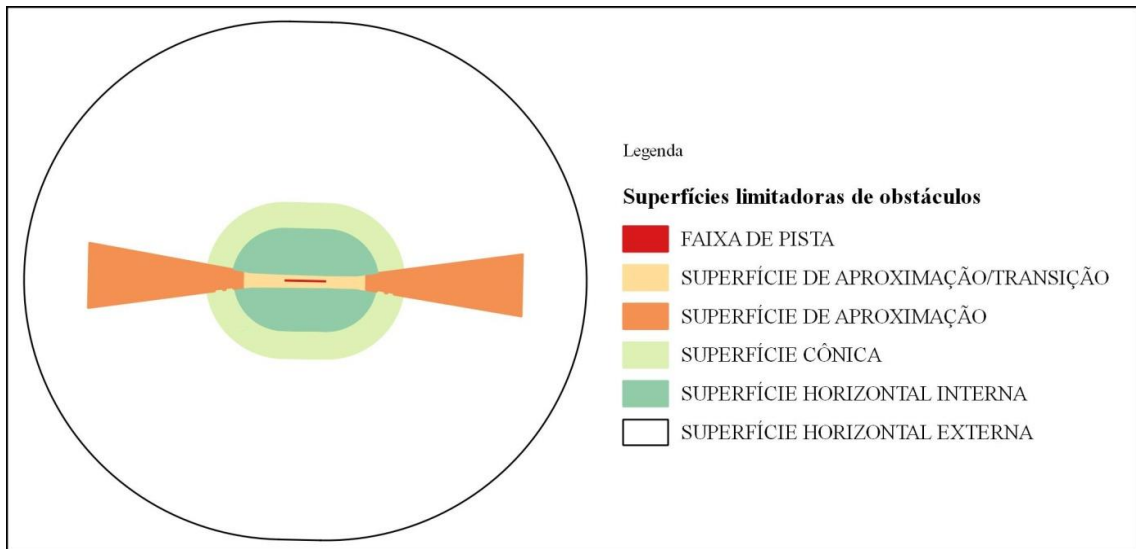
j) **Objeto Existente:** um objeto natural ou artificial cuja existência é anterior à construção do aeródromo ou a alguma modificação de suas características físicas ou operacionais.

k) **Obstáculo:** todo objeto de natureza permanente ou temporária, fixo ou móvel, ou parte dele, que esteja localizado em uma área destinada à movimentação de aeronaves no solo, ou que se estenda acima das superfícies destinadas à proteção das aeronaves em voo, ou ainda que esteja fora ou abaixo dessas superfícies definidas e cause efeito adverso à segurança ou regularidade das operações aéreas.

As zonas de proteção de aeródromos são definidas por um conjunto de planos, que podem ser gerais, específicos ou básicos. Esses planos são determinados por superfícies limitadoras tridimensionais (3D), as quais estabelecem o espaço aéreo que deve permanecer livre de obstáculos. A finalidade dessas superfícies limitadoras de obstáculos consiste em disciplinar o uso e ocupação do solo de modo a garantir a segurança e a regularidade das operações aéreas. Fazem parte desse conjunto de planos o Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromo (PBZPA), o Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo (PEZPA), o Plano de Zona de Proteção de Auxílios à Navegação Aérea (PZPANA), o Plano Básico de Zona de Proteção de Heliponto (PBZPH) e o Plano de Zona de Proteção de Rotas Especiais de Aviões e Helicópteros (PZPREAH) (BRASIL, 2015).

O Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromo (PBZPA) consiste em um conjunto de superfícies limitadoras de obstáculos (Figura 1), que estabelece as restrições impostas ao aproveitamento das propriedades dentro da zona de proteção de um aeródromo (DECEA, 2019). Essas superfícies limitadoras de obstáculos definem os limites que os objetos podem se projetar no espaço aéreo sem afetar adversamente a segurança e a regularidade das operações aéreas (BRASIL, 2015).

Figura 1 – Superfícies limitadoras de obstáculos.



Fonte: Elaboração própria.

O Plano Específico de Zona de Proteção de Aeródromo (PEZPA) consiste em um documento de aplicação específica para determinados aeródromos selecionados a critério do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e, assim como o PBZPA, também impõem restrições ao aproveitamento das propriedades dentro da zona de proteção de aeródromos (BRASIL, 2015). O PEZPA é definido em função das superfícies limitadoras aplicáveis ao PBZPA e ao PZPANA (Plano de Zona de Proteção de Auxílios à Navegação Aérea) (BRASIL, 2015).

O PZPANA consiste em um conjunto de superfícies limitadoras que impõem restrições ao aproveitamento das propriedades no entorno dos auxílios à navegação aérea (BRASIL, 2015). São superfícies, estabelecidas em função do tipo de auxílio à navegação aérea, que delimitam o espaço livre necessário no entorno dos auxílios para o correto funcionamento dos mesmos (BRASIL, 2015). Para atender as necessidades operacionais dos aeródromos, os auxílios podem ser instalados dentro ou fora da área patrimonial dos aeródromos (BRASIL, 2015). Segundo o artigo 47 da Portaria nº 957/GC3, as superfícies limitadoras do PZPANA têm por finalidade disciplinar a ocupação do solo de modo a garantir a integridade dos sinais eletromagnéticos e/ou luminosos transmitidos e/ou irradiados pelos auxílios à navegação aérea (BRASIL, 2015).

O Plano Básico de Zona de Proteção de Heliponto (PBZPH) consiste em um “conjunto de superfícies limitadoras de obstáculos que estabelece as restrições

impostas ao aproveitamento das propriedades no entorno de um heliponto” (BRASIL, 2015, p. 8). De acordo com o artigo 25 da Portaria nº 957/GC3, as superfícies limitadoras do PBZPH são estabelecidas em função da classe de performance do helicóptero crítico para cada Área de Aproximação Final e Decolagem; do formato da Área de Aproximação Final e Decolagem; do tipo e período de operação e do diâmetro do rotor do helicóptero crítico (BRASIL, 2015).

O Plano de Zona de Proteção de Rotas Especiais de Aviões e Helicópteros (PZPREAH) consiste em um conjunto de superfícies limitadoras que disciplinam o uso e ocupação do solo no entorno das rotas especiais de aviões e helicópteros (BRASIL, 2015). O PZPREAH é definido em função da superfície de proteção do voo visual em rota e esta, por sua vez, é estabelecida de acordo com o tipo de rota especial (avião ou helicóptero) e a existência ou não de espaço aéreo controlado (BRASIL, 2015). A finalidade da superfície de proteção do voo visual em rota é garantir a segurança e a regularidade das operações aéreas das aeronaves, mantendo as áreas de proteção de procedimentos de navegação aérea livres de obstáculos (BRASIL, 2015).

Os artigos 109 e 113 da Portaria nº 957/GC3 tratam dos objetos que devem ser submetidos à autorização do Órgão Regional do DECEA. Segundo os mesmos, o objeto ou a extensão de objeto, de qualquer natureza, dentro dos limites laterais da superfície de aproximação, deve ser submetido à autorização do Órgão Regional do DECEA, quando se encontrar: dentro da primeira seção; dentro da segunda seção e possuir altura superior a 60 metros em relação à borda interna; dentro da seção horizontal e possuir altura superior a 140 metros em relação à borda interna; dentro de 3.000 metros da borda interna, ou além de 3.000 metros da borda interna e possuírem altura superior a 60 metros em relação à borda interna (BRASIL, 2015). Além desses, também devem ser submetidos à autorização do Órgão Regional do DECEA os objetos ou a extensão destes, de qualquer natureza, que se localizarem:

[...] dentro dos limites laterais da superfície de transição; dentro dos limites laterais da superfície horizontal interna, quando possuir altura superior a 25 metros em relação à elevação do aeródromo e se elevar acima da superfície do terreno em mais de 8 metros; dentro dos limites laterais da superfície cônica, quando possuir altura superior a 45 metros em relação à elevação do aeródromo e se elevar acima da superfície do terreno em mais de 19 metros; dentro dos limites laterais da superfície de proteção do voo visual, quando possuir altura superior a 55 metros em relação à elevação do aeródromo e se elevar acima da superfície do terreno em mais de 30 metros; dentro dos limites laterais da superfície horizontal externa, quando

possuir altura superior a 150 metros em relação à elevação do aeródromo e se elevar acima da superfície do terreno em mais de 30 metros; ou [...] fora dos limites laterais de um plano de zona de proteção, quando possuir altura igual ou superior a 150 metros acima da superfície do terreno (BRASIL, 2015, p. 46-47).

A Portaria nº 957/GC3 define as superfícies limitadoras de obstáculos, seus parâmetros e suas dimensões. No entanto, o DECEA, através da publicação de Portarias, aprova o PBZPA de cada aeroporto, adaptando as superfícies limitadoras de obstáculos e suas dimensões de acordo com as características de cada aeródromo e de seu entorno.

O PBZPA do Aeródromo Salgado Filho foi aprovado pela Portaria DECEA nº 260/ICA, de 23 de setembro de 2016, publicada no DOU nº 190, de 03 de outubro de 2016. Este PBZPA estabelece as restrições impostas ao aproveitamento das propriedades localizadas dentro dos limites laterais das superfícies limitadoras de obstáculos nele definidas, de acordo com a Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986, o “Código Brasileiro de Aeronáutica”, e a Portaria nº 957/GC3, de 09 de julho de 2015 (ICA, 2016).

O artigo 5º, da Portaria DECEA nº 260/ICA, afirma que:

Art. 5º Todos os procedimentos inerentes aos Planos aprovados por esta Portaria deverão observar e atender obrigatoriamente aos requisitos da Portaria nº 957/GC3, de 9 de julho de 2015, no que se refere às restrições relativas aos objetos que possam afetar adversamente a segurança ou a regularidade das operações aéreas (ICA, 2016, p. 2).

O Anexo I da Portaria DECEA nº 260/ICA traz as características do aeródromo e das superfícies limitadoras de obstáculos. Como o Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho está passando por um processo de ampliação da pista de pouso e decolagem, o Anexo I contém as características atuais e futuras (pós-expansão da pista) do aeroporto e das superfícies limitadoras de obstáculos. Atualmente, a pista do aeroporto possui 2.280 metros de extensão e ambas as cabeceiras 11 e 29 possuem elevação de 3,4 metros. Quando a pista do aeroporto for ampliada, esta passará a ter um comprimento de 3.200 metros e a elevação da cabeceira 29 passará para 3,7 metros (ICA, 2016); isto é, haverá um desnível de 30 centímetros entre as cabeceiras da pista.

## 2.2 Processo de Análise Hierárquica (AHP)

O Processo de Análise Hierárquica (AHP – *Analytic Hierarchy Process*) é um método de avaliação multicritério, desenvolvido por Thomas L. Saaty em 1980, empregado em cenários complexos de tomada de decisão nos campos da engenharia, indústria, ambiente, ensino, política e economia. O método AHP é amplamente empregado em problemas de planejamento e alocação de recursos e para a avaliação de impactos ambientais (SAATY, 1984; SAATY; VARGAS, 2012). Na área da aviação civil, já foi utilizado em estudos sobre avaliação e classificação do risco de obstáculos a aeroportos (WANG; HU; TAO, 2004; BARROSO; CORREIA, 2014) e em pesquisas sobre priorização de projetos de pesquisa e desenvolvimento (SILVA; BELDERRAIN; PANTOJA, 2010).

Saaty (2008) define o método AHP como um processo de mensuração, em que as medidas são obtidas através de comparações pareadas entre os elementos analisados; tais comparações são feitas por meio de julgamentos de especialistas, utilizando uma escala de prioridade (escala de julgamentos absolutos), que representa o quanto mais importante um elemento é sobre outro, considerando um dado atributo. O método AHP facilita a compreensão e avaliação do problema por dividir o mesmo em níveis de hierarquia e determinar uma ação global para cada alternativa, priorizando-as ou classificando-as, ao final do método (SILVA; BELDERRAIN; PANTOJA, 2010).

De acordo com Saaty (2008), para tomar uma decisão de maneira estruturada e obter prioridades é necessário decompor a decisão em quatro passos. No primeiro passo é definido o objetivo principal do processo de decisão e são identificados os critérios, subcritérios e as alternativas necessárias para resolver o problema. No segundo passo é elaborada a estrutura hierárquica colocando o objetivo principal no primeiro nível (nível mais elevado da estrutura), os critérios e subcritérios nos níveis intermediários e as alternativas no último nível da hierarquia. No terceiro passo é construída a matriz de comparação pareada, considerando a escala fundamental de Saaty (Tabela 1). Nesse passo, as alternativas são comparadas com os respectivos subcritérios, os subcritérios com os respectivos critérios e estes com o objetivo principal. Além das comparações par a par, também é realizada nesse passo a verificação da consistência dos julgamentos. Por fim, no quarto passo são definidos os pesos dos elementos, a partir das prioridades locais obtidas das comparações



pareadas, obtendo sua prioridade total ou global (SILVA; BELDERRAIN; PANTOJA, 2010).

As comparações entre os elementos da hierarquia podem ser obtidas de mensurações reais ou de uma escala fundamental que reflita a força relativa de preferências (SAATY; VARGAS, 2012). Essa escala fundamental é uma escala numérica que indica quantas vezes um elemento é mais importante ou dominante sobre outro, quando considerado determinado critério ou propriedade desses elementos. Saaty (1984; 2008) definiu a escala fundamental dos números absolutos, reproduzida na Tabela 1.

Tabela 1 – Escala fundamental dos números absolutos.

Intensidade da importância	Definição	Explicação
1	Igualmente importante	Igual contribuição para o objetivo.
3	Moderadamente mais importante	Experiência e julgamento favorecem levemente um elemento sobre o outro.
5	Fortemente mais importante	Experiência e julgamento favorecem fortemente um elemento sobre o outro.
7	Muito fortemente mais importante	Um elemento é muito fortemente preferido sobre o outro; sua dominância é demonstrada na prática.
9	Extremamente mais importante	É a maior ordem de afirmação possível da preferência de um elemento sobre outro.
Números recíprocos aos acima referidos	Se a um elemento $i$ é atribuído um dos números positivos acima quando comparado com um elemento $j$ , então $j$ terá um valor recíproco quando comparado com $i$ .	
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes.	Quando há a necessidade de valores intermediários entre os julgamentos.
1,1 – 1,9	Quando os elementos são considerados importantes de maneira muito próxima.	Pode ser difícil atribuir o melhor valor, mas a pequena diferença entre os valores não será tão perceptível quando elementos contrastantes forem comparados, sendo capaz de indicar a importância relativa dos elementos.

Fonte: Adaptação de SAATY, 1984; 2008.

As comparações pareadas entre as variáveis são organizadas em uma matriz recíproca (Figura 2). Uma matriz é recíproca quando o elemento  $a_{ij}$  dessa matriz é  $1/a_{ji}$  ou o recíproco do elemento  $a_{ji}$ . Uma propriedade da matriz recíproca é que sua diagonal principal é unitária, o que significa que um fator quando comparado com ele mesmo deve obviamente produzir um julgamento de “igual importância”. Assim, se um nível inclui  $n$  fatores, um total de  $n(n - 1)/2$  comparações são necessárias, já que os elementos da diagonal e os recíprocos são obtidos automaticamente (SAATY, 1984).

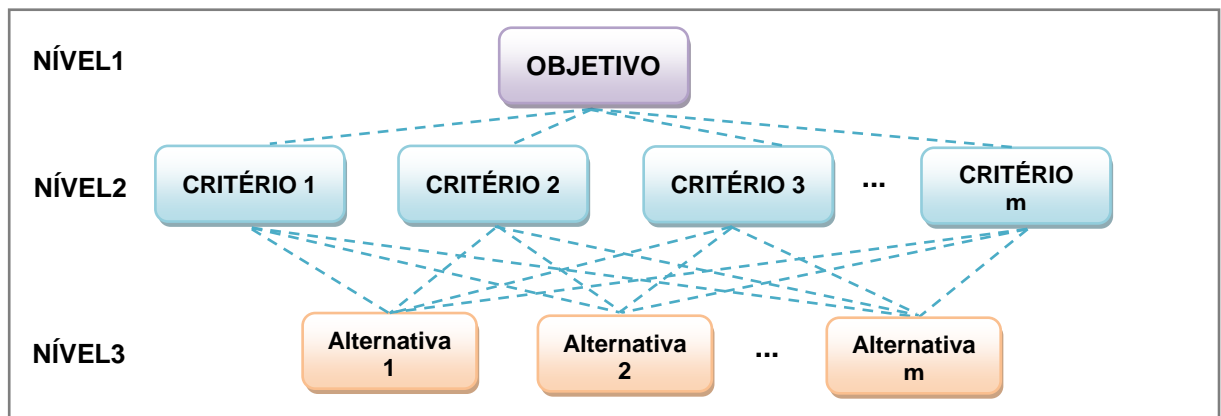
Figura 2 – Matriz recíproca.

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Fonte: Elaboração própria.

Segundo Saaty e Vargas (2012) a forma mais simples de estruturar um problema de decisão é a construção de uma hierarquia em três níveis (Figura 3): no primeiro nível coloca-se o objetivo principal da decisão; no segundo nível são colocados os critérios e no terceiro nível são colocadas as alternativas, que serão analisadas pelos critérios do segundo nível. Tal estrutura tem a finalidade de avaliar a importância dos elementos de um nível em relação a alguns ou a todos os elementos do nível acima (SAATY; VARGAS, 2012).

Figura 3 – Estrutura hierárquica.



Fonte: Adaptação de SAATY; VARGAS, 2012.

Quando se constrói a hierarquia de um problema de decisão o mais difícil é definir quais fatores devem fazer parte dessa estrutura. Saaty e Vargas (2012) apontam que é preciso incluir nas hierarquias detalhes suficientemente relevantes que representem o problema da forma mais completa possível, mas não de um jeito tão detalhado a ponto de que mudanças nos elementos não sejam percebidas. Ao se elaborar hierarquias, deve-se ter a preocupação de identificar as partes associadas ao problema e as questões ou os atributos que podem contribuir para a solução do problema. Organizar objetivos, atributos, questões e partes que se relacionam em uma hierarquia servem para dois propósitos: a) fornecer uma visão geral das relações complexas inerentes à situação e ao processo de avaliação; e b) permitir a avaliação da magnitude dos elementos que estão sendo comparados, pois as comparações devem ser feitas entre elementos homogêneos (SAATY; VARGAS, 2012).

Saaty e Vargas (2012) afirmam que a hierarquia não precisa ser completa, isto é, um elemento em determinado nível não precisa funcionar como um critério para todos os elementos do nível inferior. Assim, a hierarquia pode ser dividida em subcritérios que compartilhem apenas um elemento superior em comum. Além disso, para facilitar a tarefa de definir prioridades, o usuário pode inserir ou eliminar níveis e elementos na hierarquia conforme for preciso; os elementos de menor interesse podem ser representados em termos gerais no nível mais elevado da hierarquia e os elementos criticamente importantes para a resolução do problema podem ser desenvolvidos com maior profundidade e especificidade. A tarefa de estabelecer prioridades requer que os critérios, subcritérios e as propriedades ou características das alternativas sejam comparados entre si em relação aos elementos do nível superior mais próximo. Após avaliar a relevância de todos os elementos e definir as prioridades para toda a hierarquia, pode-se, às vezes, remover elementos de menor importância por estes não influenciarem de forma significativa a decisão em questão (SAATY; VARGAS, 2012).

Segundo Saaty (1984), o método AHP não requer que os julgamentos sejam consistentes ou mesmo transitivos. A consistência (ou inconsistência) dos julgamentos aparecerá ao fim do método. Se o elemento  $a_{ij}$  representa a importância do critério  $i$  sobre o critério  $j$  e o elemento  $a_{jk}$  representa a importância do critério  $j$  sobre o critério  $k$ , então o elemento  $a_{ik}$ , que representa a importância do

critério  $i$  sobre o critério  $k$ , deve ser igual à  $a_{ij} \times a_{jk}$  para que os julgamentos sejam consistentes (SAATY; VARGAS, 2012).

Como o método AHP permite inconsistência nos julgamentos, existe uma preocupação especial com o afastamento da consistência dos julgamentos e o valor (medida) desse afastamento. Dessa forma, existem quatro axiomas no método AHP (SAATY; VARGAS, 2012): a) relação recíproca; b) comparação de elementos homogêneos; c) dependência hierárquica e d) validade da classificação e do resultado.

Existem inúmeras formas de derivar o vetor de prioridades da matriz  $(a_{ij})$ . No entanto, priorizar a consistência implica a formulação do autovalor  $Aw = nw$ . Para demonstrar isso, assume-se que as prioridades  $w = (w_1, \dots, w_n)$  relativas a um único critério são conhecidas, como o peso de pedras, por exemplo; então, pode-se avaliar o que é preciso fazer para recuperar esses pesos. Assim, constrói-se a matriz com a razão das comparações e multiplica-se a mesma por  $w$  para obter  $nw$ , conforme Equação 1 (SAATY; VARGAS, 2012).

$$\begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_3}{w_1} & \frac{w_3}{w_2} & \dots & \frac{w_3}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

No caso em que não se podem dar valores precisos para  $w_i/w_j$ , mas apenas estimá-los, o problema se torna  $A'w' = \lambda_{max}w'$ , onde  $\lambda_{max}$  é o maior ou o principal autovalor de  $A' = (a'_{ij})$ ; ou seja, é o valor perturbado de  $A = (a_{ij})$ , forçando o recíproco  $a'_{ji} = 1/a'_{ij}$ . Para simplificar a notação, continuará a ser escrito  $Aw = \lambda_{max}w$ , onde  $A$  é a matriz de comparações pareadas (SAATY; VARGAS, 2012).

A solução desse problema é iterativa e é obtida elevando a matriz a uma potência suficientemente grande, somando a seguir todas as linhas e, por fim, normalizando-as para obter o vetor de prioridades  $w = (w_1, \dots, w_n)$ . Esse processo termina quando a diferença entre os componentes do vetor principal, obtidos na  $k$ -ésima potência e na  $(k + 1)$ -ésima potência, é menor que algum valor pequeno pré-determinado. O vetor de prioridades é a escala derivada associada à matriz de comparações. Nessa escala, atribui-se o valor zero ao elemento que não é

comparável com os demais elementos considerados. Outros caminhos mais fáceis, não iterativos, de obter uma aproximação das prioridades é normalizar as médias geométricas das linhas (tal método coincide com o autovetor para  $n \leq 3$ ), ou normalizar os elementos em cada coluna da matriz de julgamentos e calcular a média de cada linha. Para aplicações importantes, deve-se tomar cuidado e priorizar o uso do procedimento de derivação de autovetores, pois apesar da proximidade do resultado obtido com o autovetor, as aproximações podem levar à inversão de ordem (SAATY; VARGAS, 2012).

Segundo Saaty e Vargas (2012), uma maneira simples de obter o valor exato (ou uma estimativa) de  $\lambda_{max}$ , quando o valor exato (ou uma estimativa) de  $w$  está disponível na forma normalizada é somar as colunas de  $A$  e multiplicar o vetor resultante pelo vetor de prioridades  $w$ . Com isso, surge a seguinte pergunta: quão boa é a estimativa do autovetor principal  $w$ ?

Se for obtido  $w = (w_1, \dots, w_n)^T$ , a matriz cujas entradas são  $w_i/w_j$  é uma matriz consistente, a qual é uma estimativa consistente da matriz  $A$ . Assim, o que se deseja é obter uma medida do erro devido à inconsistência. Acontece que  $A$  é consistente se e somente se  $\lambda_{max} = n$ , porém sempre se tem  $\lambda_{max} \geq n$ . O índice de consistência (*C.I.*) de uma matriz de comparação é usado como uma medida do desvio da consistência e representa a variância do erro cometido na estimativa de  $a_{ij}$  e pode ser obtido pela Equação 2 (SAATY; VARGAS, 2012).

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

A medida da inconsistência pode ser usada para melhorar sucessivamente a consistência dos julgamentos (SAATY; VARGAS, 2012). Através de simulações de matrizes recíprocas randômicas de diferentes ordens (tamanho da amostra: 500), usando a escala 1/9, 1/8, ..., 1, ..., 8, 9, foram estabelecidos os índices de consistência médios, conhecidos como índices randômicos (*R.I.*), conforme Tabela 2 (SAATY, 1984; SAATY; VARGAS, 2012).

Tabela 2 – Índice de consistência randômico médio (*R.I.*).

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>R.I.</i>	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Adaptação de SAATY; VARGAS, 2012.

A razão entre *C.I.* e *R.I.* é chamada razão de inconsistência/consistência (*C.R.*) (SAATY, 1984; SAATY; VARGAS, 2012). Segundo Saaty (1984), a ideia de consistência é uma preocupação central de todas as análises. A inconsistência permite reajustar um sistema de julgamentos para receber novos dados, mas deve ser admitida sem dominar ou confundir a consistência. Valores da ordem de 0,10 para *C.R.* são considerados toleráveis; para valores maiores a esse é recomendado fazer revisões nos julgamentos (SAATY; VARGAS, 2012). Uma inconsistência de até 10% significa que o ajuste é pequeno comparado aos valores reais das entradas de autovalor (SAATY; VARGAS, 2012). Assim, a matriz de comparação pareada será totalmente consistente quando possuir um *C.R.* igual à zero, ou seja, quando os julgamentos do especialista forem totalmente consistentes (VASCONCELOS; MOTA, 2014).

O método AHP permite inconsistência porque no processo de fazer julgamentos os indivíduos tendem a ser mais cardinalmente inconsistentes do que consistentes; isso ocorre, pois os indivíduos não conseguem estimar com precisão valores de medida, mesmo usando uma escala conhecida, e fica ainda mais difícil quando os indivíduos lidam com comparações intangíveis, por exemplo, “a” é duas vezes preferível à “b” e “b” é três vezes preferível à “c”, mas “a” é apenas cinco vezes preferível à “c” e ordinalmente intransitivas, por exemplo, “a” é preferível à “b” e “b” à “c”, mas “c” é preferível à “a” (SAATY; VARGAS, 2012). Uma justificativa para obter todas as comparações possíveis de uma matriz de comparação pareada é melhorar a validade dos julgamentos no mundo real. Quando se lida com comparações tangíveis, uma matriz de julgamentos comparativos par a par pode ser perfeitamente consistente, mas irrelevante e afastada dos valores verdadeiros. Por inúmeras razões, um mínimo de inconsistência pode ser considerado bom e a consistência forçada, sem conhecimento dos valores exatos, uma compulsão indesejável. Se a consistência fosse perseguida, os indivíduos seriam obrigados a serem robôs, incapazes de mudar suas ideias com novas evidências e incapazes de procurar dentro de si julgamentos que representem seus pensamentos, sentimentos e preferências (SAATY; VARGAS, 2012).

Diante da possibilidade dos julgamentos resultarem inconsistentes, Saaty e Vargas (2012) trazem métodos para melhorar a consistência de uma matriz. Através desses métodos pode-se identificar onde está a inconsistência, isto é, verificar qual

dos julgamentos está causando a maior perturbação na consistência da matriz e rever esse julgamento.

Saaty e Vargas (2012) apontam que para melhorar a validade do vetor de prioridades é necessário transformar uma dada matriz de julgamentos recíprocos em uma matriz quase consistente. Na prática, os julgamentos disponíveis para fazer as comparações podem não ser suficientes para aproximar a matriz da consistência. Nesse caso, abandona-se o processo de decisão com base apenas nas informações que se dispõem e buscam-se novos conhecimentos para modificar os julgamentos. A questão então é como construir as perturbações de uma matriz recíproca genérica.

Uma matriz de julgamentos já tem atrelada alguma consistência, ou seja, não é uma matriz recíproca arbitrária. A inconsistência em uma matriz, entre outras coisas, pode ser devida a um erro como colocar  $a_{ji}$  ao invés de  $a_{ij}$  na posição  $i, j$ ; caso tal erro seja detectado e a posição seja alterada de forma adequada, a matriz pode se tornar quase consistente ou pode pelo menos melhorar a consistência de  $A$ . Como o autovetor principal é necessário para representar a dominância (e as prioridades quando a quase consistência é alcançada), deve-se usar um algoritmo baseado no autovetor para melhorar a consistência de uma matriz recíproca até que a mesma se torne quase consistente; a existência do autovetor é assegurada pela teoria de Perron para matrizes positivas (SAATY; VARGAS, 2012).

Para uma dada matriz recíproca positiva  $A = [a_{ij}]$  e um dado par de índices distintos  $k > l$ , define-se  $A(t) = [a_{ij}(t)]$  para  $a_{kl}(t) = a_{kl} + t$ ,  $a_{lk}(t) = (a_{lk} + t)^{-1}$  e  $a_{ij}(t) = a_{ij}$  para todo  $i > k, j > l$ , então  $A(0) = A$ . Permitindo que  $\lambda_{max}(t)$  denote o autovalor de Perron para  $A(t)$  para todo  $t$  numa vizinhança de  $t = 0$ , que é pequeno o suficiente para garantir que todas as entradas da matriz recíproca  $A(t)$  sejam positivas nesse instante. Finalmente, seja  $v = [v_i]$  o único autovetor positivo da matriz positiva  $A^T$ , que é normalizada de modo que  $v^T w = 1$ . A partir da fórmula clássica de perturbação, dada pela Equação 3:

$$\left. \frac{d\lambda_{max}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{v^T A'(0)w}{v^T w} = v^T A'(0)w = v_k w_l - \frac{1}{a_{kl}^2} v_l w_k \quad (3)$$

conclui-se que para todo  $i, j = 1, \dots, n$ , tem-se a Equação 4 (SAATY; VARGAS, 2012):

$$\frac{\partial \lambda_{max}}{\partial a_{ij}} = v_i w_j - a_{ji}^2 v_j w_i \quad (4)$$

Como se está operando dentro do conjunto de matrizes recíprocas positivas vale a igualdade  $\frac{\partial \lambda_{max}}{\partial a_{ji}} = -\frac{\partial \lambda_{max}}{\partial a_{ij}}$ , para todo  $i$  e  $j$ . Portanto, segundo o método proposto por Harker para matrizes recíprocas positivas, para identificar uma entrada de  $A$  cujo ajuste dentro da classe de matrizes recíprocas resultaria na maior taxa de variação do  $\lambda_{max}$ , deve-se examinar os valores  $\{v_i w_j - a_{ji}^2 v_j w_i\}$ ,  $i > j$ ; isto é, deve-se avaliar todos os elementos do triângulo superior da matriz, as  $n(n-1)/2$  comparações, e então selecionar o maior valor absoluto; assim, deverá ser alterada a entrada da matriz de comparações que estiver associada a esse maior valor absoluto (SAATY; VARGAS, 2012).

Em resumo, a ideia desse método consiste em encontrar o elemento que causa a maior variação no  $\lambda_{max}$ , a partir da análise da matriz de derivadas parciais e modificar o valor do elemento da matriz original, ou seja, rever esse julgamento na matriz de comparações pareadas. Assim, o maior valor absoluto encontrado na matriz de derivadas parciais sinaliza a posição do elemento da matriz original que deve ser modificado (WOLFF, 2008). Tal processo pode ser repetido até que o *C.R.* desejado seja alcançado. Se os julgamentos indicados não puderem ser alterados totalmente, de acordo com o entendimento do especialista, eles podem ser alterados parcialmente. Caso ainda exista falha na obtenção de um nível de consistência aceitável, com julgamentos justificáveis, é preciso aprender mais sobre as variáveis e o problema antes de prosseguir com o processo de tomada de decisão (SAATY; VARGAS, 2012).

Outro método utilizado para melhorar a consistência de uma matriz é conceitualmente diferente do primeiro e baseia-se na Equação 5 (SAATY; VARGAS, 2012).

$$n\lambda_{max} - n = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n (\varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ij}^{-1}), \quad (5)$$

em que  $E \equiv (\varepsilon_{ij})$  é a matriz de perturbações, com  $\varepsilon_{ji} = \varepsilon_{ij}^{-1}$ .



Esse método sugere que seja examinado o julgamento para o qual  $\varepsilon_{ij} = a_{ij} \times w_j/w_i$  está o mais distante do valor 1 (um), isto é, analisar a entrada  $a_{ij}$  que apresenta o maior valor de  $\varepsilon_{ij}$  e verificar se essa entrada pode ser razoavelmente menor. Espera-se que tal mudança de  $a_{ij}$  também resulte em uma nova matriz de comparações com um autovalor de Perron menor associado (SAATY; VARGAS, 2012). Como então determinar a entrada mais consistente para a posição  $i, j$  identificada? Harker demonstrou que quando se calcula o novo autovetor  $w$  após alterar a entrada  $i, j$  identificada, se quer que a nova entrada  $i, j$  seja igual a  $w_i/w_j$  e o valor da entrada recíproca a  $a_{ij}$  seja igual a  $w_j/w_i$ . Ao substituir a entrada  $a_{ij}$  identificada por  $w_i/w_j$  e a sua entrada recíproca por  $w_j/w_i$  e multiplicar pelo vetor  $w$ , obtém-se o mesmo produto que substituindo os valores da entrada  $a_{ij}$  e de sua recíproca por zeros e as duas entradas das diagonais correspondentes por 2 (dois) (SAATY; VARGAS, 2012).

Toma-se o vetor de Perron da última matriz como o vetor de prioridades  $w$  e usam-se agora os valores conhecidos de  $w_i/w_j$  e  $w_j/w_i$  para substituir os valores da entrada  $a_{ij}$  e da sua recíproca na matriz original. Saaty e Vargas (2012) sugerem que os valores resultantes das divisões sejam arredondados para o inteiro mais próximo da escala fundamental do AHP. O especialista é então convidado a alterar seu julgamento para esse valor sugerido de  $a_{ij}$ , tanto quanto for possível. Se o especialista não quiser mudar o valor original dessa entrada, considera-se o segundo julgamento mais inconsistente e repete-se o processo.

Em resumo, esse método encontra o elemento da matriz de comparação pareada que causa a maior perturbação na consistência da matriz, sugere que esse julgamento e o seu recíproco sejam modificados e ainda sugere novos valores para essa entrada e a sua recíproca que, se adotados, resultarão em uma matriz consistente com  $C.R. < 0,10$ . Caso o especialista não concorde com a alteração sugerida, os cálculos podem ser refeitos considerando o elemento de segunda maior perturbação e assim por diante. Os elementos que têm alguma perturbação em relação aos de uma matriz consistente são aqueles com  $\varepsilon_{ij} > 1$ ; portanto, deseja-se encontrar o elemento cujo valor está o mais longe de 1 (um) e verificar se o mesmo, bem como seu recíproco, podem ser modificados na matriz original (WOLFF, 2008).

Saaty e Vargas (2012) destacam que o método AHP fundamenta-se em sete pilares, são eles: (i) escalas de razão, proporcionalidade e escalas de razão normalizadas; (ii) comparações par a par recíprocas; (iii) sensibilidade do autovetor principal à direita; (iv) homogeneidade e clusterização; (v) síntese que pode ser estendida para dependência e *feedback*; (vi) preservação e inversão de ordem; (vii) julgamentos em grupo.

O primeiro pilar, escalas de razão, proporcionalidade e escalas de razão normalizadas, é essencial para a geração e síntese de prioridades, seja no AHP ou em qualquer método multicritério que precise integrar medidas de escalas de razão existentes com suas próprias escalas derivadas. Além disso, as escalas de razão são a única maneira de generalizar uma teoria de decisão para o caso de dependência e *feedback*, porque as escalas de razão quando pertencem a uma mesma escala (como uma de prioridades) permitem tanto operações de soma como de multiplicação. Quando dois decisores chegam a duas diferentes escalas de razão para o mesmo problema, faz-se necessário testar a compatibilidade das respostas de ambos os decisores e aceitar ou rejeitar a proximidade delas. Portanto, por meio de escalas de razão pode-se associar cada alternativa a um vetor de benefícios, oportunidades, custos, riscos, etc., para determinar a melhor alternativa e, conseqüentemente, a solução ótima para o problema em questão (SAATY; VARGAS, 2012; SILVA; BELDERRAIN, 2005).

Através do segundo pilar, comparações par a par recíprocas, é possível expressar os julgamentos de forma semântica, relacionando-os automaticamente a uma escala numérica fundamental de números absolutos (SAATY; VARGAS, 2012). Os números dessa escala são derivados de relações estímulo-resposta, dadas por experimentos psicológicos sobre julgamentos absolutos de um indivíduo (SAATY, 1977). A relação estímulo-resposta consiste na sobreposição entre a quantidade de informação no estímulo e a quantidade de informação nas respostas do indivíduo e é medida pela quantidade de informação transmitida pelo indivíduo (MILLER, 1956). A partir dessa escala é então derivado o autovetor de prioridades principal. O autovetor mostra a dominância de cada elemento em relação aos demais; no autovetor, o valor zero é atribuído ao elemento que não possui uma característica particular, sendo, portanto, excluído das comparações. Inconsistência nos julgamentos é permitida e a medida da inconsistência fornecida no método pode

direcionar o decisor tanto a melhorar seu julgamento quanto a obter uma melhor compreensão do problema (SAATY; VARGAS, 2012). O método AHP tem ao menos três modos de obter a ordem das alternativas: (a) Relativa, que usa comparações par a par entre as alternativas; é limitada a um número pequeno de alternativas, sendo útil em decisões novas e exploratórias; (b) Absoluta, que usa escalas de intensidade construídas para cada critério separadamente e avalia um número ilimitado de alternativas, uma de cada vez, sendo útil em decisões em que há conhecimento considerável para julgar a importância relativa das intensidades e desenvolver prioridades para elas; se desejado, algumas das alternativas mais bem avaliadas podem ser comparadas entre si usando o modo relativo para obter mais refinamento das prioridades; (c) *Benchmarking*, que inclui uma alternativa conhecida no grupo de alternativas e compara essa alternativa conhecida com as demais (SAATY; VARGAS, 2012; SILVA; BELDERRAIN, 2005).

O terceiro pilar, sensibilidade do autovetor principal à direita, tem relação com a sensibilidade do autovetor principal à direita a perturbações nos julgamentos; esse pilar limita o número de elementos em cada conjunto de comparações a poucos elementos e requer que eles sejam homogêneos. O autovetor à esquerda só é significativo como recíproco; para perguntar quão menor é um elemento em relação a outro, deve-se tomar o recíproco perguntando quão maior o outro elemento é (SAATY; VARGAS, 2012; SILVA; BELDERRAIN, 2005).

O quarto pilar, homogeneidade e clusterização, possibilita estender gradualmente a escala fundamental, de um cluster ao cluster adjacente. Aumentando assim, eventualmente, o alcance da escala de 1-9 para 1- $\infty$  (SAATY; VARGAS, 2012; SILVA; BELDERRAIN, 2005).

O quinto pilar, síntese que pode ser estendida para dependência e *feedback*, é importante para determinar uma escala de razão unidimensional, a partir das escalas de razão derivadas de cada critério, que represente o resultado global de cada alternativa. Para produzir resultados corretos em escalas conhecidas, a síntese das escalas derivadas na estrutura de decisão só pode ser feita por meio de adição ponderada. Deve-se observar cuidadosamente que a adição ponderada em uma estrutura hierárquica leva a uma forma multilinear e, como consequência, é não linear. É sabido que em condições muito gerais, tais formas multilineares são densas em espaços de funções gerais (discretos ou contínuos) e, portanto, combinações

lineares delas podem ser usadas para se aproximar arbitrariamente de qualquer elemento não linear naquele espaço. A multiplicação ponderada, ao elevar as prioridades das alternativas ao peso dos critérios (que é determinado por meio de adição ponderada) e depois multiplicar os resultados, apresenta quatro principais falhas: (a) não ocorre, como deveria, a atribuição do mesmo peso para medidas existentes na mesma escala de razão em diversos critérios; (b) assume que a matriz de julgamentos é sempre consistente, sacrificando assim a ideia de inconsistência e de como lidar com ela e não permite redundância de julgamentos para melhorar a validade dos mesmos no mundo real; (c) mais criticamente, não ocorre a generalização para o caso de interdependência e *feedback*, visto que o AHP é generalizado para o Método de Análise em Rede (ANP – *Analytic Network Process*), tão essencial em muitos problemas de decisão em que os critérios e as alternativas dependem um do outro; (d) sempre preserva a ordem, contradizendo casos em que a inversão de ordem deveria ser permitida (SAATY; VARGAS, 2012; SILVA; BELDERRAIN, 2005).

O sexto pilar, preservação e inversão de ordem, mostra que tanto a inversão como a preservação de ordem são intrínsecas ao processo de decisão, podendo ser demonstrado que ambos ocorrem sem adicionar ou remover critérios, simplesmente introduzindo repetições suficientes de uma alternativa; segue-se disso que qualquer teoria de decisão deve ter pelo menos dois modos de síntese; no AHP, eles são chamados de modos distributivo e ideal, com orientações sobre qual modo usar; a ordem pode sempre ser preservada usando o modo ideal tanto na medição absoluta quanto na medição relativa (SAATY; VARGAS, 2012; SILVA; BELDERRAIN, 2005).

Por fim, o sétimo pilar, julgamentos em grupo, traz que os julgamentos em grupo devem ser integrados um de cada vez, matematicamente e com cuidado, levando em consideração, quando desejado, a experiência, o conhecimento e a posição de cada pessoa envolvida na decisão; não é necessário forçar um consenso ou usar a opinião da maioria ou outras formas ordinais de votação. Lidar com um grande grupo requer o uso de questionários e procedimentos estatísticos para grandes amostras (SAATY; VARGAS, 2012; SILVA; BELDERRAIN, 2005).

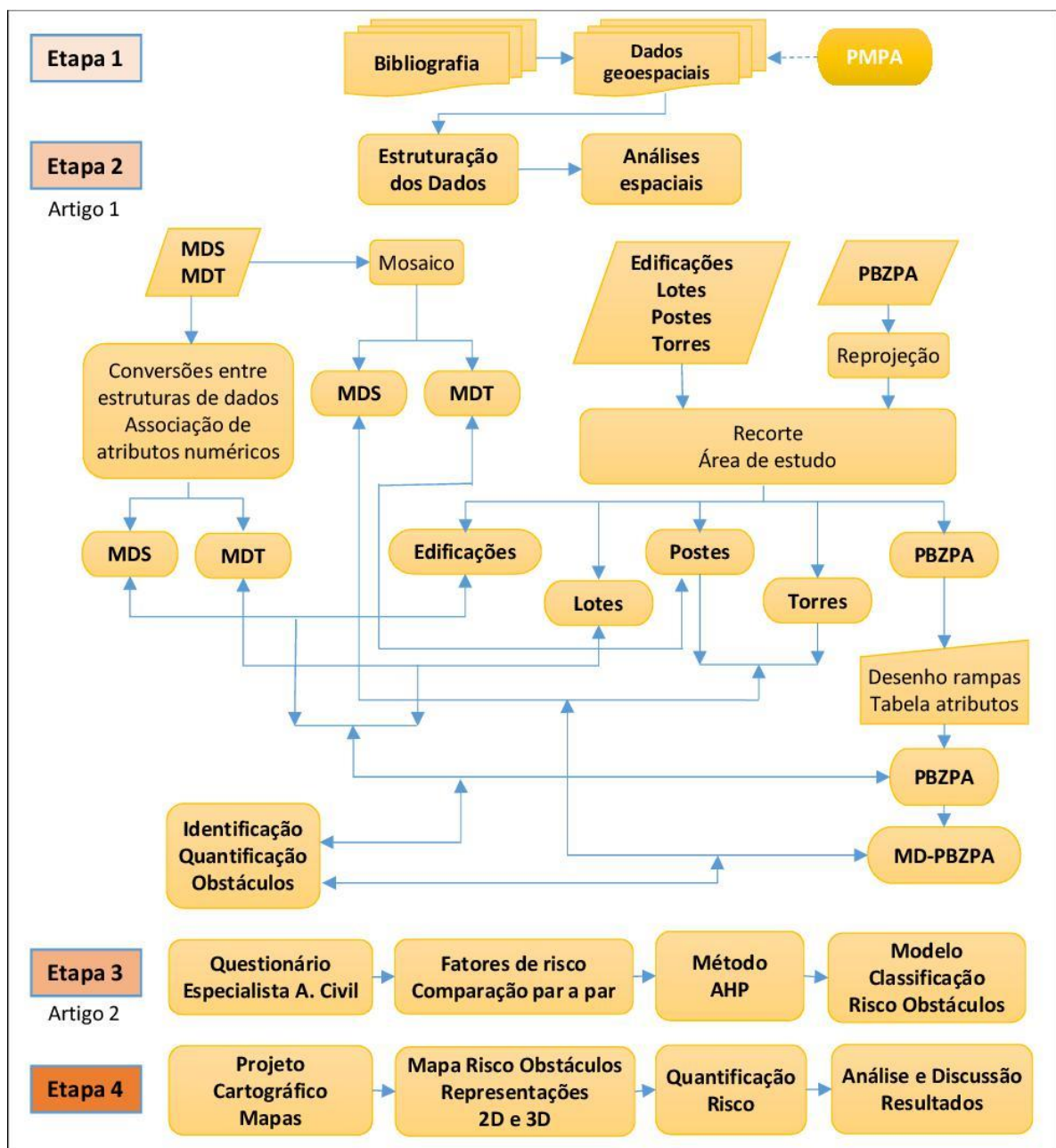
Alguns autores como Vasconcelos e Mota (2014) e Silva e Belderrain (2005) abordam a existência de problemas no método AHP, principalmente relacionados à inversão de ordem das alternativas, ou seja, quando a posição relativa das

alternativas é alterada decorrente da inserção ou remoção de alternativas na análise. Saaty (1984) afirma que o processo preserva a ordem das preferências entre as alternativas; isto é, se uma alternativa é preferível à outra, seu componente de autovetor será maior quando comparado ao componente da outra alternativa. Tal problema seria decorrente de falhas na fase de modelagem do problema, quando uma alternativa é esquecida de ser considerada na análise, por exemplo. A simples inserção de uma alternativa na estrutura, sem a reavaliação dos valores atribuídos aos elementos do nível superior, pode ocasionar a inversão de ordem (SILVA; BELDERRAIN, 2005). Silva e Belderrain (2005) apontam que apesar da independência requerida entre os níveis hierárquicos há uma dependência funcional que precisa ser considerada pelo decisor, causada pela adoção da escala fundamental. Assim, o problema de inversão de ordem poderia ser resolvido a partir da adoção de uma escala absoluta, pois a composição final dos pesos permaneceria equitativa (SILVA; BELDERRAIN, 2005). Com o objetivo de resolver o problema de inversão de ordem foram desenvolvidos métodos de decisão multicritério alternativos ao AHP clássico, como o método AHP Referenciado (proposto por Watson e Freeling em 1982), o método AHP B-G (desenvolvido por Belton e Gear em 1985) e o método AHP Multiplicativo (proposto por Lootsma em 1990) (VASCONCELOS; MOTA, 2014). Tais métodos são variações do AHP clássico e utilizam escalas absolutas ao invés da escala relativa (VASCONCELOS; MOTA, 2014). Segundo Silva e Belderrain (2005), embora os métodos alternativos possuam particularidades que visam à solução de inconsistências do método AHP clássico, os resultados alcançados para a ordenação das melhores alternativas são os mesmos do método clássico para a maioria dos problemas de decisão.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada nesse trabalho foi dividida em quatro etapas. Essas etapas compreendem desde a pesquisa do referencial bibliográfico e a aquisição dos dados geoespaciais, as edições gráficas e textuais, a criação e edição de figuras explicativas, tabelas e questionários, até a discussão e análise dos resultados. A Figura 4 ilustra o fluxograma com as etapas da metodologia.

Figura 4 – Etapas da metodologia.



A primeira etapa consistiu na pesquisa do referencial bibliográfico, que serviu de base teórica ao estudo, e na aquisição dos dados geoespaciais. Durante essa etapa foram reunidos textos e legislações (normas, decretos, portarias, etc.) sobre o espaço aéreo brasileiro e o PBZPA e referencial teórico sobre o método AHP; foi definida a área de estudo dessa pesquisa e foram adquiridos os dados geoespaciais referentes à área de estudo (lotes, edificações, torres, postes, eixos viários, MDS, MDT, ortofotos e PBZPA do aeroporto). Os dados geoespaciais utilizados foram obtidos junto à Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA) e ao sítio do Portal de Aeródromos do DECEA.

A segunda etapa compreendeu a estruturação dos dados e as análises espaciais, resultando na identificação e quantificação de obstáculos ao aeroporto. Para isso, foram realizadas análises espaciais considerando a localização geográfica e a altimetria das feições da área de estudo e os limites altimétricos estabelecidos pelo PBZPA, a fim de identificar as feições atingidas pelas superfícies limitadoras do PBZPA. Essa etapa está detalhada no capítulo “4 Produções Acadêmicas”, por meio do primeiro artigo científico, e no capítulo “5 Resultados e Discussões”, através dos subcapítulos 5.1 a 5.3.

Na terceira etapa foram definidos os fatores de risco e a relevância (peso) de cada fator de risco; para isso, foi elaborado um questionário que foi respondido por um especialista da área da aviação civil. A seguir, através do método AHP, foi possível calcular o peso de cada fator de risco e determinar um modelo de classificação do risco de obstáculos presentes nas zonas de proteção de aeródromos. Essa etapa está detalhada no capítulo “4 Produções Acadêmicas”, por meio do segundo artigo científico.

A última etapa consistiu na elaboração do projeto cartográfico dos mapas, na geração de representações 2D e 3D do risco dos obstáculos, na quantificação do risco e na análise e discussão dos resultados. A quarta etapa está detalhada no capítulo “5 Resultados e Discussões”, por meio do subcapítulo “5.4 Mapa de risco dos obstáculos” e teve como finalidade representar e avaliar os diferentes níveis de risco apresentados pelos obstáculos com relação ao comprometimento da segurança e da manutenção das operações aéreas do aeroporto.

### 3.1 Área de estudo

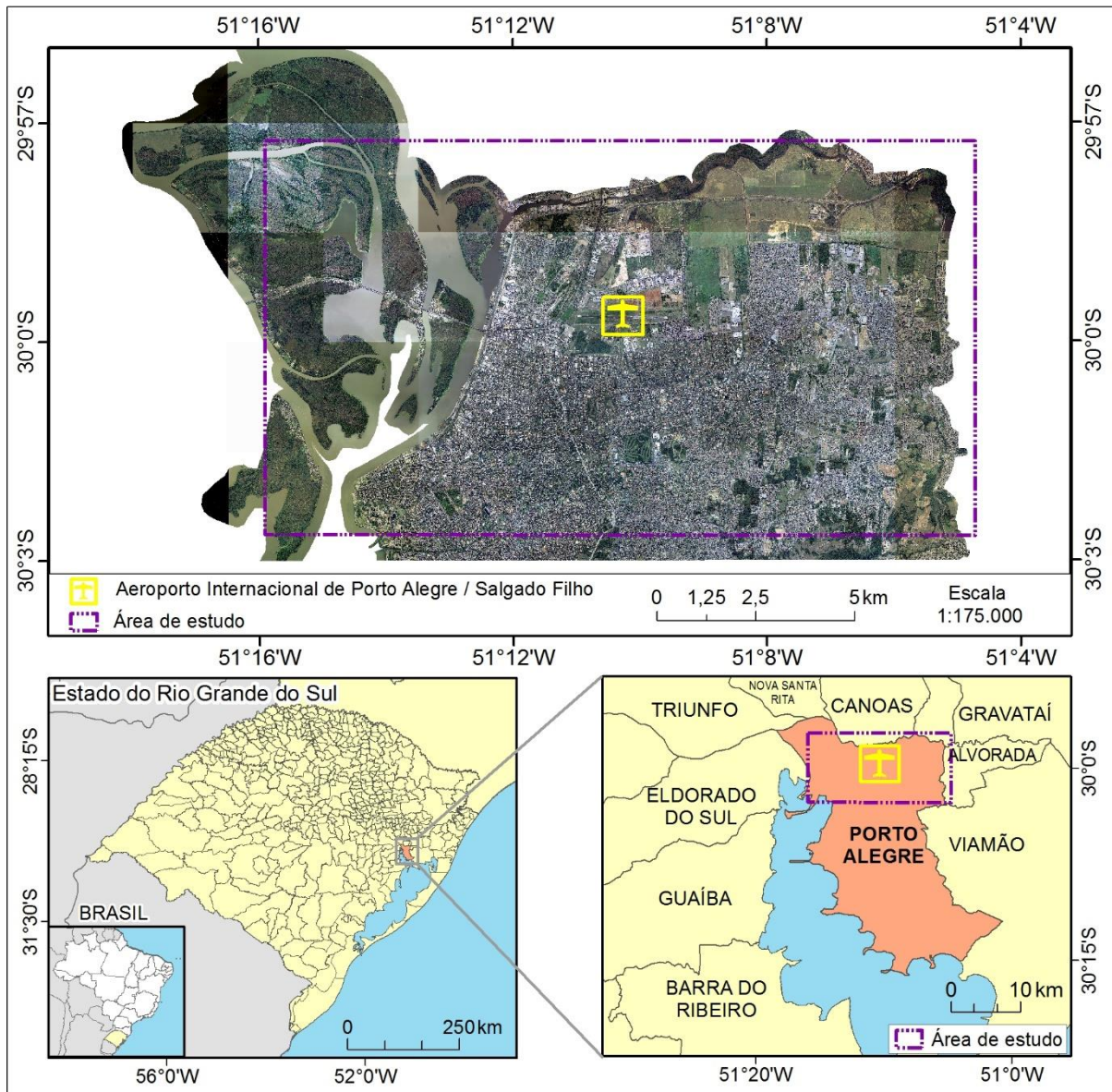
A área de estudo desse trabalho (Figura 5) compreende a região norte do município de Porto Alegre, capital do estado do Rio Grande do Sul, e é limitada pelas latitudes 29°57'S e 30°03'S e longitudes 51°05'W e 51°15'W. Essa região faz fronteira ao leste com o município de Alvorada, ao norte com os municípios de Canoas e Cachoeirinha, ao oeste com o Lago Guaíba e com as ilhas do município de Porto Alegre e ao sul com alguns bairros do centro, centro-norte e leste do município. Segundo o Decreto 19.047, de 02 de junho de 2015, a região norte do município de Porto Alegre compreende as áreas do Norte, Eixo Baltazar, Nordeste, Noroeste, Humaitá-Navegantes e das Ilhas (PORTO ALEGRE, 2015). Essa região abrange 22 bairros, compreendendo uma extensão de 127,57 km<sup>2</sup>, o que representa 27,04% da área do município, e apresenta, segundo o censo demográfico de 2010, 146.211 domicílios e uma população de 411.847 habitantes, o que corresponde a 29,22% da população do município (OBSERVAPOA, 2016).

A escolha da área de estudo é justificada pela localização do Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho (SBPA), o qual está situado atualmente no bairro Anchieta do município de Porto Alegre, antes bairro São João (OBSERVAPOA, 2021a), bem como pela proximidade de áreas urbanas ao aeroporto e pelas obras de expansão do aeroporto (em andamento), que alteram o uso e ocupação do solo no entorno do mesmo. Correia e Neto (2014), em um estudo sobre avaliação do risco de acidentes considerando cenários de excursão de pista para sete aeroportos brasileiros, já apontaram uma preocupação com a existência de áreas urbanas próximas à vizinhança do Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho, afirmando que tal configuração se mostra um desafio ao gerenciamento das operações do aeroporto, impondo restrições a expansões do mesmo.

O SBPA está entre os dez aeroportos brasileiros mais movimentados, ocupando o 9º lugar do Ranking de Aeródromos, com 85.963 movimentos de passageiros no ano de 2018, sendo o mais movimentado da região Sul do país (CGNA, 2018). A aviação comercial foi responsável por 80% dos movimentos do aeroporto. Possui o maior fluxo de movimentos com a região Sudeste, com 72,6% de participação e os voos internacionais correspondem a 6,0% dos movimentos da aviação comercial do aeroporto (CGNA, 2018).



Figura 5 – Área de estudo.



Fonte: Elaboração própria.

O Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho era conhecido inicialmente como Aeródromo de São João. Em 1940, através do Decreto-lei nº 2.271, de 03 de julho de 1940, recebeu o nome de Aeroporto de Porto Alegre (BRASIL, 1940) e em 1951, passou a ser designado Aeroporto Internacional Salgado Filho (PORTO ALEGRE AIRPORT, 2020). De janeiro de 1974 a janeiro de 2018, o aeroporto foi administrado pela Infraero. Em março de 2017, por meio de um leilão realizado pelo Governo Federal, o Aeroporto Internacional Salgado Filho foi concedido à iniciativa privada. A vencedora do processo foi a concessionária Fraport AG Frankfurt *Airport Services*, que a partir de janeiro de 2018 passou a operar o

aeroporto pelos próximos 25 anos, conforme contrato de concessão assinado com a ANAC (INFRAERO, 2020).

A zona de proteção do Aeródromo Salgado Filho, estabelecida pela Portaria DECEA nº 260/ICA, de 23 de setembro de 2016, compreende, além do município de Porto Alegre, mais 11 municípios vizinhos, são eles: Alvorada, Cachoeirinha, Canoas, Eldorado do Sul, Esteio, Guaíba, Gravataí, Nova Santa Rita, Sapucaia do Sul, Triunfo e Viamão (ICA, 2016). Assim, a zona de proteção do aeroporto abrange uma área muito maior que a área de estudo desse trabalho. Primeiro, é importante destacar que não foi possível considerar toda a extensão da zona de proteção do aeroporto nessa pesquisa, pois não existem informações cartográficas em escalas grandes compatíveis de todos os municípios abrangidos pela mesma. Isso implica em que os obstáculos identificados, bem como seus riscos associados ficarão restritos à área de estudo, ou seja, poderão existir outros obstáculos ao aeroporto localizados fora dos limites da área de estudo que apresentam risco à segurança e à manutenção das operações aéreas do aeroporto. Para ser possível considerar toda a zona de proteção do aeroporto, estabelecida pela Portaria DECEA nº 260/ICA, seria necessário o levantamento planialtimétrico de toda a área abrangida pela mesma em escala grande e com acurácia altimétrica de 0,5 metro. Segundo, mesmo com acesso à base cartográfica de todo o município de Porto Alegre, com dados compatíveis entre si, ou seja, com acurácias planimétrica e altimétrica de 0,5 metro e obtidos na mesma época, a área de estudo ficou restrita à região norte do município devido, principalmente, ao volume de dados a ser processado de forma simultânea e ao cronograma elaborado para a conclusão das atividades dentro do prazo do mestrado. Vale destacar que a parte da zona de proteção do aeroporto delimitada pela área de estudo compreende a vizinhança do aeroporto e a área de expansão do mesmo, representando a área mais crítica para a segurança e manutenção das operações aéreas do aeroporto. Além disso, estão presentes na área de estudo todas as tipologias relevantes à pesquisa, como postes, antenas, torres, edificações e lotes.

### **3.2 Dados geoespaciais**

Nesse trabalho foram considerados os lotes, as edificações, os postes e as torres existentes na área de estudo e o PBZPA do aeroporto. Os lotes representam a superfície do relevo e foram analisados para verificar a viabilidade construtiva no entorno do aeroporto. A escolha de feições como edificações, postes e torres se deve principalmente ao fato de que a altura de suas estruturas pode ser regulamentada, a partir de legislação específica, e também devido à dificuldade e aos transtornos envolvidos na remoção de uma dessas feições. Por exemplo, a remoção de postes ou torres de transmissão é uma questão complexa, pois os mesmos fazem parte da infraestrutura urbana e pertencem a uma rede, estando interligados por linhas de transmissão; já a remoção de edificações traz problemas socioeconômicos relacionados à desapropriação e realocação de pessoas, bens e serviços.

Além dessas, outras feições também podem representar risco à segurança e à manutenção das operações aéreas do aeroporto, são exemplos: vegetação, árvores, pontes, passarelas e viadutos. A vegetação e as árvores isoladas não foram avaliadas nesse estudo, pois não há a possibilidade de controlar o crescimento vertical das mesmas. Caso a vegetação ou as árvores sejam consideradas obstáculos ao aeroporto, poderá haver poda da vegetação e poda, remoção ou transplante das árvores; tais intervenções trazem menor impacto socioeconômico à cidade, quando comparado à remoção das outras feições. Já as pontes, passarelas e os viadutos não foram avaliados, pois primeiro considerou-se que o limite altimétrico imposto pelas superfícies limitadoras de obstáculos é observado na execução de obras públicas, como é o caso dessas feições; segundo, tais feições normalmente são consideradas em avaliações de situações de excursão de pista (WANG; HU; TAO, 2004; BARROSO; CORREIA, 2014). No entanto, salienta-se a importância de considerar tais feições em estudos futuros sobre obstáculos a aeroportos.

Os dados geoespaciais utilizados nesse trabalho provém da base cartográfica na escala 1:1.000 da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA), resultantes da restituição do aerolevante do município, realizado em 2009; nas estruturas de dados vetoriais resultantes do trabalho de Falavigna (2016) e na estrutura de dados digital do PBZPA, obtida no sítio do Portal de Aeródromos do DECEA (DECEA,

2019). As estruturas de dados vetoriais e matriciais da base cartográfica da PMPA estão armazenadas nos formatos *tiff* (ortofotos, MDS e MDT) e *shapefile* (lotes, edificações, torres, postes e eixos viários) e, conforme estabelecido no Decreto nº 18.315 da PMPA (PORTO ALEGRE, 2013), estão associadas ao Sistema Geodésico de Referência (SGR) SIRGAS2000 e representadas na projeção cartográfica TM-POA. A altimetria da base cartográfica da PMPA, representada pelas estruturas de dados matriciais do MDT e MDS, provém de lidar aerotransportado. As estruturas de dados vetoriais resultantes do trabalho de Falavigna (2016) (lotes e edificações) apresentam informação altimétrica associada, estão armazenadas no formato *shapefile* e estão associadas ao SGR SIRGAS2000 e representadas na projeção cartográfica TM-POA. Já a estrutura de dados digital do PBZPA está armazenada no formato *dwg* e está associada ao SGR WGS84 e representada na projeção cartográfica UTM.

A PMPA e o Observatório da Cidade de Porto Alegre (ObservaPOA) disponibilizam em seus sítios eletrônicos o *download* de várias estruturas de dados digitais referentes ao município, nos formatos *shapefile*, *dwg*, *pdf*, *kmz*, *kml*, *xlsx* e *csv* (PORTO ALEGRE, 2021; OBSERVAPOA, 2021b). Dentre as estruturas de dados digitais utilizadas nesse trabalho, a estrutura vetorial dos eixos viários pode ser obtida *online* no formato *shapefile*; já as edificações, as torres de telecomunicação, os postes e a altimetria do relevo, representada por curvas de nível com espaçamento de 1 (um) metro, são disponibilizadas *online* pela PMPA por meio de cartas planialtimétricas na escala 1:1.000, no formato *dwg*; as demais estruturas de dados digitais utilizadas (ortofotos, MDS, MDT, torres de transmissão e lotes fiscais) não estão disponíveis *online*, sendo necessária a sua solicitação junto à PMPA.

A resolução espacial requerida para identificação de feições como postes, torres e edificações é da ordem de dezenas de centímetros (cm), visto que o diâmetro de um poste, menor feição considerada no estudo, varia aproximadamente de 18 cm a 64 cm na base e de 10 cm a 34 cm no topo, dependendo da seção, do material e da altura do poste (CEEE, 2017; 2019). Ao se analisar os parâmetros que definem as superfícies limitadoras de obstáculos, como a declividade ou gradiente, percebe-se a necessidade de uma acurácia altimétrica também da ordem de dezenas de centímetros para a identificação de obstáculos. Por exemplo, a

superfície de transição possui a maior declividade, que corresponde a  $1/7$ , o que significa que a cada sete (7) metros percorridos horizontalmente dentro da superfície de transição, a altitude permitida aumenta em um (1) metro; já a superfície de aproximação, na seção 1, possui uma declividade de  $1/50$ , ou seja, a cada 50 metros percorridos no plano dentro da superfície, a altitude permitida aumenta em 1 metro; no caso da seção 2, a cada 40 metros percorridos horizontalmente dentro da superfície de aproximação, a altitude permitida aumenta em 1 metro; na superfície cônica a declividade é de  $1/20$  e na superfície limitadora de interesse público existe mais de uma declividade; as superfícies horizontal interna e externa e a seção horizontal da superfície de aproximação são platôs, isto é, a altitude permitida permanece a mesma em toda a extensão das mesmas. Portanto, nota-se que a identificação e classificação de obstáculos a aeroportos requerem uma base de dados em escala cartográfica grande, com acurácia altimétrica igual ou melhor que 0,5 metro, a qual corresponde normalmente a uma representação das curvas de nível com equidistância de 1 (um) metro e na escala 1:1.000, visto que um erro de 0,5 metro está compreendido dentro do intervalo de variação altimétrica das superfícies.

### 3.2.1 Lotes e Edificações

Os lotes e as edificações são estruturas de dados vetoriais, armazenadas no formato *shapefile*, ambas representadas pela primitiva geométrica de polígono. Provêm da base cartográfica da PMPA e a essas feições foram atribuídas informações altimétricas (altitudes mínima, média e máxima e declividades máxima e média) (FALAVIGNA, 2016), associadas ao datum vertical Marégrafo de Imbituba/SC.

Os lotes e as edificações trazem como atributos comuns as seguintes informações: setor a que pertence, perímetro e área. Além dessas informações, os lotes apresentam os seguintes atributos: testada, altitudes mínima, média e máxima e declividades máxima e média; e as edificações, o atributo altitude máxima. A altitude máxima das edificações considera a existência de estruturas como caixas d'água, antenas e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) no topo da edificação e se refere à maior altitude da estrutura medida pelo lidar. A

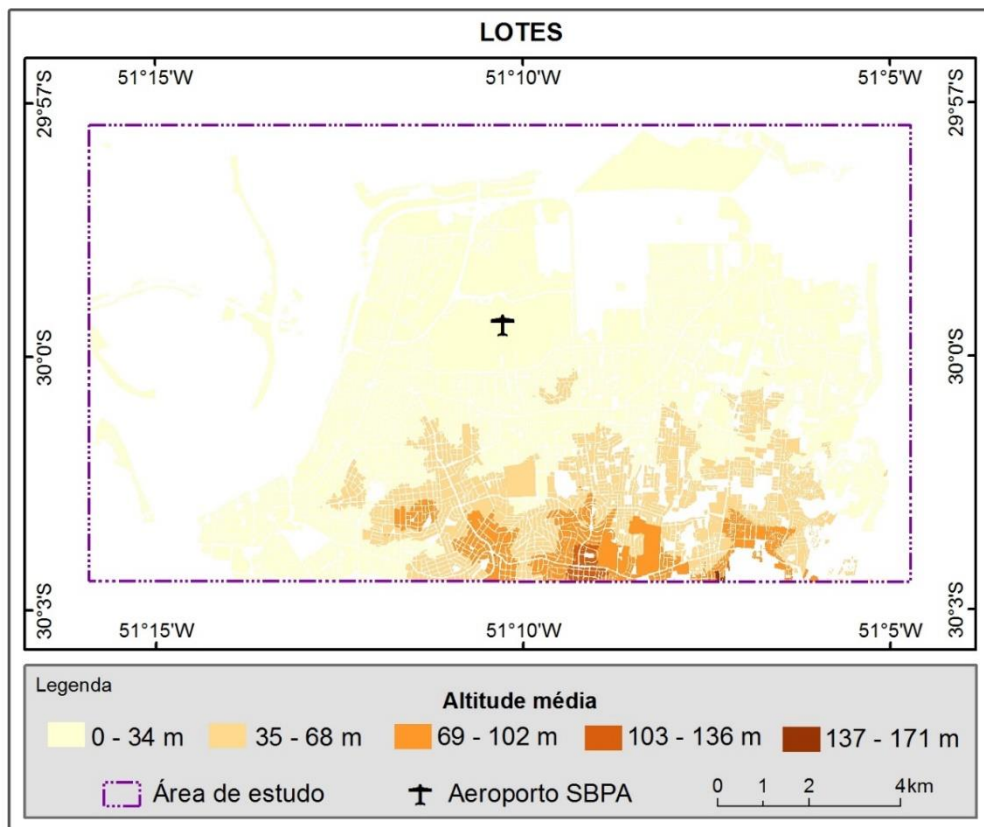
Figura 6 ilustra os lotes (em magenta) e as edificações (em azul) de uma parte da área de estudo. As Figuras 7 e 8 ilustram a altitude média dos lotes e a altitude máxima das edificações, respectivamente.

Figura 6 – Lotes e edificações.



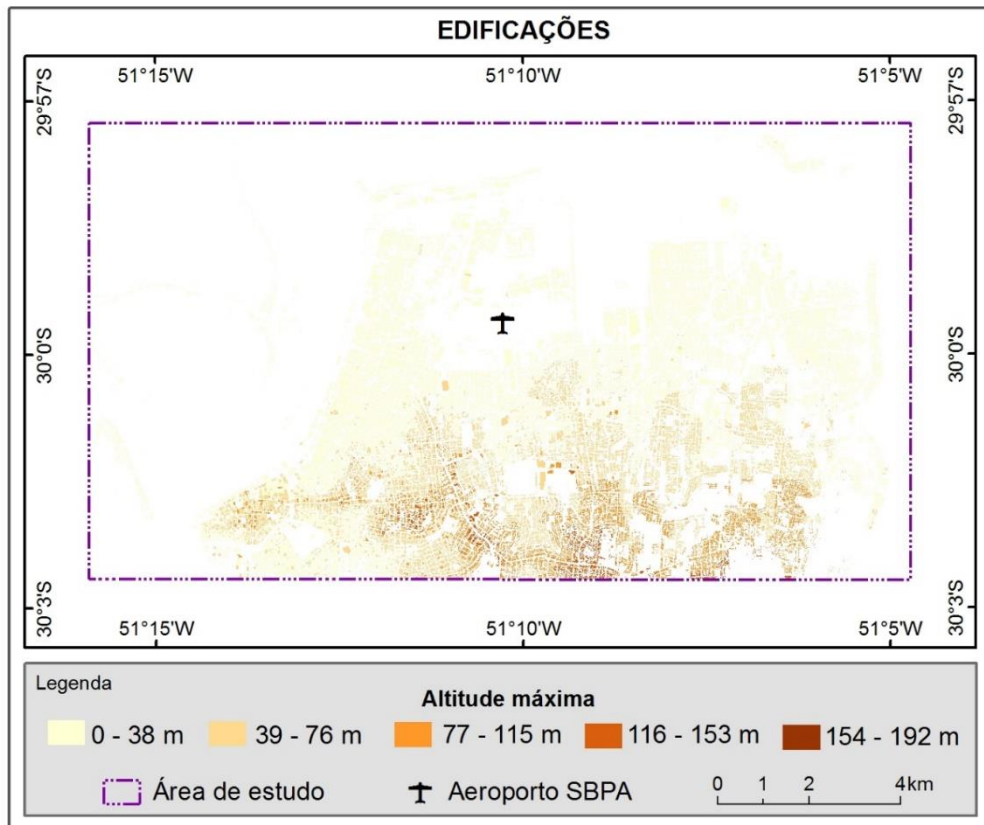
Fonte: FALAVIGNA, 2016.

Figura 7 – Altitude média dos lotes.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 8 – Altitude máxima das edificações.



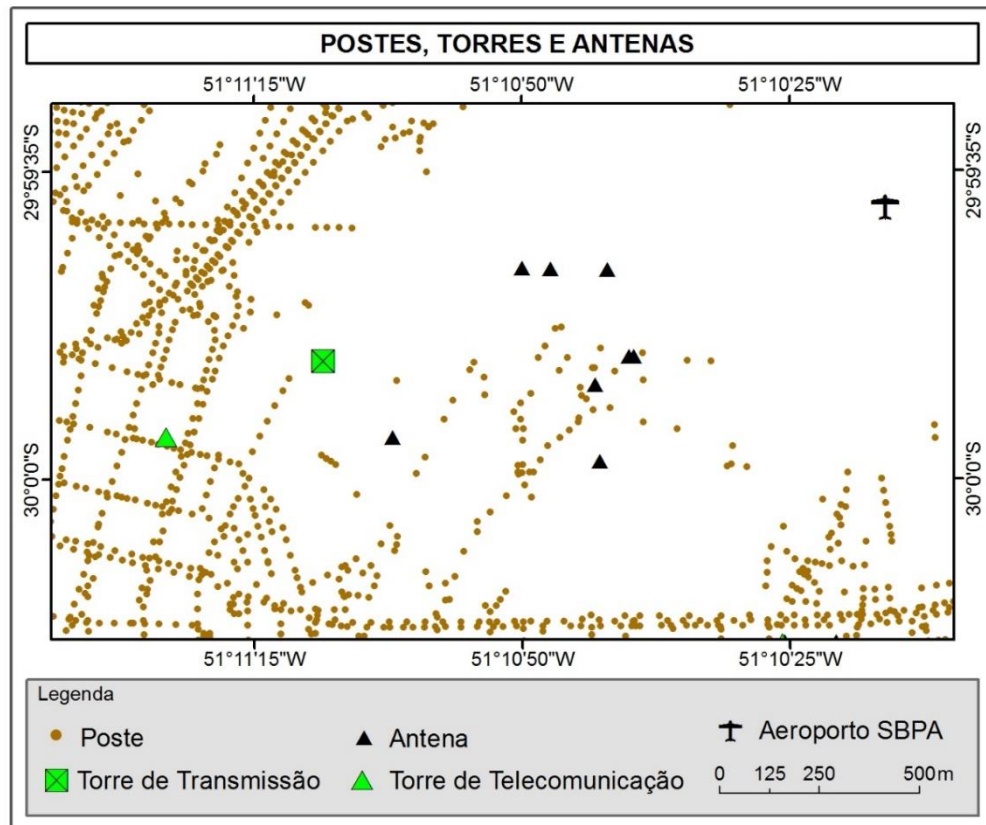
Fonte: Elaboração própria.

A partir das Figuras 7 e 8, percebe-se que os lotes com as maiores altitudes médias e as edificações com as maiores altitudes máximas concentram-se nas porções sul e sudeste da área de estudo. Nas porções noroeste, norte e nordeste encontram-se os lotes com as mais baixas altitudes médias e as edificações de menores altitudes máximas da área de estudo.

### 3.2.2 Torres e Postes

As torres e os postes são estruturas de dados vetoriais, armazenadas no formato *shapefile*, provenientes da base cartográfica da PMPA e representadas pela primitiva geométrica de ponto. Consistem nas torres de transmissão, telecomunicação (classificadas em torres e antenas) e nos postes. A Figura 9 ilustra os postes, as torres de transmissão e de telecomunicação e as antenas de uma área próxima ao aeroporto.

Figura 9 – Postes, torres e antenas.



Fonte: Elaboração própria.

Na área de estudo há 52.028 postes, 198 torres de telecomunicação (137 antenas e 61 torres) e 147 torres de transmissão. Como, posteriormente, essas feições receberão informação altimétrica proveniente do Modelo Digital de Superfície (MDS), aquelas que se encontravam fora da área abrangida pelo MDS foram excluídas da análise. Assim, foi considerada a existência de 51.877 postes, 197 torres de telecomunicação (136 antenas e 61 torres) e 147 torres de transmissão na área de estudo.

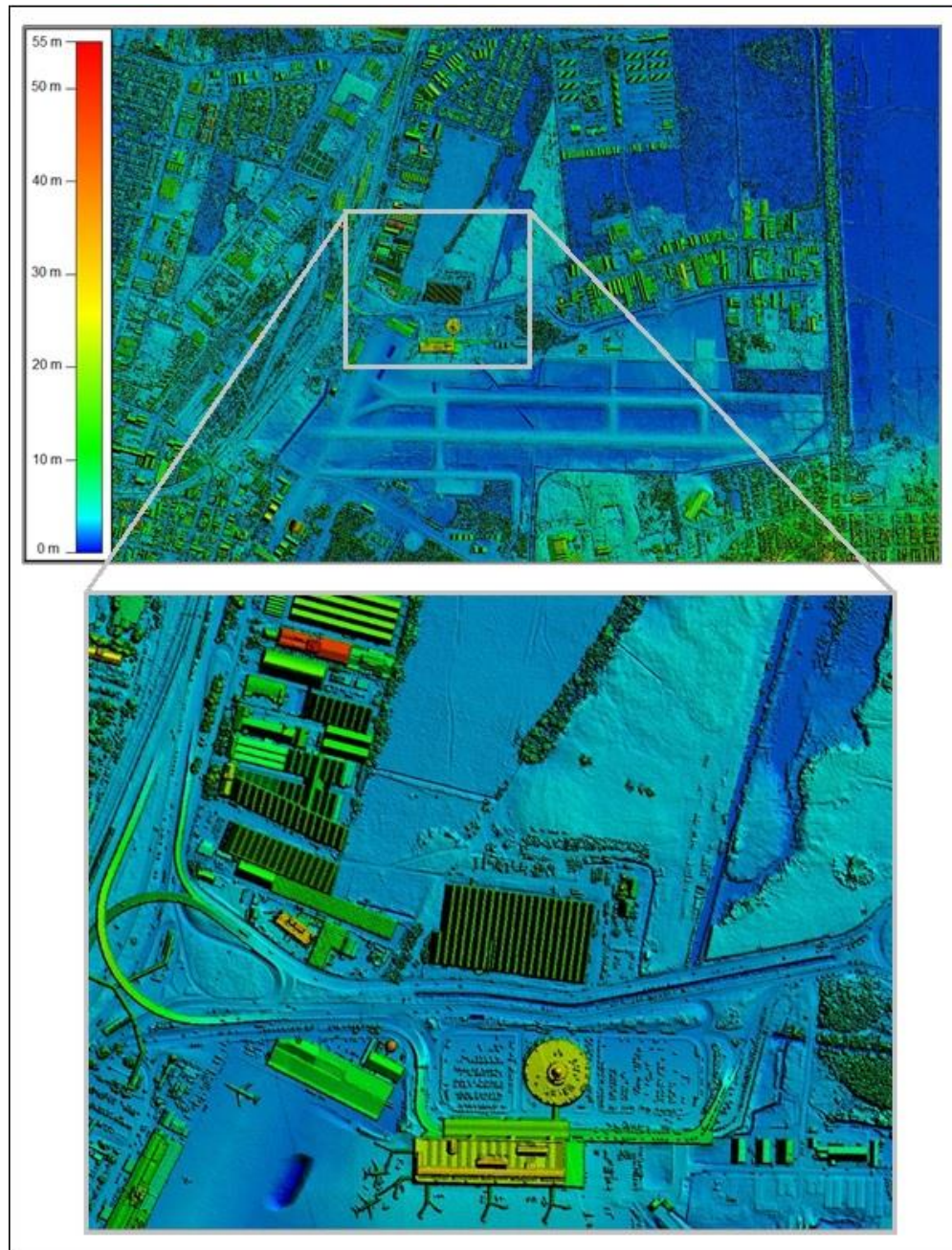
### 3.2.3 Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT)

A altimetria da área de estudo é representada computacionalmente na estrutura de dados matricial (*raster*), por meio de uma malha regular de pixels com resolução espacial de um (1) metro e está apresentada na forma de modelos digitais, armazenados no formato *tiff*. O Modelo Digital de Terreno (MDT) representa as informações altimétricas do relevo terrestre e o Modelo Digital de Superfície (MDS),



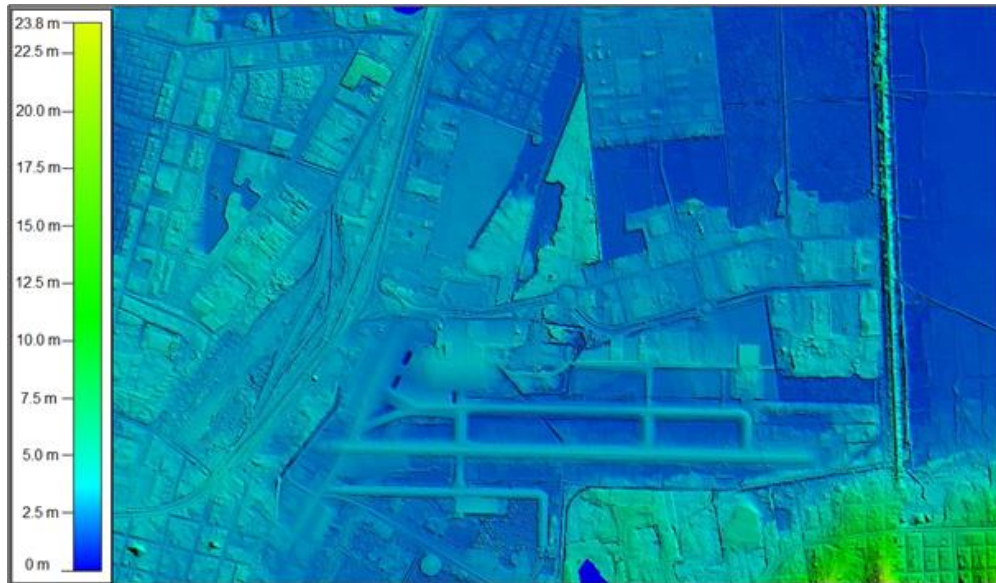
além do relevo, representa as informações altimétricas das demais feições planimétricas como vegetação, edificações e outras. As Figuras 10 e 11 ilustram uma parte do MDS e do MDT de uma região localizada no entorno do aeroporto, respectivamente.

Figura 10 – MDS de uma região no entorno do aeroporto.



Fonte: Adaptação de FALAVIGNA, 2016.

Figura 11 – MDT de uma região no entorno aeroporto.



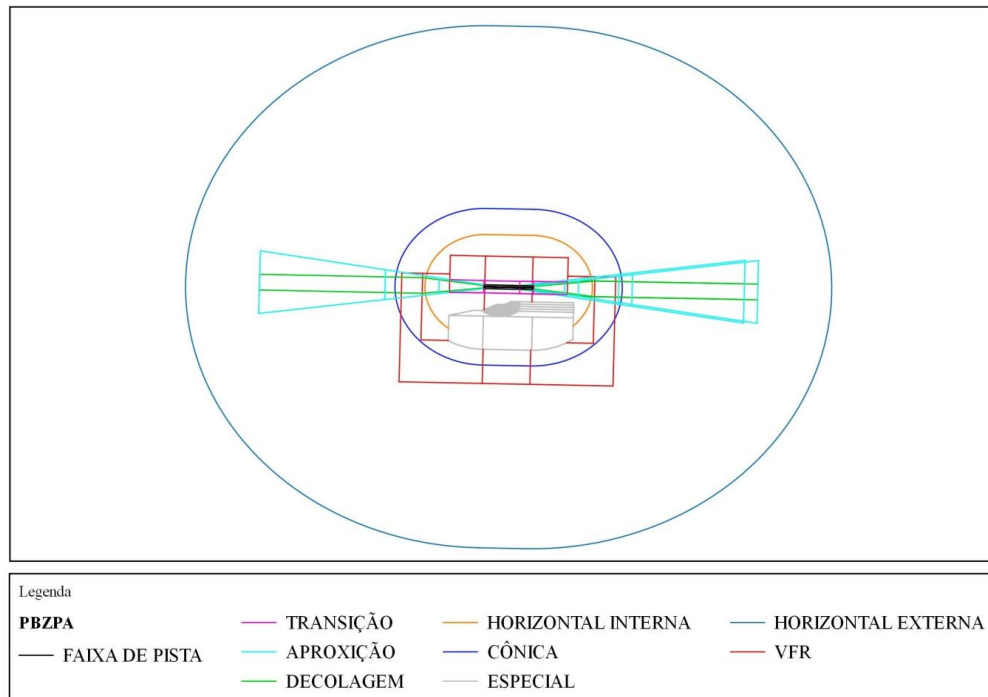
Fonte: FALAVIGNA, 2016.

A altimetria dos modelos digitais está associada ao datum vertical Marégrafo de Imbituba/SC e os modelos são divididos, segundo a articulação 1:5.000 da PMPA, em 110 e 115 estruturas de dados matriciais do MDT e do MDS, respectivamente. Para o recobrimento da área de estudo desse trabalho foram utilizadas 38 estruturas matriciais do MDT e 39 do MDS.

#### 3.2.4 PBZPA

A estrutura de dados digital do PBZPA foi obtida no sítio do Portal de Aeródromos do DECEA, está armazenada no formato *dwg* e traz o contorno das superfícies limitadoras de obstáculos. Além do contorno, tanto para a configuração atual quanto futura da pista do aeroporto (pós-ampliação), apresenta informações como nome, gradiente e elevação de cada superfície. A Figura 12 ilustra o PBZPA do Aeródromo Salgado Filho.

Figura 12 – PBZPA do Aeródromo Salgado Filho.



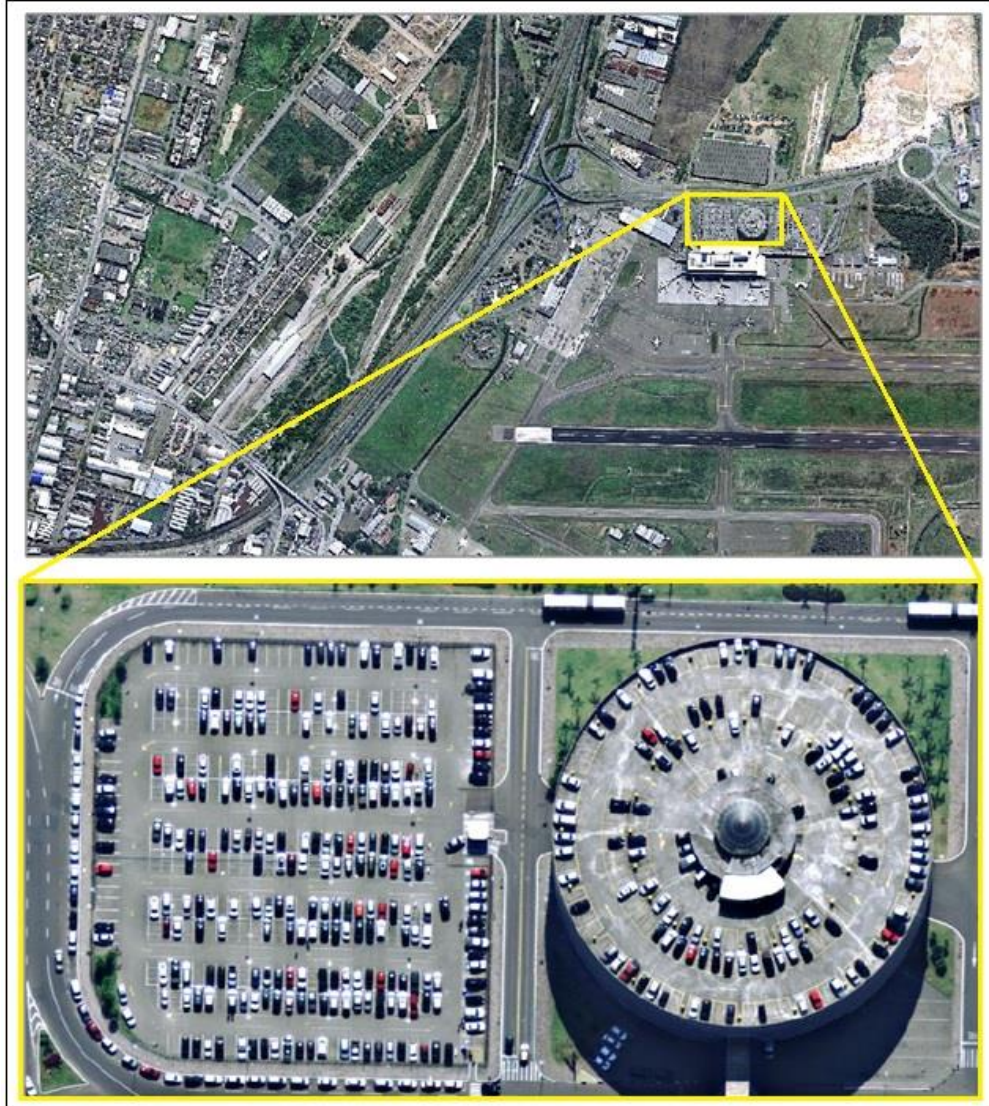
Fonte: Elaboração própria.

As superfícies especial e VFR, na Figura 12, correspondem à superfície limitadora de interesse público e à superfície de voo visual, respectivamente. A superfície de voo visual não foi considerada nesse estudo, pois essa superfície estabelece as regras de voo visual e se refere às aeronaves que executam procedimentos de decolagem visual, de aproximação visual, ou de aproximação por instrumentos PinS (para um ponto no espaço) (BRASIL, 2015).

### 3.2.5 Ortofotos e Eixos viários

Além das estruturas de dados vetoriais e matriciais apresentadas foram utilizados outros elementos para apoiar as representações temáticas e tridimensionais elaboradas nesse trabalho. As estruturas de dados digitais adicionais são as ortofotos e os eixos viários da área de estudo. A Figura 13 ilustra uma fração de uma das ortofotos que compõem a área de estudo e um detalhe dessa ortofoto e na Figura 14 pode-se visualizar uma representação dos eixos viários.

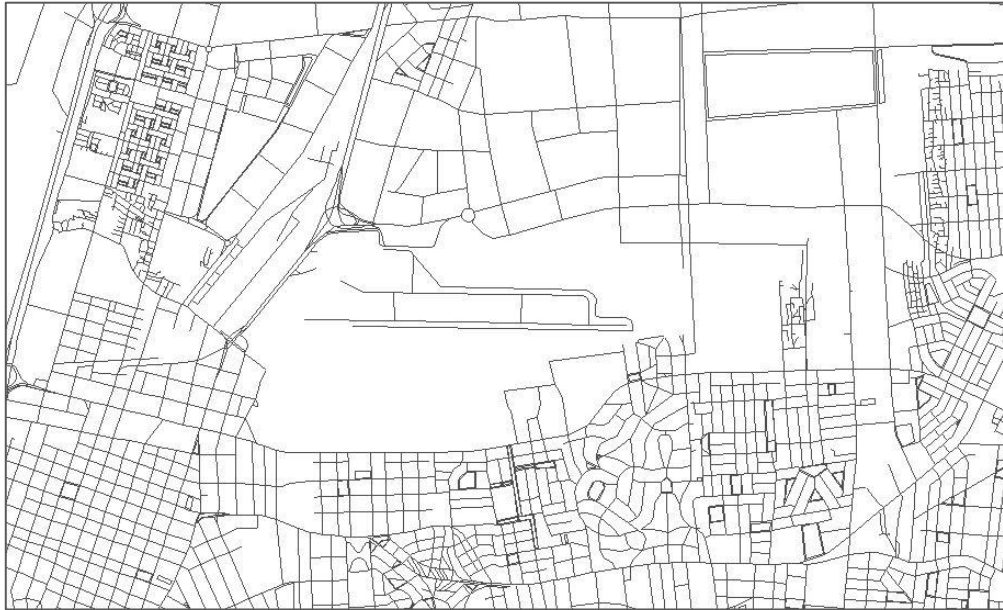
Figura 13 – Fração de uma das ortofotos que compõem a área de estudo.



Fonte: Adaptação de FALAVIGNA, 2016.

As ortofotos são estruturas de dados matriciais, armazenadas no formato *tiff*, representadas por uma malha regular de pixels, com resolução espacial de 12,5 cm e resolução radiométrica de 8 bits. Para o recobrimento da área de estudo desse trabalho foram necessárias 39 das 115 ortofotos que cobrem o município de Porto Alegre.

Figura 14 – Representação dos eixos viários.



Fonte: FALAVIGNA, 2016.

Os eixos viários são linhas imaginárias localizadas no centro das caixas viárias ou pistas de rolamento. Consistem em uma estrutura de dados vetorial, armazenada no formato *shapefile*, e são representados pela primitiva geométrica de linha. A estrutura vetorial dos eixos viários traz como atributos informações importantes para localização, como: nome e categoria (avenida, rua, travessa, beco, etc.) do logradouro, extensão da via e numeração inicial e final dos segmentos de eixos viários.

### 3.3 Softwares

Para o desenvolvimento desse trabalho foram utilizados os *softwares*: ArcGIS (aplicativos ArcMap e ArcScene), versão 10; QGIS (aplicativo QGIS Desktop), versão 2.8.1; AutoCAD Map 3D, versão 2011; e Scilab (aplicativo Scilab Desktop), versão 6.0.2. Os *softwares* SIG ArcGIS e QGIS foram escolhidos por apresentarem inúmeras possibilidades no tratamento de dados geoespaciais; o *software* AutoCAD Map 3D, por possibilitar a criação e edição de geometrias em 2D de forma precisa e a integração de informações CAD e SIG; e o *software* Scilab, por possibilitar operações matriciais de forma intuitiva e amigável.

O *software* ArcGIS, desenvolvido pela empresa americana Esri, consiste em um robusto conjunto de aplicativos e ferramentas que permite gerar mapas, criar, analisar e gerenciar informações geográficas e executar análises espaciais em ambiente SIG (ESRI, 2021). O QGIS é um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) e consiste em um *software* SIG livre e de código aberto, que permite criar, editar, visualizar, analisar e publicar informações geoespaciais (QGIS, 2021a, 2021b). O AutoCAD Map 3D, desenvolvido pela empresa americana Autodesk, é um *software* CAD usado para criar, editar e projetar, de forma precisa, geometrias em 2D e modelos em 3D como objetos sólidos, superfícies e objetos de malha e permite integrar informações CAD e SIG, a partir de um conjunto de ferramentas específicas de SIG e de mapeamento 3D (AUTODESK, 2021a, 2021b, 2021c). O Scilab é um *software* livre e de código aberto para computação numérica, atualmente desenvolvido pelo Grupo ESI (SCILAB, 2021).

A segunda, terceira e quarta etapas da metodologia foram realizadas por meio do uso em conjunto desses *softwares*. A visualização, representação e estruturação dos dados geoespaciais foram realizadas nos *softwares* AutoCAD Map 3D, QGIS e ArcGIS (aplicativo ArcMap). Para as análises espaciais e a identificação e quantificação dos obstáculos, foi utilizado o *software* ArcGIS (aplicativo ArcMap). O cálculo dos pesos dos fatores de risco foi realizado no *software* Scilab. A álgebra de mapas e o mapa de risco dos obstáculos foram feitos no *software* QGIS e a visualização e as representações 3D do risco dos obstáculos foram feitas no *software* ArcGIS (aplicativo ArcScene).

#### 4 PRODUÇÕES ACADÊMICAS

Nesse item são apresentados os artigos científicos produzidos durante o mestrado. A formatação, o idioma e a numeração das páginas em que são apresentados estão conforme a publicação do primeiro artigo e o aceite para publicação do segundo.

O primeiro artigo intitulado “*3D Modeling to Identify and Quantify Obstacles in Aerodrome Protection Zone*”, publicado em 2020, no volume 26, número 2, do periódico Boletim de Ciências Geodésicas, Qualis Capes B1 na área de Geociências, trata da representação 3D de lotes, edificações e do PBZPA do aeroporto para a identificação e quantificação de obstáculos em zonas de proteção de aeródromos. O objetivo desse artigo foi o de gerar representações 3D do entorno do Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho, considerando o limite altimétrico estabelecido no seu PBZPA, para identificar e quantificar obstáculos referentes aos lotes e às edificações da região norte do município de Porto Alegre. O PBZPA considerado nesse artigo foi o vigente na época da realização do estudo e consiste no plano estabelecido pela Portaria DECEA nº 22/ICA, de 14 de julho de 2015, a qual foi substituída pela Portaria DECEA nº 260/ICA, de 23 de setembro de 2016.

O segundo artigo intitulado “*Obstacles Risk Classification Model in Aerodromes Protection Zones using the Multi-Criteria Decision Analysis AHP*”, aceito para publicação no volume 27, número 4, também do periódico Boletim de Ciências Geodésicas, propõe uma metodologia para obter um modelo de classificação do risco de obstáculos em zonas de proteção de aeródromos. Esse artigo traz a execução do método de decisão multicritério AHP, o modelo utilizado para a classificação do risco dos obstáculos presentes na zona de proteção do Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho e o questionário utilizado na pesquisa, o qual consta no Apêndice A da dissertação.

Os artigos são apresentados na sequência, conforme a seguinte ordem:

- **Artigo 1:** *3D Modeling to Identify and Quantify Obstacles in Aerodrome Protection Zone*;
- **Artigo 2:** *Obstacles Risk Classification Model in Aerodromes Protection Zones using the Multi-Criteria Decision Analysis AHP*.

## 3D MODELING TO IDENTIFY AND QUANTIFY OBSTACLES IN AERODROME PROTECTION ZONE

Gabriela Pasetto Falavigna<sup>1</sup> - ORCID: 0000-0003-3028-0448

Andrea Lopes Iescheck<sup>1</sup> - ORCID: 0000-0002-8390-435X

Sergio Florencio de Souza<sup>1</sup> - ORCID: 0000-0002-4720-6714

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre - Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: gabi\_falavigna@hotmail.com; andrea.iescheck@ufrgs.br; sergio.florencio@ufrgs.br

Received in 20<sup>th</sup> November 2019

Accepted in 29<sup>th</sup> April 2020

### Abstract:

Aerodromes protection zones are defined by plans that are determined by three-dimensional (3D) limiting surfaces, which establish the airspace that must remain clear of obstacles, imposing some restrictions on land use. The objective of this paper is to generate 3D models of the surrounding area of Salgado Filho International Airport, considering the constructive altimetric limit established in the Aerodrome Protection Zone Basic Plan (PBZPA), to identify and quantify obstacles related to plots (urban land parcels) and buildings. The adopted methodology includes the analysis and selection of geospatial data, data modeling and performing spatial analysis on the generated 3D models. The results showed that out of a total of 106,838 plots, covering an area of 69.68 km<sup>2</sup>, 4,826 plots (4.52%) exceeded the limiting surface and 1,054 plots (0.99%) represent critical areas where constructions may not be allowed. And, out of a total of 200,573 buildings, 26,418 of them (13.17%) exceeded the limit imposed by PBZPA's. Also, the methodology is valid for detecting and quantifying critical areas concerning the constructive viability of the plots, affected areas regarding the height of the plots and buildings, and for identifying obstacles to aerodromes according to their respective airspace laws.

**Keywords:** 3D Models; Obstacles; Aerodrome Protection Zone

**How to cite this article:** FALAVIGNA, G. P.; IESCHECK, A. L.; SOUZA, S. F. 3D modeling to identify and quantify obstacles in aerodrome protection zone. *Bulletin of Geodetic Sciences*. 26(2): e2020006, 2020



This content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



# 1. Introduction

Mapping of aerodrome protection zones is necessary for urban planning and the economy of cities, as well as for the safety of the population living there. Violations of these protection zones represent highly complex problems as they may impede the expansion of aerodromes, limit the size of aircraft allowed to operate at them and also limit the provision of passenger seats and cargo hold space in the basements (Santos and Müller, 2014).

Aerodrome protection zones are defined by general, specific or basic plans. The set of three-dimensional (3D) imaginary surfaces established by the Aerodrome Protection Zone Basic Plan (PBZPA) delimits and establishes the airspace that must remain clear of obstacles, imposing restrictions on the land use within the aerodrome protection zone. These imaginary surfaces set the boundaries that objects can project into airspace without adversely affecting the safety and regularity of air operations (Brasil, 2015). The dimensions (width, distance, opening, length, gradient, radius) and elevations (related to aerodrome's height) of PBZPA's limiting surfaces are defined regarding the aerodrome's reference code, and can be seen on Table 3-4 of Ordinance No. 957/GC3 of the Air Force Command. The interpretation of PBZPA surfaces associated with the constructive limit established by the urban planning of the city results in land use and occupation issue. This issue can be assessed through spatial analysis that allows the visualization and detection of critical and obstructed areas, serving as a basis for decisions regarding the management of land use and occupation around the aerodrome.

Several kinds of research have been conducted to develop methodologies to identify obstacles to airports. Audu (2016) highlights that safety is an absolute prerequisite in air transport. The safety of aircraft near an aerodrome during the approach, takeoff and taxiing is a critical issue of great importance in flight operations. The correct identification of obstacles around airports is an important issue to ensure the safe takeoff and landing of aircraft (Pinelli and Veracini, 2015). About aviation safety, these authors evaluated the risk of obstacles and risk-mitigating operations and presented a methodology for detecting changes using orthorectified pairs of high-resolution multispectral satellite images acquired from the same geographical area and at different times. Parrish and Nowak (2009) developed and tested a methodology for detecting airport obstacles using LIDAR technology. The authors focused on improving the detection of vertical objects using full-waveform LIDAR data and on the efficiency of the airport obstacle identification process. The analyzes performed to verify the possible densification of the point cloud using the full-waveform data showed a 252% increase in the average number of points for the objects. As a result of the proposed methodology, the authors achieved 46% and 38% reductions, respectively, in computational processing time for obstacle identification and human time spent on manual analysis, compared to previous obstacle identifications using LIDAR data made by the National Geodetic Survey. Panayotov (2009) developed methods for high-resolution airspace modeling, proposing an approach to the development and generation of pseudo-3D models for airspace analysis. The proposed methodology, called the GIS-based Airspace Analysis Model (GAAM), allowed the automation and simplification of various airspaces analysis with the possibility of 3D visualization of the results. GAAM provided a 3D geometric interpretation of the Federal Aviation Administration (FAA) - Federal Aviation Regulation Part 77 - allowing the fast and accurate calculation of the 3D airspace set by FAA regulations. Wang, Hu and Tao (2004) presented a methodology to identify aerodrome obstacles through LIDAR data processing and model risks. Such modeling classifies obstacles into three risk levels by combining four risk factors into a multi-criteria evaluation to assist decision-making in managing aerodrome obstacles. As a result of this study it is presented in a risk rating map showing the high, medium and low-risk obstacles. Iescheck and Oliveira (2011) proposed a Geographic Information System (GIS) for zoning land use and occupation of the area around Salgado Filho International Airport. The purpose of this GIS was to enable rapid analyzes of the technical feasibility of construction projects in accordance with the limitations established by the Aerodrome Protection Zone Specific Plan (PEZPA).

In 2015, all PEZPA were revoked by the Airspace Control Department (DECEA) and replaced by the PBZPA, according to Ordinance No. 957/GC3 of the Air Force Command. Also, there was a reformulation of the Urban and

Environmental Development Master Plan of the municipality of Porto Alegre and a photogrammetric and LIDAR aerial survey of the municipality provided more accurate and up-to-date geospatial data. These changes in the legal aspects regarding the aerodrome protection zone and the municipal master plan, together with the new accurate geospatial information, motivated us to improve this research.

Therefore, the objective of this paper is to generate 3D models of the surrounding area of Salgado Filho International Airport, considering the constructive height limit established in the PBZPA, to identify and quantify obstacles related to plots (urban land parcels) and buildings. The adopted methodology includes the analysis and selection of geospatial data, data modeling and performing spatial analysis. The innovation of this paper about the others is that besides identifying, the obstacles were quantified in terms of area and quantities involved. These obstacles correspond to areas of plots and buildings and areas considered critical, where constructions are not allowed. Also, it should be noted that the methodology employed is valid for any airport and any airspace legislation.

## 2. Study Area

The study area of this paper (Figure 1) comprises the northern zone of Porto Alegre, capital of the state of Rio Grande do Sul, and is limited by latitudes  $29^{\circ}58'S$  and  $30^{\circ}02'S$  and longitudes  $51^{\circ}05'W$  and  $51^{\circ}15'W$ . This region covers an extension of  $127.57 \text{ km}^2$ , which represents 27.04% of the area of the municipality. According to the 2010 census, there are 146,211 households and a population of 411,847 inhabitants in the region, which corresponds to 29.22% of the population of the municipality (ObservaPoa, 2016).

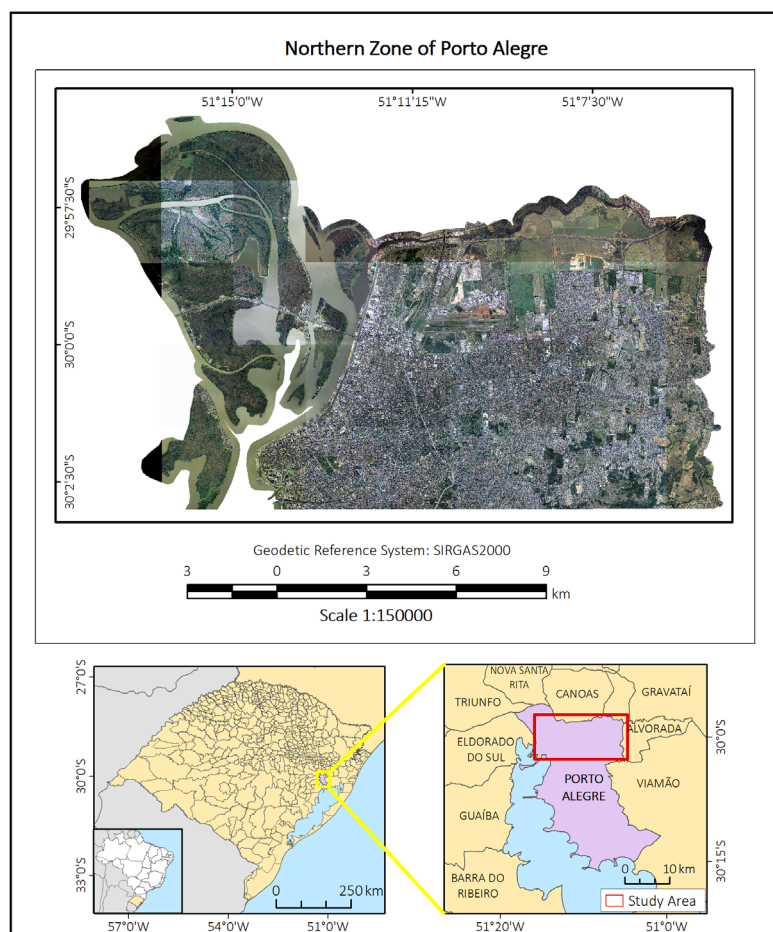
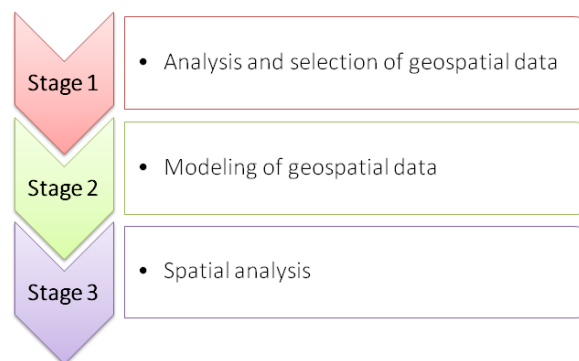


Figure 1: Location of the study area.

### 3. Methodology

The methodology of this work was divided into three stages. The first stage consisted of the analysis and selection of geospatial data at the Porto Alegre City Hall (PMPA). In the second stage, concerning the modeling of geospatial data, the digital model of the PBZPA was elaborated and the altimetric information was attributed to the plots and buildings. And in the third stage, spatial analysis, the airspace obstacles were identified and quantified by comparing the heights of the plots and buildings with the limiting surfaces of the PBZPA. This research was developed with ESRI ArcGIS software, version 10.0, along with the 3D Analyst and Spatial Analyst extensions. Figure 2 illustrates the flowchart of the methodology steps.



**Figure 2.:** Methodology steps.

#### 3.1 Geospatial Data

The geospatial data used in this research refer to plots, buildings, street centerlines, Digital Terrain Model (DTM), Digital Surface Model (DSM) and PBZPA. This data comes from topographic maps, orthophotos, LIDAR data and documents about the PBZPA.

The features related to plots, buildings and street centerlines were obtained from topographic maps, in 1:1,000 scale, in shapefile format. The digital models, DTM and DSM, have a spatial resolution of 1m and were generated from LIDAR data in tiff format. The orthophotos are rectified, having a spatial resolution of 12.5cm, a radiometric resolution of 8 bits and were generated from the photogrammetric aerial survey in tiff format. These orthophotos were used in this research to support the thematic and 3D representations. Altogether it took 38 DTM files, 39 DSM files and 39 orthophotos to cover the study area. All these data were made available by PMPA.

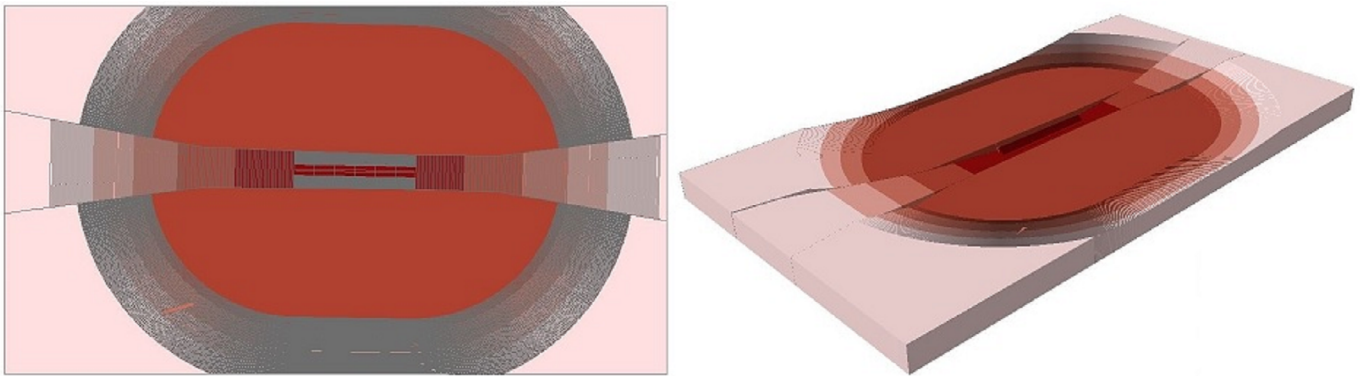
The information that describes, delimits and defines the Salgado Filho International Airport PBZPA can be found in DECEA Ordinance No. 22/ICA, on 14 July 2015. This ordinance provides a 1:60,000 scale plan and a kmz file representing the PBZPA. Besides that, the two-dimensional (2D) representation of PBZPA, in 1:1,000 scale, in shapefile format, available on the PMPA website (PMPA, 2016) were used. This file contains, as attributes, information about the limiting surface type, the description of the limiting surfaces, the location and the maximum allowable height for the properties entered on each limiting surface of the PBZPA.

### 3.2 Data Modeling

The geospatial data modeling stage aims to generate the digital model of the PBZPA and assign altimetric information to the plots and buildings. For this purpose, we performed graphical editing, conversion between data structures, an association of numerical attributes, and 3D representation of PBZPA ramps and limiting surfaces.

From the DTM and DSM modeling, polygon geometry files were generated that represent the terrain height and represent the heights of the terrain and the existing planimetric features, such as buildings, vegetation, streets, among others. To do this, we first converted the DTM and DSM files from the raster structure to the TIN (Triangular Irregular Network) vector structure. Then the TIN files were transformed into polygons and the altimetric attributes were set. DTM attributes include minimum and maximum heights and DSM attribute, maximum height.

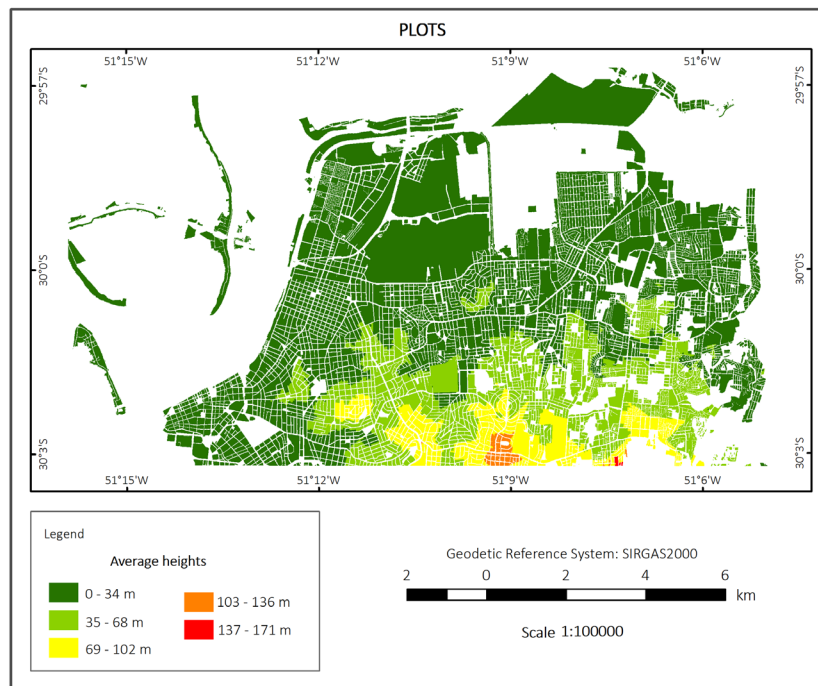
The 3D representation of PBZPA ramps and obstacle limitation surfaces was made by complementing the 2D representation of the PBZPA in shapefile format. The airport runway, approach surface ramps – second section, the approach/transition surface ramps – first section and the runway ramps were included manually. For the design of these ramps, the information contained in Ordinance No. 22/ICA were observed. The ramps consist of several polygons drawn side by side, and for each ramp we assigned their mean heights. Thereby, the 3D digital model of the PBZPA (Figure 3) was generated.



**Figure 3:** PBZPA 3D Digital Model.

With the terrain altitude representation (DTM) and the plot representation with the same polygon geometry it was possible to associate the altimetric information to the plots. This association is based on the spatial relationship between the features and is intended to ensure that each plot receives the respective altimetric information regarding the maximum and minimum heights. This was done by the geometric intersection of the DTM with the plots, through the Identity tool, which allows attributing to a file or level of information, named identified, the attributes of another file or level of information, named identifier. From this procedure a new batch file (identified) containing the altimetric attributes of the DTM (identifier) was generated. Subsequently, the average height of each plot was calculated.

Figure 4 represents the study area plots classified according to their average heights. It is noticed that the plots with the highest average heights are concentrated in the southern portion of the study area, extending to the eastern portion of it. And, around the Salgado Filho International Airport, northwest, north and northeast portions are the plots with the lowest average heights.

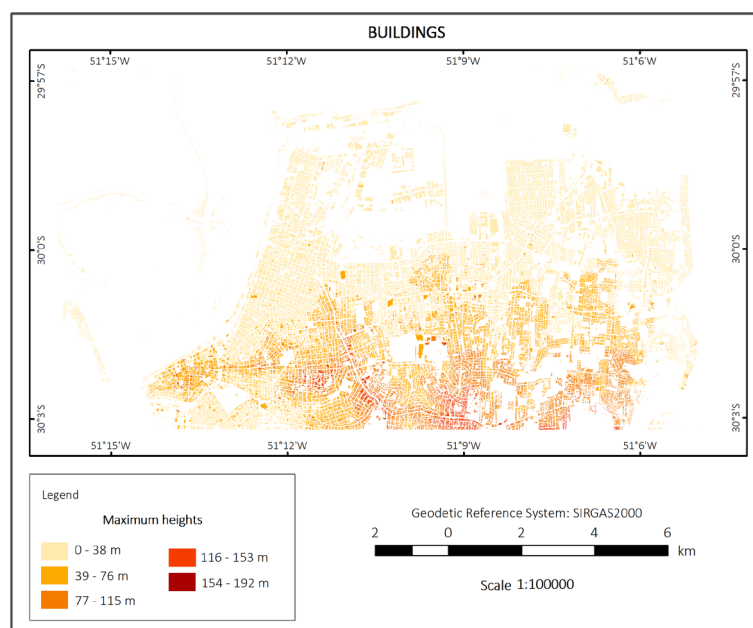


**Figure 4:** Plots classified by average height.

Then, the altimetric information regarding the maximum height was assigned to the buildings. This association, as in the case of plots, is based on the spatial relationship between the features and is intended to ensure that each building in the study area receives the respective altimetric information.

In this paper, the DSM was the file identifier and the buildings the file to be identified. Although some buildings have different heights throughout their structure, we decided to represent each building with a single maximum height to enable the altimetric comparisons between the buildings and the PBZPA, and the 3D representation of the buildings.

Figure 5 represents the buildings of the study area classified according to their maximum height. As in the case of plots, it is clear that the tallest buildings are concentrated in the highest regions of the study area (south portion, extending to the east portion) and around the airport are the lower buildings.



**Figure 5:** Buildings classified by maximum height.

### 3.3 Spatial Analysis

The spatial analyses were performed using the 3D models of the plots, buildings and PBZPA. To identify and quantify plots, buildings and critical areas, we compared plots heights and buildings heights with PBZPA limiting surfaces.

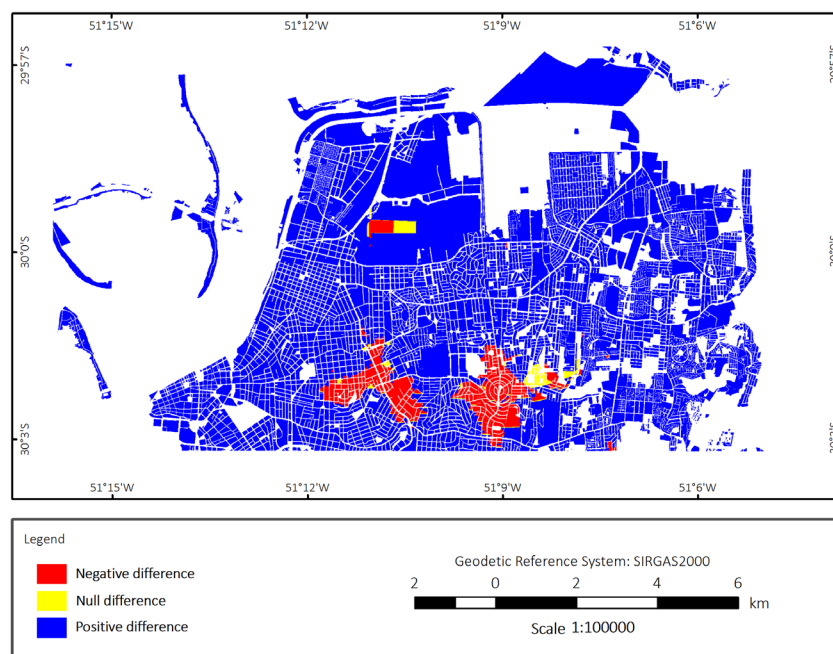
Initially, PBZPA information regarding the type, description, location, observation, message and height of the limiting surfaces was assigned to the plots. This was done through the geometric intersection of PBZPA with the plots, using the Identity tool, with PBZPA being the identifier file and the plots being the file to be identified. The comparison between the heights was made by subtracting the limiting surface heights from the average heights of the plots.

The same procedure was performed with buildings, with PBZPA being the identifier file and buildings being the file to be identified. The comparison between the heights, in turn, was made by subtracting the heights of the limiting surfaces by the maximum heights of the buildings.

## 4. Results and Discussions

The results of the spatial analysis allowed us to identify and quantify the obstacles in the Salgado Filho Airport airspace, based on the constraints established by PBZPA limiting surfaces. These obstacles concern plots, buildings and areas considered critical, where no buildings are allowed. The analyses were performed using the 3D models of the plots, buildings and PBZPA. Initially, the heights of the plots were compared with the PBZPA and then the heights of the buildings with the PBZPA.

Figure 6 shows the comparison between the mean heights of the plots and the limiting surface heights of the PBZPA. In this Figure it is possible to identify, in red, the areas where the terrain height already exceeds the limiting surfaces. These are critical areas in which buildings should not be allowed. Also, the yellow areas are at the edge of the protection zone and require more detailed analysis and field confirmation before defining their constructive viability. In blue are represented plots or fractions of these which are not reached by the limiting surfaces and thus allow for building.



**Figure 6:** Plots classification according to PBZPA.

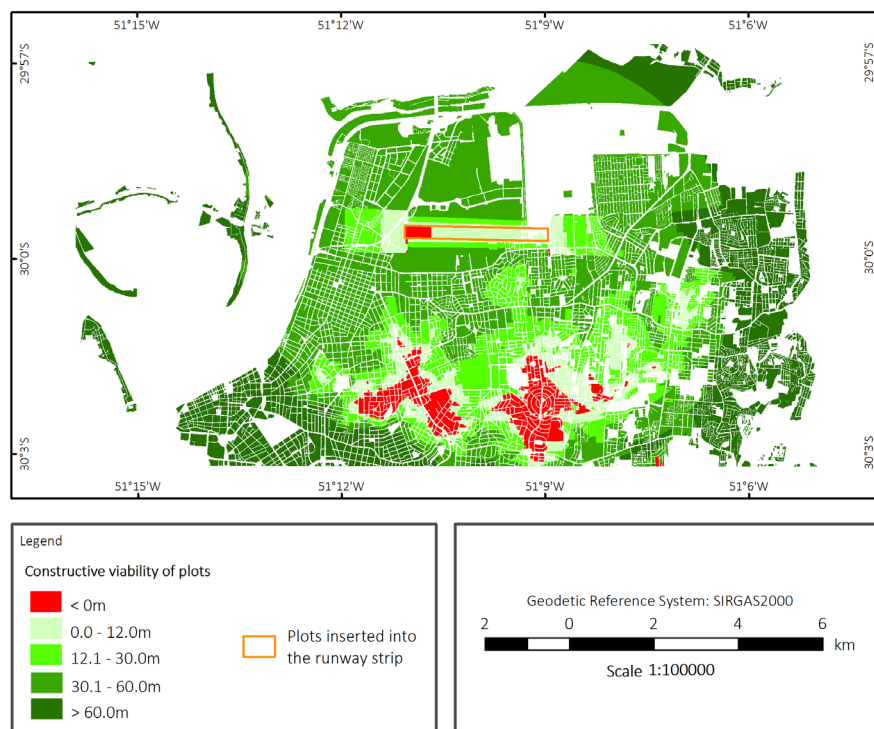
For the quantification of affected plots and critical plots, 106838 plots were considered, representing an area of 69.68 km<sup>2</sup>. Table 1 presents the area of the plots reached in percentage and km<sup>2</sup>, the number of plots reached, totally and partially, and the number of plots that are in the limit of the protection zone (critical plots), considering the accuracy of 0.5m.

**Table 1:** Information of the identified plots

Plots Area	69.68 km <sup>2</sup>		Plots Number		106838	
			Total (T)	Partial (P)	T + P	(%)
Plots reached	3.32 km <sup>2</sup>	4.76 %	4615	211	4826	4.52
Critical plots	0.58 km <sup>2</sup>	0.84 %	636	418	1054	0.99

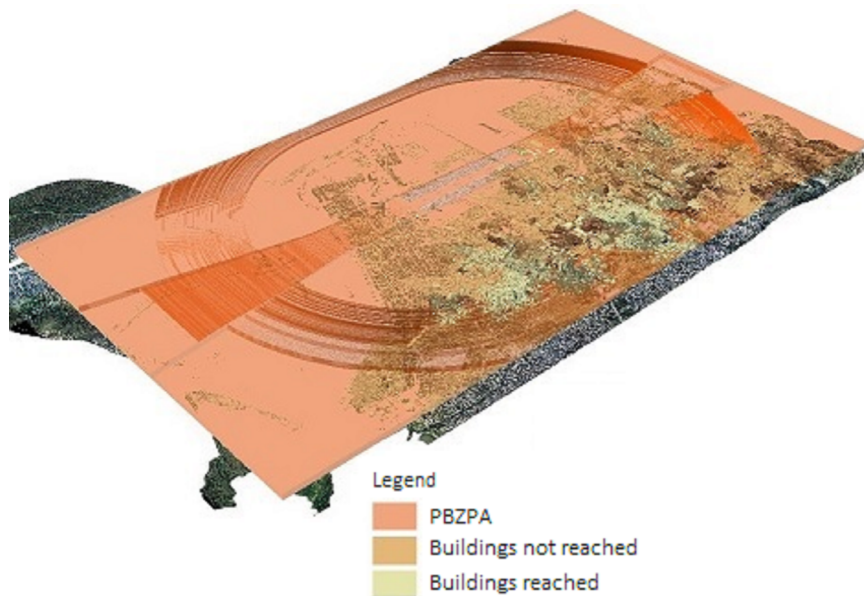
Looking at Table 1, it is noted that out of a total of 106838 plots, 4826 exceed the PBZPA limiting surfaces, of which 4615 totally and 211 partially exceed, which is equivalent to 4.52% of the total plots. These plots correspond to an area of 3.32 km<sup>2</sup>, i.e., 4.76% of the total area, which is 69.68 km<sup>2</sup>. Also, 1054 plots, 0.99% of the total, represent critical areas in which buildings should not be allowed, and 636 plots having their entire area on edge and 418 plots being partially reached. This corresponds to an area of 0.58 km<sup>2</sup> which equals 0.84% of the total area.

The map in Figure 7 shows the constructive viability of the plots. The classes indicate the maximum height of the buildings that can be built in each plot. Considering the accuracy of 0.5m for the height of the plots the constructive viability was divided into 5 classes. The approximate number of floors was estimated based on the legislation and the master plan of the municipality. In class < 0m no buildings are allowed, as the terrain already exceeds the limiting surfaces of the PBZPA. Classes from 0.0 to 12.0m show plots with constructive viability of up to 4 floors, from 12.1 to 30.0m are plots with constructive viability of 5 to 10 floors, from 30.1 to 60.0m are plots with constructive viability of 10 to 20 floors, and > 60.0m are plots with constructive viability above 20 floors.

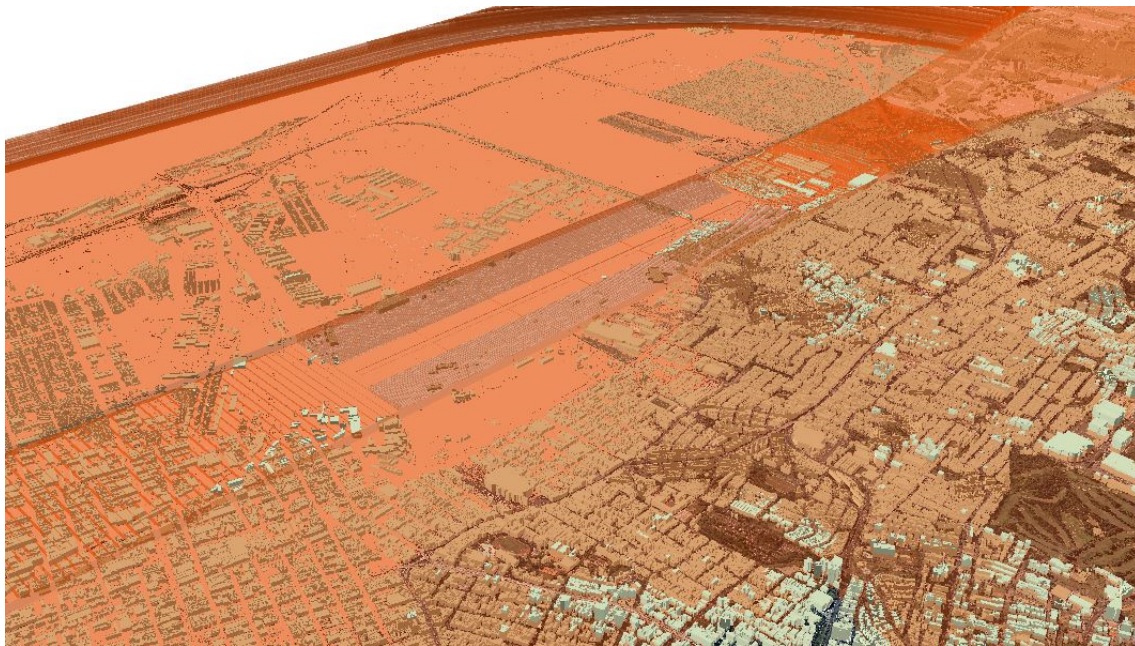


**Figure 7:** Constructive viability of plots.

By comparing the 3D models of buildings and the PBZPA it was possible to identify and quantify the obstacles related to buildings. Figure 8 shows the 3D representation of buildings projecting, wholly or partially, into airspace. And Figure 9 shows, in detail, an area near the airport where you can view buildings that exceed limiting surfaces of PBZPA.



**Figure 8:** 3D representation of buildings reached or not by the PBZPA.



**Figure 9:** Detail of buildings reached by PBZPA.

The quantification of the affected buildings and critical buildings was performed considering 200573 buildings, which represent a built area of 27.86 km<sup>2</sup>. Table 2 shows the area of buildings reached in percentage and km<sup>2</sup>, the number of buildings reached, totally and partially, and the number of buildings that are in the limit of the protection zone (critical buildings), considering the accuracy of 0.5m.

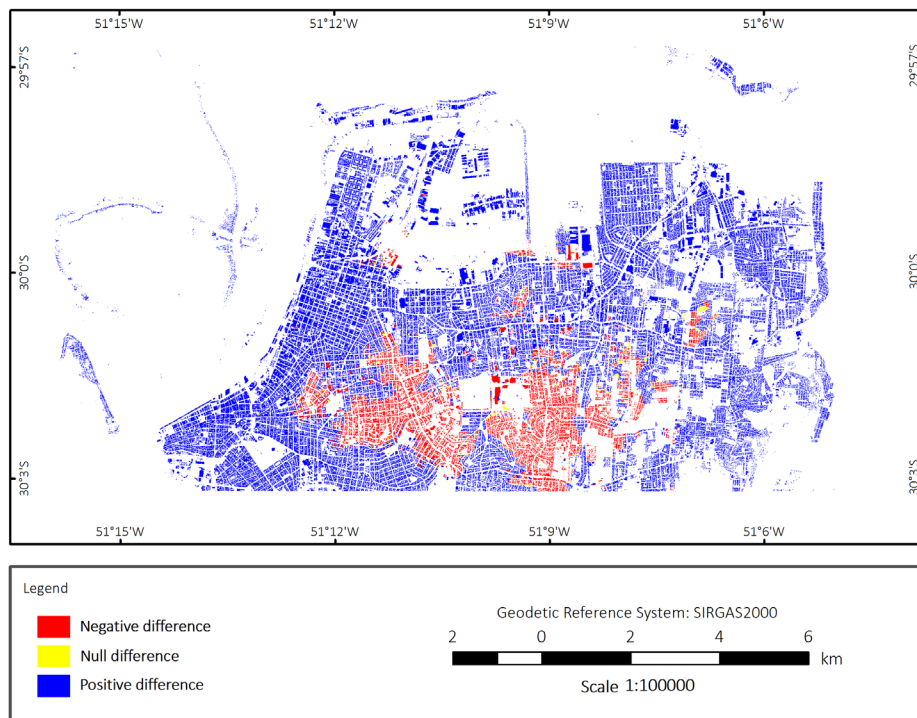


**Table 2:** Information of identified buildings

Buildings Area	27.86 km <sup>2</sup>		Buildings Number		200573	
			Total (T)	Partial (P)	T + P	(%)
Buildings reached	4.33 km <sup>2</sup>	15.54 %	26077	341	26418	13.17
Critical buildings	0.22 km <sup>2</sup>	0.80 %	1529	609	2138	1.07

The values in Table 2 show that 26418 buildings reached by the limiting surfaces of the PBZPA were identified, of which 26077 are reached throughout their area and 341 buildings are partially reached. The sum of the total and partially reached buildings represents 13.17% of the buildings of the study area, which corresponds to 4.33 km<sup>2</sup> and reaches 15.54% of the total built area. Critical buildings correspond to 2138 buildings, 1.07% of the buildings, of which 1529 buildings are fully and 609 buildings are partially on the limiting surfaces. The 2138 critical buildings amount to 0.22 km<sup>2</sup> of the built area, which corresponds to 0.80% of the total built area.

In Figure 10 it is possible to perceive the comparison between the maximum building heights and the limiting surface heights of the PBZPA. In blue the buildings, or fractions thereof, are shown to have a positive difference, i.e. those that are not reached by the limiting surfaces and therefore are not considered obstacles to the airport. In red, the buildings that present negative difference, that is, those that are completely or partially reached by the limiting surfaces, because the height of the top of the building is above that allowed by the PBZPA. And, in yellow, the critical buildings are represented, that is, those that show no difference between the height of the PBZPA surfaces and the maximum height of the building, and so are unreached buildings, but which are at the height limit allowed.



**Figure 10:** Classification of buildings according to the PBZPA.

Looking at Figure 10, it can be seen that most of the buildings in the study area are in the blue class, with differences between heights ranging from a few meters to over 155 meters. Similarly to the one identified in the analysis of the plots heights with the PBZPA heights, it is noted that the largest number of buildings identified as obstacles are concentrated in the higher parts of the study area, which are inserted on the inner horizontal surface,

on the conical surface and on the outer horizontal surface of the PBZPA. There are also affected buildings that are inserted into the first section of approach/transitional surface of the PBZPA. Such buildings are considered more worrying obstacles to the operation of the airport than buildings inserted into the inner horizontal surface, the conical surface and the outer horizontal surface. This is because obstacles on or near the takeoff and landing axis of aircraft can, for example, diminish landing aircraft alternatives, forcing the aircraft to make a longer lap to land, and even canceling a landing procedure. Obstacles located outside the takeoff and landing axis, otherwise, are more likely to be circumvented by aircraft. Therefore, buildings identified as obstacles, located on and near the landing and takeoff axis, must undergo a process of adaptation to the imposed situation.

## 5. Conclusion

In this paper, 3D models were created to identify and quantify obstacles around Salgado Filho International Airport. Spatial analyzes were performed by comparing the heights of the plots and the heights of the buildings with the limiting surfaces of the PBZPA. The quality and timeliness of the geospatial data used in analyzes directly influence the generated products.

The results show that the study is valid for detecting and quantifying critical areas, such as the constructive viability of the plots, the areas reached by PBZPA limiting surfaces, the height of the plots and buildings, and also to identify obstacles to aerodromes, according to the restrictions established by their respective airspace laws. In addition, it is possible to verify the constructive viability of the plots and to monitor the buildings in the northern area of Porto Alegre, regarding the altimetric limits imposed by PBZPA surfaces, with an accuracy of 0.5m. This serves as a basis for making decisions regarding land use and occupation management around the Salgado Filho International Airport, as it makes it possible to answer most questions related to the construction viability of the protection zone.

In addition to serving as a tool for urban users and managers, it also serves the authorities responsible for airspace legislation as it allows for the control and supervision of existing and future buildings within the aerodrome protection zone. Airports less susceptible to interference from obstacles become safer, since the risk of changing or canceling landing procedures, reducing runway length, impacting on the size of aircraft allowed to operate, or even disabling aerodrome operations are minimized. Besides that, the smaller the restrictions imposed on airports due to obstacles, the greater operating capacity and the possibility of the aerodrome expansions of the airports, which contributes to the development and economy of the regions served by them, and for the safety of the population.

The PBZPA addressed in this paper was revoked in September 2016 and replaced by DECEA Ordinance No. 260/ICA, which redrafted the restrictions imposed on the use of properties located within the protection zone of Salgado Filho International Airport. Nevertheless, the methodology employed in this work is valid for any airport and airspace legislation. The sequence of this research, already in progress, is related to the update of the PBZPA, according to current legislation, and the classification of the different types of risk obstacles to the safety and regularity of air operations. Therefore, criteria such as proximity and location will be adopted.

## AUTHOR'S CONTRIBUTION

A.L.I. conceived of the presented idea and supervised the project. G.P.F. and A.L.I. researched and selected theoretical references. G.P.F. collected and modeled the geospatial data and performed spatial analysis. All authors discussed the results. G.P.F. wrote the manuscript and all co-authors performed paper revision, refinement and helped shape the manuscript.

## REFERENCES

- Audu, I. 2016. *Spatial Analysis of the Threat of Potential Aerodrome Obstacles on Flight Safety Operations, in Mallam Aminu Kano International Airport, Kano-Nigeria*. Master Thesis. Ahmadu Bello University.
- Brasil, 2015. *Portaria nº 957/GC3, de 09 de julho de 2015*. Dispõe sobre as restrições aos objetos projetados no espaço aéreo que possam afetar adversamente a segurança ou a regularidade das operações aéreas, e dá outras providências. Publicada no DOU nº 135, de 17 de julho de 2015, Seção 1, p. 6.
- Ilescheck, A. L.; Oliveira, A. L. S. 2011. Geographic Information System for 3D Modeling of the Specific Airport Protection Zone Plan and Urban Planning. In: *25th International Cartographic Conference*. Paris, France, 3-8 July 2011.
- ObservaPoa, 2016. *Cidade de Porto Alegre*. [online] Available at: <[http://portoalegremanalise.procempa.com.br/?regiao=1\\_0\\_0](http://portoalegremanalise.procempa.com.br/?regiao=1_0_0)> [Accessed 20 June 2016].
- Panayotov, A. P. 2009. *High Resolution Airport Airspace Model Using Geographic Information System*. Doctoral Thesis. University of Colorado Denver.
- Parrish, C. E.; Nowak, R. D. 2009. Improved Approach to LIDAR Airport Obstruction Surveying Using Full-Waveform Data. *Journal of Surveying Engineering*, 135(2), pp.72-82.
- Pinelli, G.; Veracini, T. 2015. Remote Sensing Monitoring of Changes Potentially Associated to Obstacles to Air Navigation. In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015 (IGARSS 2015)*. Milan, Italy, 26-31 July 2015.
- Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA), 2016. *Mapas Digitais Oficiais - Secretaria Municipal de Urbanismo*. [online] Available at: <[https://www2.portoalegre.rs.gov.br/spm/default.php?p\\_secao=310](https://www2.portoalegre.rs.gov.br/spm/default.php?p_secao=310)> [Accessed 20 June 2016].
- Santos, F. A. B.; Müller, C. 2014. Sistema de Informações Geográficas no apoio ao gerenciamento de obstáculos à Superfície de Segmento Visual. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 20(3), pp.504-525.
- Wang, C.; Hu, Y.; Tao, V. 2004. Identification and Risk Modeling of Airfield Obstructions for Aviation Safety Management. In: *ISPRS 20th International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress*. Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004.

## OBSTACLES RISK CLASSIFICATION MODEL IN AERODROMES PROTECTION ZONES USING THE MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS AHP

### *Modelo de Classificação do Risco de Obstáculos em Zonas de Proteção de Aeródromos usando o Método de Decisão Multicritério AHP*

Gabriela Pasetto Falavigna<sup>1</sup> - ORCID: 0000-0003-3028-0448

Andrea Lopes Iescheck<sup>1</sup> - ORCID: 0000-0002-8390-435X

Sergio Florencio de Souza<sup>1</sup> - ORCID: 0000-0002-4720-6714

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre - Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: gabi\_falavigna@hotmail.com; andrea.iescheck@ufrgs.br; sergio.florencio@ufrgs.br

Received in

Accepted in

#### **Abstract:**

Aerodromes protection zones are defined by plans that establish the limits that objects can project into airspace without affecting the safety and regularity of air operations. These plans are composed of a set of imaginary three-dimensional surfaces that impose restrictions on the use of properties within the protection zones. Our research problem is how to classify the risk of obstacles in aerodromes protection zones. In this paper, we propose a methodology to obtain an obstacle risk classification model. We defined the risk factors and applied a questionnaire to an expert in civil aviation. The obstacle risk classification model resulted from the specialist analysis and by applying the analytic hierarchy process (AHP) for multi-criteria decision analysis. The advantage of the AHP in studies that use specialists' empiric knowledge for risk modeling is the treatment of uncertainties, and the use of tangibles and intangibles criteria. The results showed that the most significant influence on the risk of an obstacle is how much that obstacle protrudes the limiting surfaces, followed by the distance between the obstacle and the nearest airport runway threshold, the limiting surface in which the obstacle is, and the nature of the obstacle.

**Keywords:** Aerodrome protection zone; Analytic Hierarchy Process; Risk modeling

## 1. Introduction

Obstacles in aerodromes protection zones pose complex problems for air safety and the economy of cities. These violations can reduce or cancel landing procedures (Santos and Müller

2014), in addition to preventing the expansion of aerodromes and limiting the size of aircraft allowed to operate at airports.

Aerodrome Protection Zone Basic Plan (PBZPA) consists of a set of three-dimensional (3D) imaginary surfaces, imposing altimetric restrictions on the use of properties within the protection zone (DECEA 2019). Such surfaces establish the limits that objects can protrude into the airspace without adversely affecting the safety and regularity of air operations (Brasil 2015). The configuration of the limiting surfaces depends on the characteristics of the aerodrome, such as location and height. The establishment of this configuration is according to the type of runway threshold operation, the aerodrome reference code, the performance categories of the aircraft in operation or planned to operate at the airport, and the type of runway threshold use (landing, takeoff, or landing and takeoff) (Brasil 2015). The Federal Aviation Administration (FAA), a U.S. government agency responsible for civil aviation regulations, establishes the imaginary surfaces for obstruction evaluation through the Federal Regulation Title 14 Part 77, Safe, Efficient Use and Preservation of the Navigable Airspace. This regulation defines the object identification surfaces (OIS), and the standards and notification requirements for objects that affect navigable airspace, allowing to previously identify potential risks and then preventing or minimizing them (FAA 2021a, 2021b).

Medeiros and Correia (2010) evaluated non-conformities in the infrastructure of Brazilian airports in terms of air safety. They observed that eight of the twenty largest Brazilian airports in passenger movement had irregularities. These inadequacies mainly refer to the absence of runway end safety area and the obstacles in the runway strip, and obstacles that violate the limiting surfaces. According to their study, all eight airports had obstacles on the runway strip. Six had obstacles that violated the transition surface, and two had obstacles that violated the approach and takeoff surface.

The safety of the aircraft in the vicinity of an aerodrome during the approach, takeoff, and taxiing is a prerequisite in air transport (Audu 2016). The correct identification of obstacles around airports is essential to ensure the safety and regularity of air operations. In this context, there are several works concerning methodological proposals to identify obstacles to airports (Parrish and Nowak 2009, Pinelli and Veracini 2015, Audu 2016, Falavigna, Iescheck and Souza 2020). Falavigna, Iescheck and Souza (2020) identified and quantified Salgado Filho International Airport obstacles in Porto Alegre city (Brazil), using 3D models of urban plots, buildings, and PBZPA. This study showed that 4.52% of the urban plots and 13.17% of the buildings in the study area exceeded the limit imposed by the airport's PBZPA.

In addition to identifying and quantifying obstacles, it is necessary to assess the risk that these obstacles pose to air safety. Knowledge of the risk level of each obstacle is vital for mitigating risks to air operations. To ensure an acceptable level of operational safety at airports and improve the airport structure, it is necessary to know the areas that present the highest risks (Barroso and Correia 2014).

There are several studies on runway excursions (Fortes and Correia 2012, Barroso and Correia 2014, Correia and Neto 2014). However, few studies have considered airports' PBZPA in assessing the risk of obstacles that violate the aerodrome protection zone. Besides, there is no standardization on how to classify the risk of these obstacles. The International Civil Aviation Organization (ICAO) guideline on safety risk classifies the risk of obstacles into three categories: intolerable, tolerable, and acceptable. The definition of these categories is following the

probability of an accident occurring and the possible economic, social, and environmental impacts related to that accident (ICAO 2018).

We must consider several factors when modeling the risk of obstacles to airports. The Analytic Hierarchy Process (AHP), developed by Saaty in 1980, is a multi-criteria decision analysis used in complex decision-making scenarios. The base of this method is decomposing the problem into hierarchy levels for its better understanding and evaluation. In general, the steps involved in the method consist of: defining the criteria or factors relevant to the study; organizing the factors in a reciprocal matrix, called "pairwise comparison matrix"; performing pairwise comparisons (judgments) to establish the relative importance of the factors, and obtaining the relevance (weight) of each factor to the analysis. It is necessary to calculate the consistency index and the inconsistency ratio for the matrix to assess the consistency of the results. Inconsistency ratio values up to 0.10 (10%) are considered acceptable (Saaty 1984).

The AHP has been used for evaluating airport safety risks. Barroso and Correia (2014) applied a questionnaire to an expert and used the AHP to assess the risk of obstacles to Rio de Janeiro International Airport. They rank the obstacles most likely to cause a severe event, considering ten risk factors selected from the ICAO safety risk severity table (ICAO 2009). The inconsistency ratio obtained for the pairwise comparison matrix was 17%, which exceeded the value considered tolerable by the method. However, the authors did not revise the matrix as recommended in the AHP. In the USA, Wang, Hu and Tao (2004) used empiric knowledge and the AHP to model the risk of obstacles that violate the limiting surfaces of Santa Barbara Airport, California. The authors considered four risk factors and analyzed the protruding condition of the obstacles above the limiting surfaces. They mapped the obstacles risk, classifying the obstacles as high, medium, and low risk. Ozdemir, Basligil and Ak (2016) implemented the fuzzy ANP (Analytic Network Process) and the fuzzy AHP methods for prioritizing and evaluating airport safety risk criteria. In this study, the authors considered three main risk criteria (human factors, facility and equipment factors, and environmental factors), 14 subcriteria and five aviation sector experts' evaluations. Both of the methodologies produced the same results and considered the subcriteria "safety conscious", "flight volume condition" and "airport geographic environment condition" the most important risk factors for airport safety.

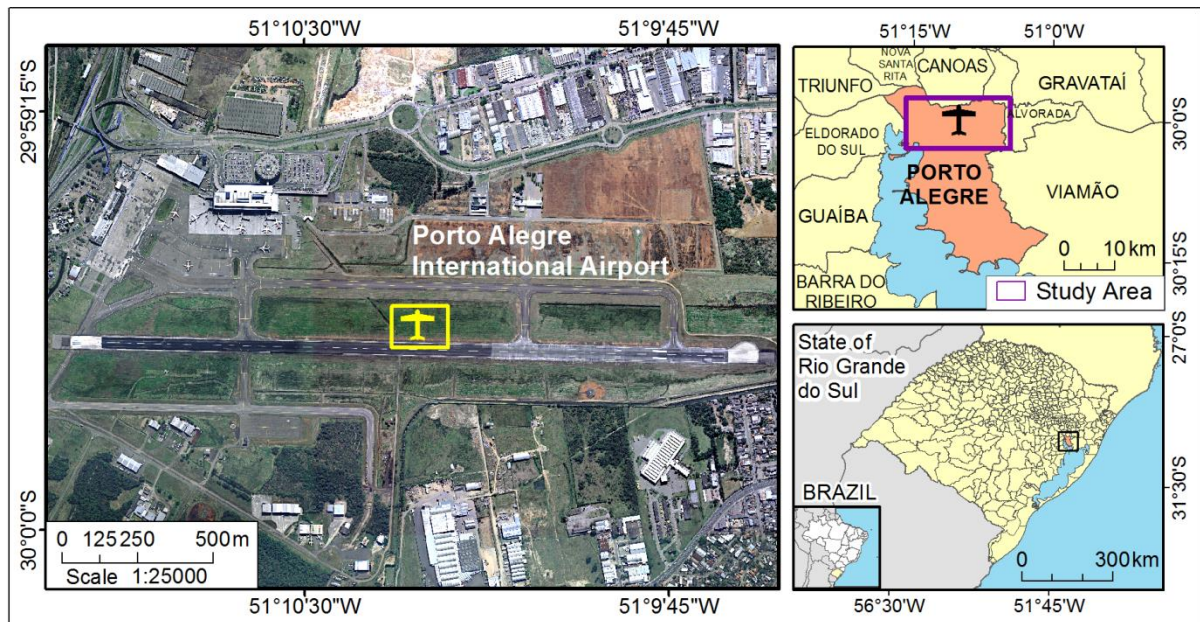
These reviews show that AHP is applied in studies that use specialists' empiric knowledge for modeling airports obstacles risk and for evaluating airport safety risk criteria. The innovation of our work about the others is that we considered how much the obstacle protrudes each limiting surface in obstacle risk modeling. Also, we prepared a general questionnaire, adaptable to any airport, and we implemented methods to improve the consistency of the pairwise comparison matrix of the AHP.

In this context, our research problem is: Considering the obstacles that violate the aerodrome protection zone, how to classify the risk that these obstacles pose to the security and maintenance of air operations at airports?

This study aims to propose a methodology to obtain a risk classification model for obstacles in aerodrome protection zones to map obstacles risk in the Porto Alegre International Airport protection zone, assisting in the effective management of obstacles and approaches to risk mitigation actions for airspace operations. Also, the specific objectives comprise defining the risk factors to obstacles and getting the relevance (weight) of each risk factor for the analysis.

## 2. Materials and Methods

The Porto Alegre International Airport (Figure 1) is located in the northern zone of Porto Alegre, the capital city of the state of Rio Grande do Sul. This region extends to 127.57 km<sup>2</sup>, which represents 27.04% of the area of the municipality (OBSERVAPOA 2021). Porto Alegre's Airport has the largest passenger traffic of Brazil's southern region, with 82,461 passenger movements in 2019 (CGNA 2020).



**Figure 1:** Location of Porto Alegre International Airport.

In this work, we divided the methodology into three steps. The first step consisted of risk modeling using the AHP. In this step, we defined the risk factors and prepared a questionnaire that an expert in civil aviation answered. Based on the expert's answers, we established the relative importance between the risk factors and built the AHP's pairwise comparison matrix. The second step included the analysis and improvement of the comparison matrix consistency. In this stage, we calculated the consistency index and the inconsistency ratio of the matrix. Finally, in the third step, we defined the weights of each risk factor using the AHP and developed a model for obstacle risk' classification. We used the free and open-source software Scilab to implement the AHP and the methods for consistency improvement of the pairwise comparison matrix. Figure 2 illustrates the steps of the research method.

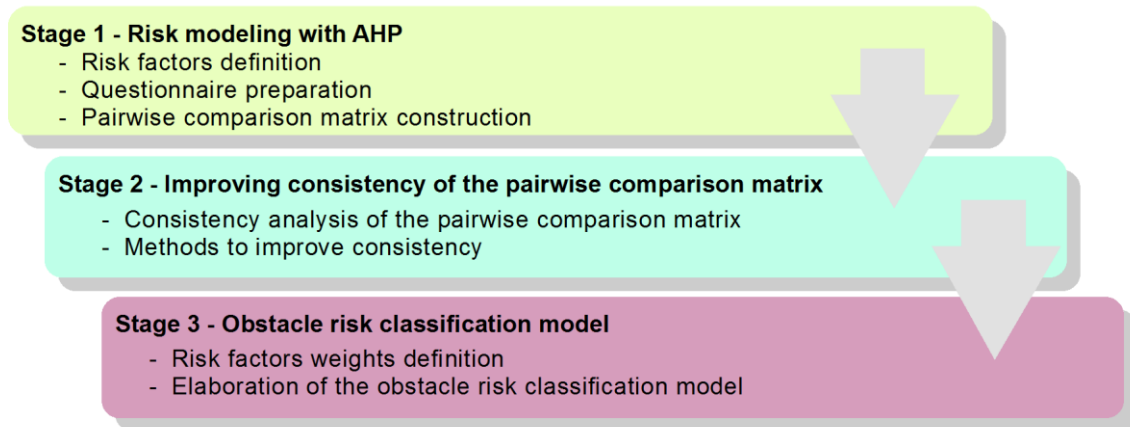


Figure 2: Methodology's flowchart.

## 2.1 Risk modeling using the Analytical Hierarchy Process (AHP)

The AHP is a multi-criteria decision analysis developed by Thomas L. Saaty in 1980, used in complex decision-making scenarios in engineering, industry, environment, education, politics, and economics. The AHP is widely used in resource allocation and planning issues and assessing environmental impacts (Saaty 1984, Saaty and Vargas 2012). Civil aviation used it in studies on the assessment and classification of the risk of obstacles to airports (Wang, Hu and Tao 2004, Barroso and Correia 2014) and studies on prioritizing research and development projects (Silva, Belderrain and Pantoja 2010).

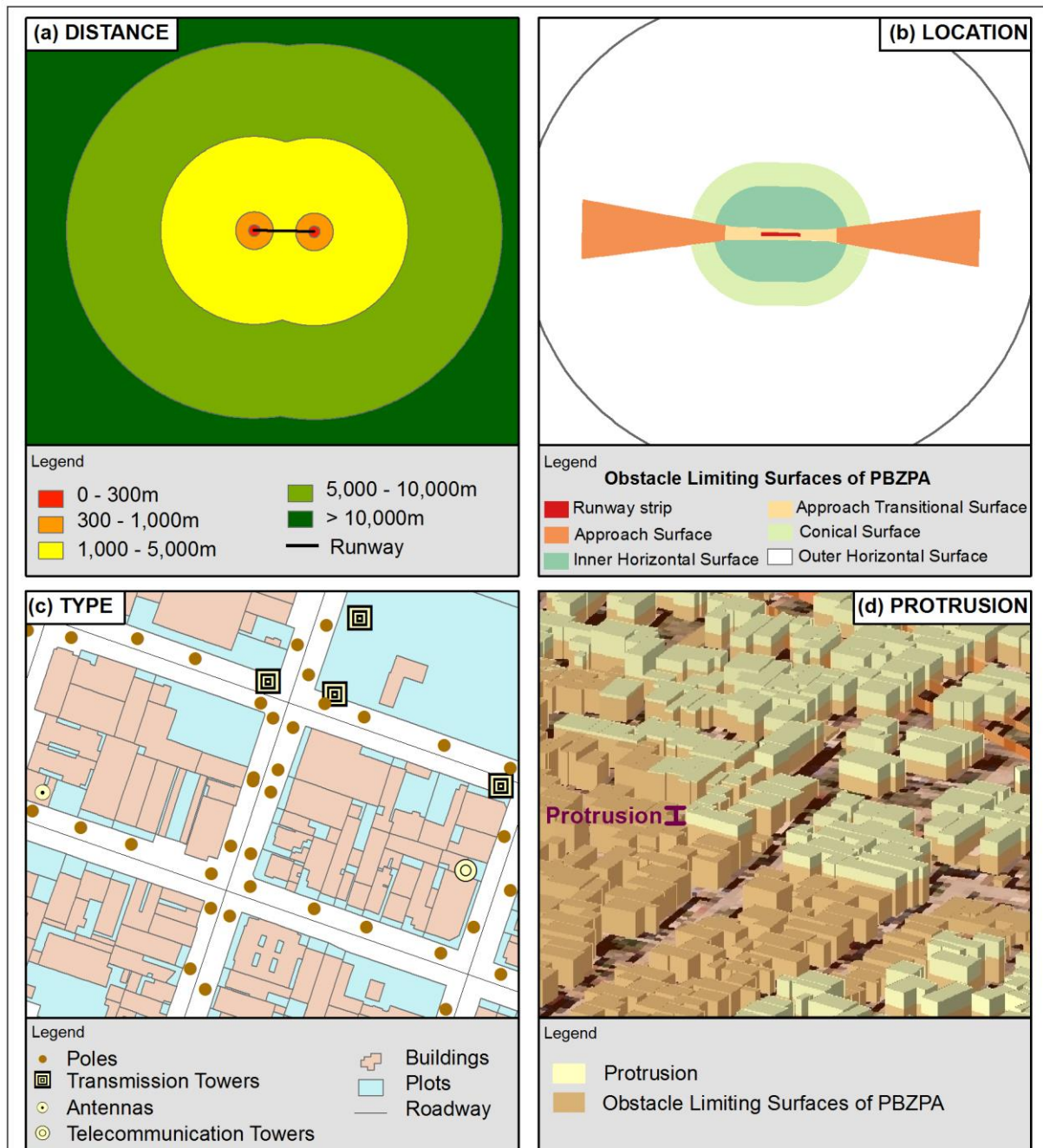
Saaty (2008) defines the AHP as a process to obtain measurements through pairwise comparisons between the elements analyzed. Such comparisons are made through judgments of specialists, using a priority scale, which represents how important an element is related to another. The AHP facilitates the understanding and assessment of the problem by dividing it into hierarchy levels and determining a global action for each alternative, prioritizing or classifying these alternatives (Silva, Belderrain and Pantoja 2010).

In this study, we chose to use the AHP because it is one of the most widely employed decision support tools (Ozdemir, Basligil and Ak 2016), because of the well-known contribution of the AHP on the treatment of uncertainties in studies that use specialists' empiric knowledge (Silva Junior 2015), and because this method is admittedly functional for manipulating intangible criteria together with tangibles (Souza 2006). Also, we considered few factors (less than 7) to be compared simultaneously. According to Saaty (1977), the human mind is limited to  $7 \pm 2$  factors for simultaneous comparison; i.e., there is a psychological limit that establishes that an individual cannot simultaneously compare (judge) more than seven elements (plus or minus two) without being confused.

To assess the risk that an obstacle poses to compromising the safety and regularity of air operations at an airport, we defined risk factors for the obstacles. We used the risk factors based on Wang, Hu and Tao (2004): distance, location, type, and protrusion. However, we adopted a different meaning for the protrusion factor. While Wang, Hu and Tao (2004) assessed which limiting surface the obstacle protrudes, we analyzed how much each obstacle protrudes the limiting surfaces. We changed the definition of this factor, considering that obstacles protruding



more or less the same limiting surface will have different associated risk levels. Thus, we defined the risk factors (Figure 3) as follows: **(a) Distance**: distance between the obstacle and the nearest airport runway threshold; **(b) Location**: in which PBZPA's limiting surface the obstacle is; **(c) Type**: nature of the obstacle (relief, building, pole, antenna or tower); **(d) Protrusion**: how much the obstacle protrudes each limiting surface of the PBZPA (0.5m, 1m, 2m, for example).



**Figure 3:** Risk factors: (a) Distance; (b) Location; (c) Type; (d) Protrusion.

We prepared a questionnaire to obtain an expert opinion about the relevance of the risk factors in the analysis and the relative importance in modeling the risk of airport obstacles. The questions were chosen based on the Barroso and Correia (2014) questionnaire. The

questionnaire begins with questions about the specialist's level of education, position/occupation, and experience in aviation and airports. We collected this information to verify the specialist's level of knowledge and interpret the answers. The participation of specialists with a high level of knowledge is essential to preserve the accuracy of their information (Barroso and Correia 2014).

Next, to verify the relevance of these factors in risk modeling, we asked the expert about the importance of these factors in assessing the risk of airport obstacles to point out the relevance of each factor in the analysis. The expert understood that all the risk factors are essential, pointing to the protrusion as highly relevant and the others as very relevant to study the risk of airport obstacles.

From this, we divided each risk factor into classes and asked the expert about the likelihood or the dangerousness of each class, considering the safety and regularity of air operations. For the assessment of the classes, the expert used a scale from 1 to 5, in which number 1 represents "very unlikely/very little dangerous" and number 5 "extremely likely/dangerous."

Lastly, we asked the expert to compare the risk factors to determine their relative importance. We organized the factors in pairs ( $i, j$ ), as proposed by the AHP, and the expert compared the factors using Saaty's fundamental scale (Table 1). To simplify the expert's judgments and avoid inconsistency, we did not use the fundamental scale's intermediate values (Barroso and Correia 2014).

**Table 1: Saaty's fundamental scale**

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective.
3	Moderate importance	Experience and judgment slightly favor one activity over another.
5	Strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another.
7	Very strong importance	An activity is very strongly favored over another; its dominance is demonstrated in practice.
9	Extreme importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation.
Reciprocals of the above non-zero numbers	If activity $i$ has one of the above non-zero numbers assigned to it when compared with activity $j$ , then $j$ has the reciprocal value when compared with $i$	A reasonable assumption.
2, 4, 6, 8	Intermediate values between the two adjacent judgments	When intermediate values are needed.
1.1 – 1.9	If the activities are very close	It may be difficult to assign the best value but when compared with other contrasting activities the size of the small numbers would not be too noticeable, yet they can still indicate the relative importance of the activities.

**Source:** Adapted from Saaty (1984, 2008).

We organized the comparison results in a reciprocal matrix  $A_{n \times n}$  in which we associated the rows and columns with the risk factors. After constructing the pairwise comparison matrix  $A_{n \times n}$ , we extracted the relative importance of the factors to obtain the weight of each factor in the risk classification model. Thus, we calculated the priority vector, which is a normalized principal eigenvector of the matrix  $A_{n \times n}$ , given by expression (1):

$$w = (w_1, \dots, w_n)^T \quad (1)$$

As the AHP allows inconsistencies in judgments, there is a particular concern with measuring these inconsistencies. The consistency index of a pairwise comparison matrix is used as a measure of the consistency deviation and represents the variance of the error incurred in estimating  $a_{ij}$  (Saaty and Vargas 2012). Expression (2) defines the consistency index (*C.I.*):

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (2)$$

where  $\lambda_{\max}$  is the largest eigenvalue of the matrix  $A_{n \times n}$  and  $n$  is the number of factors assessed.

Through simulations of random reciprocal matrices of different orders, we established the average consistency indices, known as random indices (*R.I.*), using Saaty's fundamental scale, according to Table 2 (Saaty 1984, Saaty and Vargas 2012).

**Table 2: Average random consistency index (*R.I.*)**

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>R.I.</i>	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

**Source:** Adapted from Saaty and Vargas (2012).

The ratio between *C.I.* and *R.I.* is called the inconsistency/consistency ratio (*C.R.*) (Saaty 1984, Saaty and Vargas 2012). According to Saaty (1984), the idea of consistency is a central concern in all analyzes. Inconsistency allows us to readjust a judgment system to receive new data, but we must admit it without dominating or confusing consistency. Values of the order of 0.10 for *C.R.* are considered acceptable; for values higher than this, revisions in the judgments are recommended (Saaty and Vargas 2012). An inconsistency of up to 10% means that the adjustment is minor compared to the eigenvalue entries' actual values (Saaty and Vargas 2012). Thus, the pairwise comparison matrix will be entirely consistent when it has a *C.R.* equal to zero, that is when the specialist's judgments are entirely consistent (Vasconcelos and Mota 2014).

## 2.2 Improving the consistency of the pairwise comparison matrix

The AHP allows for inconsistency since, in making judgments, individuals tend to be more cardinally inconsistent than consistent. This fact occurs because individuals are unable to estimate measurement values accurately, even using a known scale. Such estimates become even more complicated when individuals deal with intangible and ordinarily intransitive

comparisons (Saaty and Vargas 2012). When dealing with objective comparisons, a pairwise comparison matrix can be perfectly consistent but irrelevant and deviated from true values. For many reasons, a minimum of inconsistency can be considered good, and forced consistency, without knowledge of the exact values, is an undesirable compulsion (Saaty and Vargas 2012).

Considering that judgments can be inconsistent, Saaty and Vargas (2012) proposed methods to improve a pairwise comparison matrix's consistency. We used two methods to identify where the inconsistency is.

According to the first method proposed by Harker, for positive reciprocal matrices, to identify an entry of  $A$  whose adjustment would result in the highest rate of variation of  $\lambda_{\max}$ , we must examine the values resulting from expression (3):

$$\frac{\partial \lambda_{\max}}{\partial a_{ij}} = v_i w_j - a_{ji}^2 v_j w_i, \quad i > j, \quad (3)$$

with  $v$  being the eigenvector of the matrix  $A^T$ ; i.e., we must evaluate all elements of the upper triangle of the matrix, the  $n(n-1)/2$  comparisons, and then select the highest absolute value. Thus, we change the matrix entry associated with this highest absolute value (Saaty and Vargas 2012).

The idea of Harker's method is to find the element that causes the largest variation in the  $\lambda_{\max}$ , based on the analysis of the partial derivative matrix and modifying the value of the element of the original matrix, that is, reviewing this judgment in the pairwise comparison matrix (Wolff 2008). We can repeat the process until achieving the desired *C.R.* If the judgments indicated cannot be changed completely, we can partially change them according to the specialist's understanding (Saaty and Vargas 2012).

Another method used to improve the consistency of a pairwise comparison matrix suggests the analysis of a disturbance matrix, defined by expression (4):

$$\gamma_{ij} = a_{ij} \times \frac{w_j}{w_i} \quad (4)$$

Thus, we analyze the entry  $a_{ij}$  that has the highest value of  $\gamma_{ij}$  and see if that entry can be reasonably smaller. Such a change in  $a_{ij}$  is also expected to result in a new pairwise comparison matrix with a lower associated principal eigenvalue (Saaty and Vargas 2012).

Harker demonstrated that when calculating the new eigenvector  $w$ , after changing the entry  $i,j$ , it is desired for the new entry  $i,j$  to be equal to  $w_i/w_j$  and the value of the reciprocal entry to  $a_{ij}$  to be equal to  $w_j/w_i$  (Saaty and Vargas 2012). The eigenvector of the last matrix is then taken as the priority vector  $w$  and the known values of  $w_i/w_j$  and  $w_j/w_i$  are used to replace the values of the entry  $a_{ij}$  and its reciprocal in the matrix. Saaty and Vargas (2012) suggest that the divisions' values should be rounded to the nearest integer of Saaty's fundamental scale. The specialist is then asked to change his judgment to the suggested value of  $a_{ij}$  as much as possible. If the specialist does not want to change the original value of that entry, we considered the second most inconsistent judgment and repeated the process.

In summary, this method finds the element of the pairwise comparison matrix that causes the greatest disturbance in the consistency of the matrix and suggests changes for this judgment and its reciprocal. Also, it suggests new values for the entry and in its reciprocal that will result in a matrix consistent with  $C.R. < 0.10$ . The elements that have some disturbance are those with  $\gamma_{ij} > 1$ . Therefore, it is desired to find the element whose value is the farthest from one and verify whether it and its reciprocal can be changed in the original matrix (Wolff 2008).

### 2.3 Obstacle risk classification model

We developed the obstacle risk classification model present in aerodrome protection zones according to the risk factors and their respective weights. Thus, the risk of obstacles ( $RI$ ) is given by expression (5):

$$RI = (w_1 F_1) + (w_2 F_2) + \dots + (w_n F_n), \quad (5)$$

with  $w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$ ,  $w_i$  representing the weights of each risk factor and  $F_i$  representing the risk factors considered in the analysis.

Expression (5) shows that the greater the weight of a risk factor, the greater the influence of this factor in obstacle risk modeling. The values obtained for  $RI$  vary according to the risk scale adopted to assess the classes of risk factors.

In this study, we adopted a scale of 1 to 5 to analyze the factors' classes, in which number 1 means "very unlikely/very little dangerous" and number 5 means "extremely likely/dangerous." So, values of  $RI$  close to 1 represent obstacles that are less dangerous and less likely to compromise air safety. On the other hand, values of  $RI$  close to 5 represent more dangerous obstacles, with a high probability of compromising the safety and maintenance of the airport's air operations.

## 3. Results

### 3.1 Questionnaire results

We organized the results of the expert's judgments in the pairwise comparison matrix presented in Table 3. The comparisons made for each pair of risk factors provided the  $a_{ij}$  entries for the matrix. According to the AHP, comparisons give a unit diagonal when comparing a risk factor to itself. As the pairwise comparison matrix is reciprocal, the values below the unit diagonal are reciprocal and obtained indirectly:  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ . We present the questionnaire with the expert's answers in Appendix.

**Table 3: Pairwise comparison matrix**

Risk factors ( $F_i$ )	Distance	Location	Type	Protrusion
Distance	1	3	5	1/3
Location	1/3	1	9	1/3
Type	1/5	1/9	1	1/3
Protrusion	3	3	3	1

Table 3 shows that the expert considered moderately more important the distance between the obstacle and the nearest runway threshold than the obstacle location. Furthermore, he/she considered the distance strongly more important than the nature of the obstacle. The obstacle location was considered highly more important than the nature of the obstacle. On the other hand, how much each obstacle protrudes the limiting surfaces is moderately more important than the distance, location, and type of the obstacle in risk modeling.

After calculating the principal eigenvalue, we evaluated the consistency of the results by calculating the consistency index ( $C.I.$ ) and the inconsistency ratio ( $C.R.$ ) of the matrix. Thus, for this pairwise comparison matrix, were obtained  $C.I.=0.255$  and  $C.R.=0.287$ . This fact means that the matrix is inconsistent and the judgments matrix should be reviewed when  $C.R.$  values are greater than 0.10. Before interviewing the expert again, we improved the pairwise comparison matrix's consistency to identify which judgment was causing the largest perturbation in the matrix consistency.

### 3.2 Consistency of the pairwise comparison matrix

Initially, we implemented Harker's method, which consists of finding the entry that results in the largest rate of change in  $\lambda_{\max}$  of the pairwise comparison matrix, based on the analysis of the partial derivatives of the judgments matrix. For this method, in addition to the priority vector  $w$ , the eigenvector of the matrix  $A^T$ , called  $v$ , was calculated. We replaced the values of  $n$ ,  $A$ ,  $w$  and  $v$  in expression (3) and obtained the matrix of the partial derivatives for the judgments matrix, as shown in Table 4.

**Table 4: Partial derivatives matrix**

Risk factors ( $F_i$ )	Distance	Location	Type	Protrusion
Distance	0	0.0182703	-0.0003432	-0.159285
Location	0	0	0.0089113	-0.0761709
Type	0	0	0	<b>0.2354559</b>
Protrusion	0	0	0	0

Looking at Table 4, we noted that the (3, 4) entry of the matrix of the partial derivatives, in bold, has the largest absolute value. Therefore, according to Harker's method, we must review the relative importance between the factors type and protrusion.

After, we used another method to improve the matrix consistency based on the analysis of the perturbation matrix. The entries that have some perturbation about ones of a consistent matrix are those with  $\gamma_{ij} > 1$ . We used the expression (4) to obtain the perturbation matrix, shown in Table 5.

**Table 5: Perturbation matrix**

Risk factors ( $F_i$ )	Distance	Location	Type	Protrusion
Distance	1	2.1929501	1.0579215	0.5157343
Location	0	1	<b>2.6050642</b>	0.7055349
Type	0	0	1	2.4374884
Protrusion	0	0	0	1

Table 5 shows that the (2, 3) entry of the perturbation matrix, in bold, is the one with the largest perturbation. Thereby, the expert must review the judgment related to this entry in the pairwise comparison matrix by rethinking the relative importance between location and type. Besides identifying the judgment that should be reviewed, this method suggests the most consistent value for the identified position. The method suggested changing the value of the entry (2, 3) and its reciprocal entry (3, 2) to 1, considering the factors location and type of equal importance in the risk modeling of obstacles to airports.

### 3.3 Modified pairwise comparison matrix

Considering the methods for reviewing the judgments, we noted that the expert initially assessed the location factor as hugely more important than the type factor. Also, Wang, Hu and Tao (2004) considered the location factor strongly more important than the type factor. Therefore, we understood that the answer of the second method to consider location and type factors of equal importance did mathematician sense, but it might not match reality.

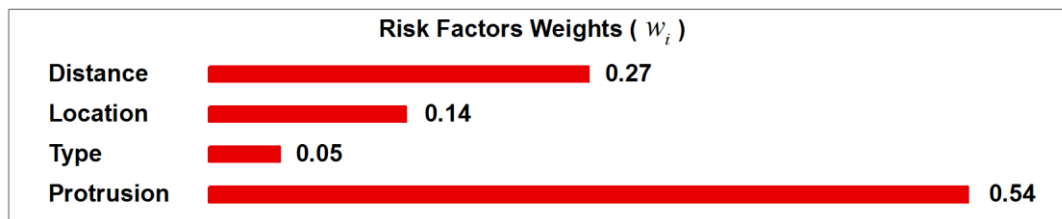
We interviewed the expert again and suggested a reassessment of the judgments identified by both methods. We proposed changes in the values of the entries (3, 4) and (2, 3) and their reciprocals entries in the pairwise comparison matrix of Table 3. To avoid the new values return another inconsistent matrix, we suggested that the expert change these values to 1/9 and 3, respectively. We recommended the value 3, moderately more important on Saaty's fundamental scale, because it is between the one suggested by the method and the value adopted by Wang, Hu and Tao (2004), and the value 1/9, which means extremely less important on the Saaty's fundamental scale, because it was the value adopted by Wang, Hu and Tao (2004).

We obtained a new pairwise comparison matrix (Table 6) with the expert's acquiescence for the suggested changes. After calculating the principal eigenvalue of the last matrix, we evaluated its consistency by recalculating the indexes  $C.I.$  and  $C.R.$ . This time, the matrix was consistent with  $C.I. = 0.038$  and  $C.R. = 0.043$ , matching a 4.3% inconsistency in the judgments. According to AHP, this means that the adjustment is smaller than the eigenvalue entries' actual values.

**Table 6: Modified pairwise comparison matrix**

Risk factors ( $F_i$ )	Distance	Location	Type	Protrusion
Distance	1	3	5	1/3
Location	1/3	1	3	1/3
Type	1/5	1/3	1	1/9
Protrusion	3	3	9	1

After normalizing the principal eigenvector of the consistent matrix, we obtained the priority vector  $w$  with the weights of each risk factor. Figure 4 shows that the protrusion factor had the highest weight (0.54 or 54%), followed by distance (27%), location (14%), and type (5%).



**Figure 4:** Risk factors weights.

### 3.4 Obstacle risk classification model

In this paper, we modeled obstacles risk ( $RI$ ) from the definition of the risk factors and their weights. Initially, we divided the risk factors into classes, and the expert assigned risk scores to each class, as summarized in Table 7.

**Table 7: Classes of the risk factors and risk scores**

Risk scores	Extremely likely or dangerous 5	Very likely or dangerous 4	Likely or Dangerous 3	Unlikely or Little dangerous 2	Very unlikely or Very little dangerous 1
Distance	0 to 300m	300 to 1,000m	1,000 to 5,000m	5,000 to 10,000m	> 10,000m
Location	Approach Surface	Inner Horizontal Surface	Transitional Surface	Conical Surface	Outer Horizontal Surface
Type	Poles, Antennas, and Towers	Relief and Buildings		N/A	
Protrusion	> 4.5m	3.1 to 4.5m	0 to 3.0m		N/A



Table 7 indicates that any obstacle type had a risk score of more than three; relief and buildings are considered very dangerous obstacles; poles, antennas, and towers are considered extremely dangerous. Any obstacles that protrude the limiting surfaces had not a risk score of less than three and probably will compromise the safety and regularity of air operations at the airport. Obstacles inserted in the approach surface and inner horizontal surface within a radius of approximately 1km from the runway thresholds of the airports are very or extremely dangerous to airspace safety.

Based on the expert's analysis, with the risk factors definition and the risk scores assignment to the classes, and the AHP, with the determination of the weight of each risk factor, we replaced the  $F_i$  and  $w_i$  values in expression (5), as follows:

$$RI = (0.27 \times Distance) + (0.14 \times Location) + (0.05 \times Type) + (0.54 \times Protrusion) \quad (6)$$

In expression (6) the protrusion factor has the most significant influence in modeling obstacles risk. Therefore, the more an obstacle protrudes the limiting surfaces, the more dangerous the obstacle will be, and more significant will be the likelihood of that obstacle compromising the safety of air operations. The distance and location factors influence the risk assigned to obstacles, but with less intensity when compared to the protrusion factor. On the other hand, the type factor does not significantly influence risk modeling because any obstacle that protrudes the limiting surfaces will most likely compromise airspace safety. However, learning the nature of the obstacle that poses risk is essential for adopting proper risk mitigation actions. So, despite the type having the lowest weight among the considered factors, this risk factor improves the proposed model and is relevant for the analysis, confirming what was pointed out by the expert, who considered this factor very relevant in analyzing the obstacles risk. Finally, considering the risk scores assigned to classes of the risk factors (Table 7), **RI** values between 4 and 5 signal very or extremely dangerous obstacles, with a high probability of compromising the safety and maintenance of air operations at airports.

## 4. Discussion

The inconsistent result obtained for the first pairwise comparison matrix indicates the need to make adjustments to the questionnaire for future researches. In this work, we were concerned to prepare an impartial questionnaire, not to influence the expert's statements. It is possible to make the questionnaire clearer to the interviewee to minimize inconsistencies in future researches. Also, the questionnaire could be applied to a more significant number of specialists to get redundancy of information, assisting in resolving inconsistencies. However, we emphasize that specialists with a high level of knowledge are essential for maintaining the accuracy of the information collected. In addition to these, we can use the AHP together with the fuzzy logic to modeling the uncertainties of the specialist's judgments and verify the improvement of the model.

The evaluation of the pairwise comparison matrix's consistency is essential to obtain a model close to reality. In the judgment-making process, individuals are more likely to be inconsistent, so that we can expect an inconsistent pairwise comparison matrix. According to Saaty and Vargas (2012), the inconsistency allows readjusting a system of judgments to receive new data, but it must be admitted without dominating or confusing the consistency. Thus, through the

methods created to improve the consistency of positive reciprocal matrices, one can identify the judgment causing the largest perturbation in the matrix consistency. Both methods we used in this paper proved to be efficient, identifying the judgments that caused the largest perturbation in the matrix consistency. We obtained a consistent pairwise comparison matrix with the review of these judgments. However, we must observe the results of these methods with caution, evaluating their real meaning. Saaty and Vargas (2012) state that forced consistency is not desired because a pairwise comparison matrix can be perfectly consistent but irrelevant and far off reality. Given the initial assessment of the expert and the previous researches analyses, we understand that considering the location and type factors of equal importance, as suggested by the second method, made mathematical sense but did not match reality. We performed a new consultation with the expert, resulting in the modified and consistent pairwise comparison matrix.

The modified matrix provided the weights of the risk factors for the obstacle risk classification model. The protrusion factor has the highest weight, having the most considerable influence on risk modeling, and the type factor has not significantly influence risk modeling. However, the type factor improves the model because learning the nature of the obstacle that poses a risk to airspace safety is crucial for adopting risk mitigation actions. In this paper, we considered the relief, buildings, poles, and towers for the type factor. We chose these features mainly because we can rule their heights based on specific laws and because it is difficult to remove them. We can analyze the relief case using the urban city plots and assess their constructive viability. Other features that may also pose risks to the safety at airports are, for example, vegetation, trees, bridges, footbridges, and overpasses. We did not consider vegetation and isolated trees as obstacles because their pruning, removal, or transplantation is not relevant when compared to others features. We did not evaluate bridges, footbridges, and overpasses because the municipality laws impose the elevation limit. However, it is essential to consider such features in future researches. The research sequence consists of applying the proposed model to classifying the risk of obstacles in the protection zone of the Porto Alegre International Airport, quantifying and representing three-dimensionally the risk of these obstacles.

## 5. Conclusions

In this paper, we discussed the problem of modeling the risk of obstacles in aerodrome protection zones. We defined risk factors with associated risk scores and, through AHP, we determined the weights of the risk factors. The methodology proved to be valid for obtaining a model to classify the risk of obstacles in aerodrome protection zones, proving to be a valuable tool for use in aviation and airports.

The methodology applied gives a multicriteria decision process, assisted and systematic, using consistent risk classification criteria based on an explicit statement of the expert's subjective preferences. The advantage of the proposed methodology is that it can be adaptable for any airport and airspace laws considering the airport's geographic environment condition and their surrounding areas. However, the subjective biases of expert opinions are a limitation of our methodology.

Learning the risk of obstacles to airspace safety is essential to ensure an acceptable operational safety level at airports. Thus, the risk modeling of obstacles in aerodrome protection zones

should be used by airport managers to assess risk situations, assisting in the effective management of obstacles and approaches to risk mitigation actions for airspace operations.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brazil, for the scholarship to the first author (Process 133060/2019-5).

## AUTHOR'S CONTRIBUTION

All the authors contributed equally to make the writing of this paper possible, and all authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## REFERENCES

Audu, I. 2016. *Spatial analysis of the threat of potential aerodrome obstacles on flight safety operations, in Mallam Aminu Kano International Airport, Kano-Nigeria*. Masters dissertation. Ahmadu Bello University.

Barroso, L. F. and Correia, A. R. 2014. Risk assessment on runway safety areas: assessing the severity of accidents. In: ATRS (Air Transport Research Society), *18th Air Transport Research Society World Conference*. Bordeaux, France, 17-20 July 2014, Vancouver: ATRS.

Brasil, 2015. *Portaria Nº 957/GC3, de 09 de julho de 2015*. Dispõe sobre as restrições aos objetos projetados no espaço aéreo que possam afetar adversamente a segurança ou a regularidade das operações aéreas, e dá outras providências. Publicada no DOU nº 135, 17 julho 2015, Seção 1, p.6.

CGNA, 2020. *Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2020*. [online] Available at: <[http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario\\_estatistico/anuario\\_estatistico\\_2020.pdf](http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2020.pdf)> [Accessed 18 August 2021].

Correia, A. R. and Neto, J. A. R. 2014. Safety evaluation of runway safety areas: case study at major Brazilian airports. *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society*, 10(1), pp.25-36.

DECEA, 2019. *Planos de Zona de Proteção*. [online] Available at: <<http://servicos.decea.gov.br/aga/?i=planos>> [Accessed 23 September 2019].

FAA, 2021a. *PART 77—SAFE, EFFICIENT USE, AND PRESERVATION OF THE NAVIGABLE AIRSPACE*. [online] Available at: <[https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=0729b263e506b8443ebd13eabeeeee23e&mc=true&node=pt14.2.77&rgn=div5#\\_top](https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=0729b263e506b8443ebd13eabeeeee23e&mc=true&node=pt14.2.77&rgn=div5#_top)> [Accessed 16 August 2021].

FAA, 2021b. *Notification of Proposed Construction or Alteration on Airport Part 77*. [online] Available at: <<https://www.faa.gov/airports/central/engineering/part77/>> [Accessed 16 August 2021].

Falavigna, G. P., Iescheck, A. L. and Souza, S. F. 2020. 3D modeling to identify and quantify obstacles in aerodrome protection zone. *Bulletin of Geodetic Sciences*, 26(2), pp.1-12. doi: 10.1590/s1982-21702020000200009

Fortes, J. L. and Correia, A. R. 2012. Safety assessment at airports: São Paulo/Congonhas Airport – A case study. *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society*, 8(1), pp.29-42.

ICAO, 2009. *ICAO Doc 9859 Safety Management Manual (SMM)*. 2nd ed. Montreal: International Civil Aviation Organization.

ICAO, 2018. *ICAO Doc 9859 Safety Management Manual*. 4th ed. Montreal: International Civil Aviation Organization.

Medeiros, F. and Correia, A. 2010. The construction non-compliances of the runway systems in Brazilian airports regarding safety rules. In: WCTR (World Conference on Transport Research), *12th World Conference on Transport Research*. Lisbon, Portugal, 11-15 July 2010, Leeds: WCTRS.

OBSERVAPOA, 2021. *Porto Alegre e seus territórios*. [online] Available at: <<http://www.observapoa.com.br/>> [Accessed 18 August 2021].

Ozdemir, Y., Basligil, H. and Ak, M. F. 2016. Airport Safety Risk Evaluation based on Fuzzy ANP and Fuzzy AHP. In: *12th International FLINS Conference on Uncertainty Modeling in Knowledge Engineering and Decision Making (FLINS 2016)*. Roubaix, France, 24-26 August 2016, Singapore: World Scientific. doi: 10.1142/9789813146976\_0163

Parrish, C. E. and Nowak, R. D. 2009. Improved approach to LIDAR airport obstruction surveying using full-waveform data. *Journal of Surveying Engineering*, 135(2), pp.72-82. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9453(2009)135:2(72)

Pinelli, G. and Veracini, T. 2015. Remote sensing monitoring of changes potentially associated to obstacles to air navigation. In: IGARSS (International Geoscience and Remote Sensing Symposium), *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Milan, Italy, 26-31 July 2015, New York: IEEE.

Saaty, T. L. 1977. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), pp.234-281.

Saaty, T. L. 1984. The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments. In: R. Avenhaus, R. K. Huber, eds. *Quantitative Assessment in Arms Control*. Boston, MA: Springer, pp. 285-308. doi: 10.1007/978-1-4613-2805-6\_12

Saaty, T. L. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), pp.83-98.

Saaty, T. L. and Vargas, L. G. 2012. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. 2nd ed. Boston, MA: Springer. doi: 10.1007/978-1-4614-3597-6

Santos, F. A. B. and Müller, C. 2014. Sistema de Informações Geográficas no apoio ao gerenciamento de obstáculos à superfície de segmento visual. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 20(3), pp.504-525. doi: 10.1590/S1982-21702014000300029

Silva, A. C. S., Belderrain, M. C. N. and Pantoja, F. C. M. 2010. Prioritization of R&D projects in the aerospace sector: AHP method with ratings. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2(3), pp.339-348. doi: 10.5028/jatm.2010.02039110

---

Silva Junior, C. H. L. 2015. Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicados ao Zoneamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos: Uma Revisão. *Revista Monografias Ambientais (REMOA)*, 14(3), pp.42-58. doi: 10.5902/2236130818976

Souza, M. P. 2006. *Utilização de Lógica Fuzzy no Apoio à Decisão Multicritério*. Masters dissertation. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Vasconcelos, G. R. and Mota, C. M. M. 2014. Modelo multicritério de comparação par a par baseado no AHP: proposta de linearização do processo de comparação. In: SBPO (Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional), *XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Salvador, Brazil, 16-19 September 2014, Rio de Janeiro: SOBRAPO.

Wang, C., Hu, Y. and Tao, V. 2004. Identification and risk modeling of airfield obstructions for aviation safety management. In: ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), *XXth ISPRS Congress*. Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004, Hannover: ISPRS.

Wolff, C. S. 2008. *O método AHP – revisão conceitual e proposta de simplificação*. Masters dissertation. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse item serão apresentados os resultados alcançados com o estudo, bem como discussões quanto a sua aplicabilidade, suas potencialidades e limitações. Os resultados do primeiro artigo referentes à identificação e quantificação dos obstáculos correspondem aos lotes e às edificações da área de estudo, considerando o PBZPA do aeroporto aprovado em 2015. Como em setembro de 2016 o PBZPA do SBPA foi alterado, durante a pesquisa o modelo digital do PBZPA do aeroporto (MD-PBZPA) foi atualizado para o PBZPA aprovado em 2016 e a metodologia descrita no artigo para identificar e quantificar obstáculos foi reproduzida, incluindo no estudo a avaliação dos postes e das torres existentes na área de estudo.

O resultado do segundo artigo consiste em um modelo para classificação do risco de obstáculos presentes em zonas de proteção de aeródromos. Nesse item são apresentados os resultados obtidos com a aplicação desse modelo aos obstáculos identificados e o projeto cartográfico dos mapas resultantes.

O projeto cartográfico dos mapas foi desenvolvido para as representações 2D e 3D. Nos mapas que representam as altitudes de postes e torres (Figura 20), a primitiva gráfica utilizada foi o ponto, o nível de medida de razão e a variável visual luminosidade de cor (valor de cor). O mapa da viabilidade construtiva dos lotes (Figura 22) teve como primitiva gráfica a área, o nível de medida de razão e a variável visual luminosidade de cor. Para os mapas que representam lotes e edificações atingidos pelo PBZPA (Figuras 21 e 23), a primitiva gráfica utilizada foi a área, o nível de medida nominal e a variável visual tom de cor. A mesma solução foi aplicada às torres e aos postes atingidos pelo PBZPA (Figuras 24 e 25), porém com a primitiva gráfica ponto. E para os mapas de risco dos obstáculos (Figuras 27 e 28), as primitivas gráficas utilizadas foram o ponto e a área, o nível de medida ordinal e a variável visual luminosidade de cor.

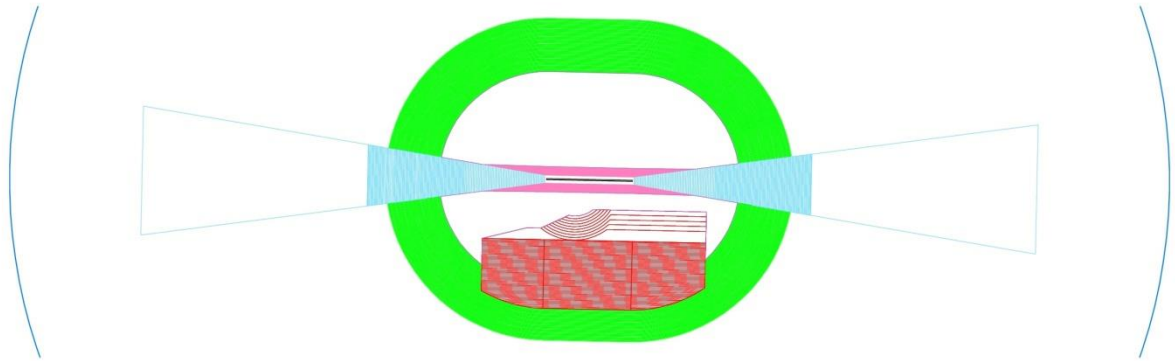
## 5.1 MD-PBZPA

Para a atualização do MD-PBZPA, primeiramente foi realizada a reprojeção da estrutura de dados digital do PBZPA para a projeção cartográfica TM-POA e o SGR SIRGAS2000, mesmo referencial dos demais dados geoespaciais, no *software* QGIS. A seguir, foram geradas as rampas das superfícies limitadoras do PBZPA no *software* AutoCAD Map 3D. Para isso, foi necessário interpretar concomitantemente a Portaria DECEA nº 260/ICA e a estrutura de dados digital do PBZPA.

A Portaria DECEA nº 260/ICA estabelece, define e delimita as superfícies limitadoras de obstáculos do Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho para os cenários atual e futuro (pós-ampliação da pista do aeroporto) e a estrutura de dados digital do PBZPA, armazenada no formato *dwg*, localiza espacialmente as superfícies limitadoras, apresentando o contorno dessas superfícies para ambos os cenários e informações como nome, elevação e gradiente das superfícies limitadoras. Nesse trabalho foi considerada apenas a configuração das superfícies limitadoras para o cenário futuro, visto que as obras de expansão da pista do aeroporto já estão ocorrendo.

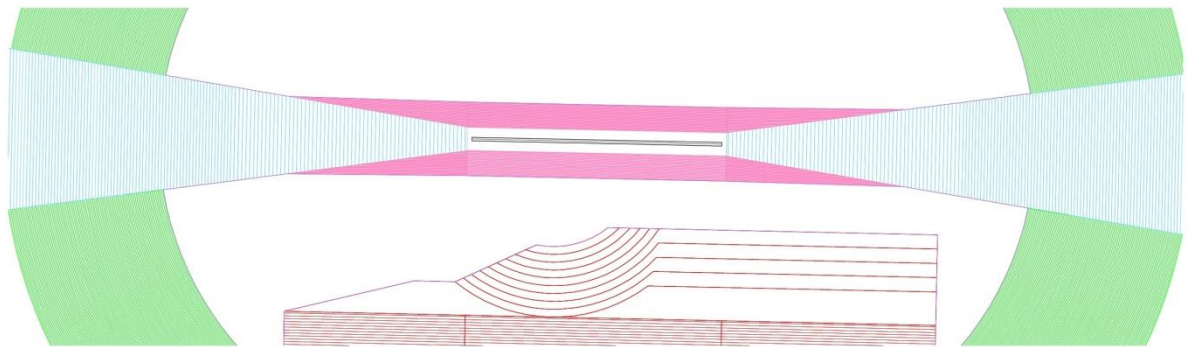
O anexo VI à Portaria DECEA nº 260/ICA incorporou uma superfície limitadora de obstáculos ao PBZPA do aeroporto chamada superfície limitadora de interesse público, requerida pela administração municipal de Porto Alegre (ICA, 2016). Essa superfície está localizada entre a superfície horizontal interna e a superfície cônica. Assim, as rampas das superfícies de aproximação, transição, cônica e da superfície limitadora de interesse público foram geradas, manualmente, na estrutura digital reprojeta da do PBZPA. Em seguida, o contorno das superfícies e das rampas foi convertido em polígonos. As Figuras 15 e 16 ilustram, respectivamente, as superfícies limitadoras de obstáculos com suas respectivas rampas e um detalhe das superfícies de aproximação (azul) e de transição (magenta), da superfície cônica (verde) e da superfície limitadora de interesse público (vermelho).

Figura 15 – Superfícies limitadoras de obstáculos com rampas.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 – Detalhe das superfícies de aproximação (azul) e de transição (magenta), da superfície cônica (verde) e da superfície de interesse público (vermelho).

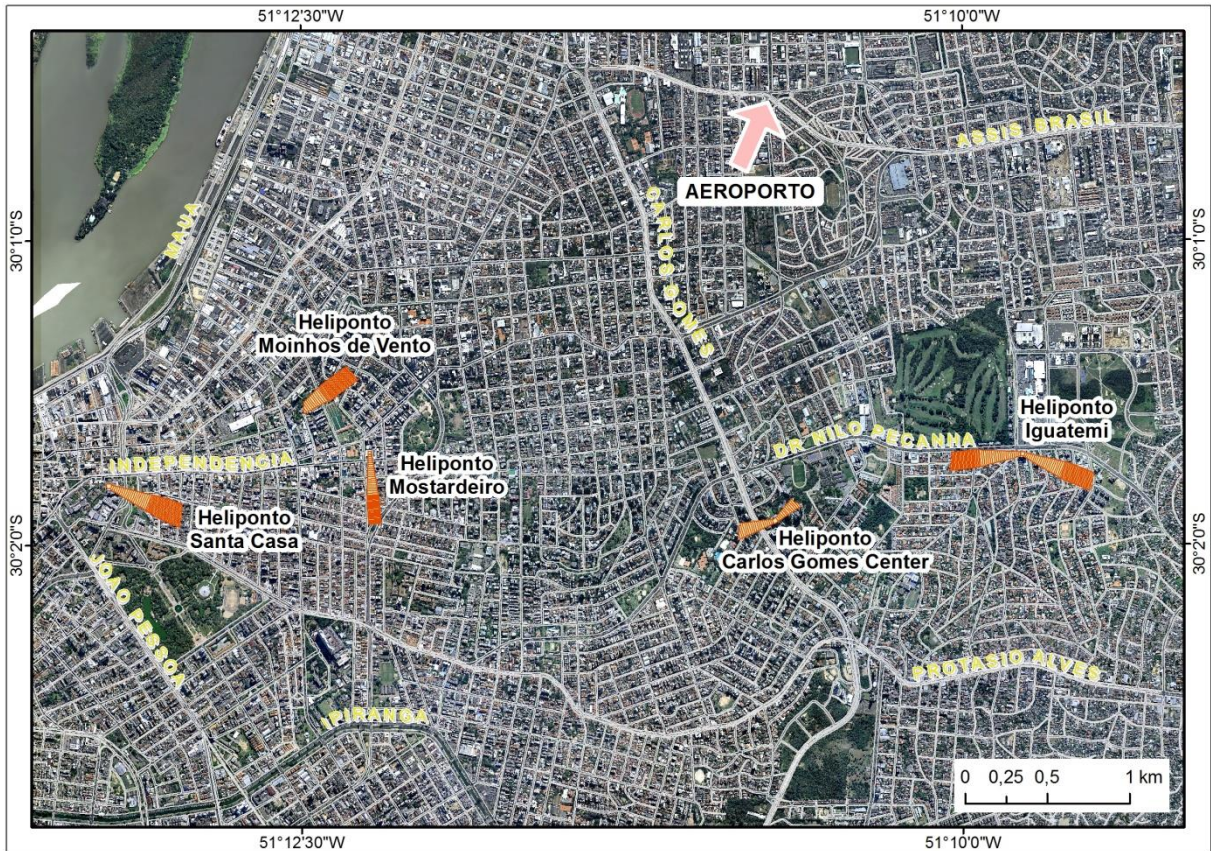


Fonte: Elaboração própria.

As restrições altimétricas dos PBZPH referentes aos cinco helipontos localizados dentro da área de estudo não foram consideradas na atualização do PBZPA, pois o objeto de estudo dessa pesquisa são os obstáculos do Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho. No entanto, destaca-se que as restrições altimétricas dos PBZPH podem ser maiores nas proximidades dos helipontos do que as restrições do PBZPA; quanto mais próximo do heliponto, maior é a restrição altimétrica, sendo que a diferença entre as altitudes permitidas por ambos os planos pode chegar a 60 metros. Nesse caso, vale a situação mais restritiva (BRASIL, 2015). A Figura 17 ilustra a localização dos helipontos e, em laranja, são representados os seus respectivos PBZPH.



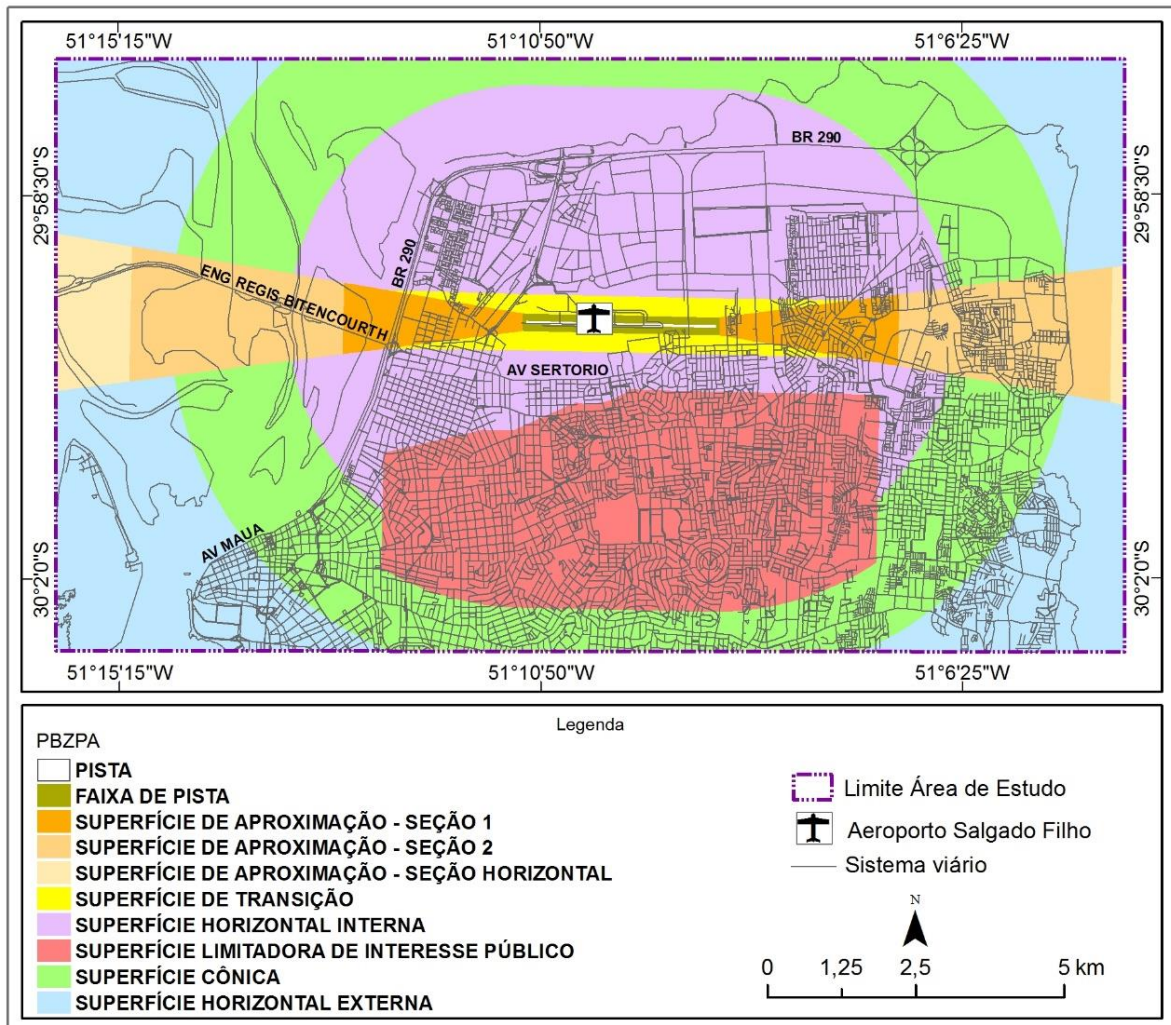
Figura 17 - Helipontos e seus PBZPH.



Fonte: Elaboração própria.

Após a elaboração das rampas nas superfícies limitadoras foi inserida a informação da altitude máxima permitida para os imóveis localizados dentro das superfícies, por meio da edição de tabela de atributos em ambiente SIG, utilizando o *software* ArcGIS (aplicativo ArcMap). Além da altitude máxima, foram inseridas, manualmente, as informações do nome da superfície limitadora e da legislação vigente. A Figura 18 ilustra o PBZPA do aeroporto aprovado em 2016.

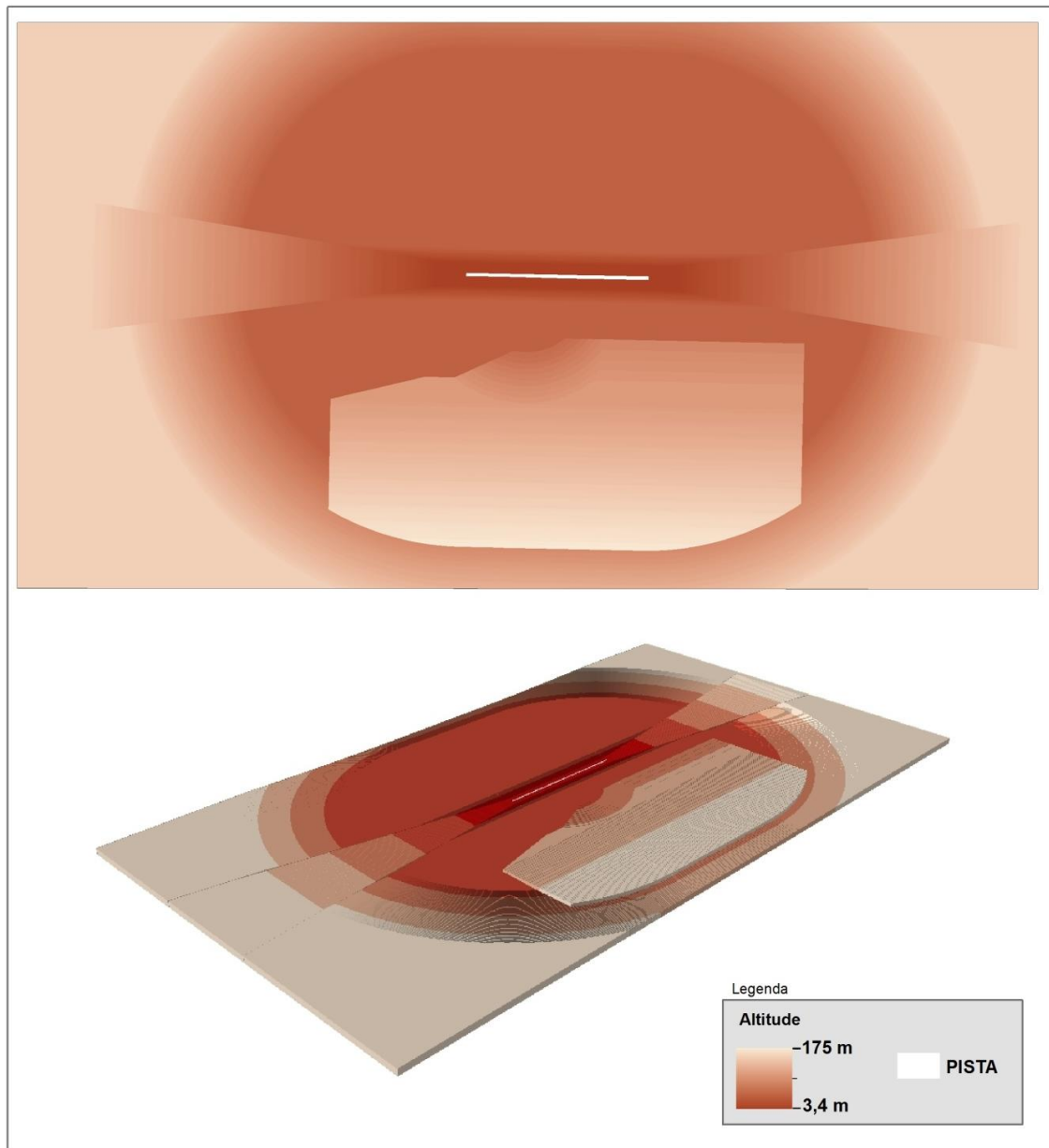
Figura 18 – PBZPA do Aeródromo Salgado Filho.



Fonte: Elaboração própria.

Para a atualização do modelo digital do PBZPA (MD-PBZPA) foi utilizada a ferramenta “*Rasterizar*” do *software* QGIS. Essa ferramenta possibilita a conversão da estrutura vetorial para a matricial, a partir da escolha de um atributo da estrutura de dados de entrada. A estrutura vetorial do PBZPA consistiu na estrutura de dados de entrada e o campo “ALTITUDE” foi o atributo escolhido. O resultado desse processamento foi o MD-PBZPA, representado na Figura 19, com resolução espacial de 1 (um) metro.

Figura 19 – Representações do MD-PBZPA.



Fonte: Elaboração própria.

A parte superior da Figura 19 ilustra uma representação 2D do MD-PBZPA e a parte inferior uma representação 3D. Na cor branca está representada a pista de pouso e decolagem do aeroporto e a altitude das superfícies limitadoras de obstáculos está representada numa escala de luminosidade de cor, na qual a menor luminosidade de cor representa a superfície limitadora mais restritiva ao uso e ocupação do solo em relação à altitude permitida dentro da superfície.

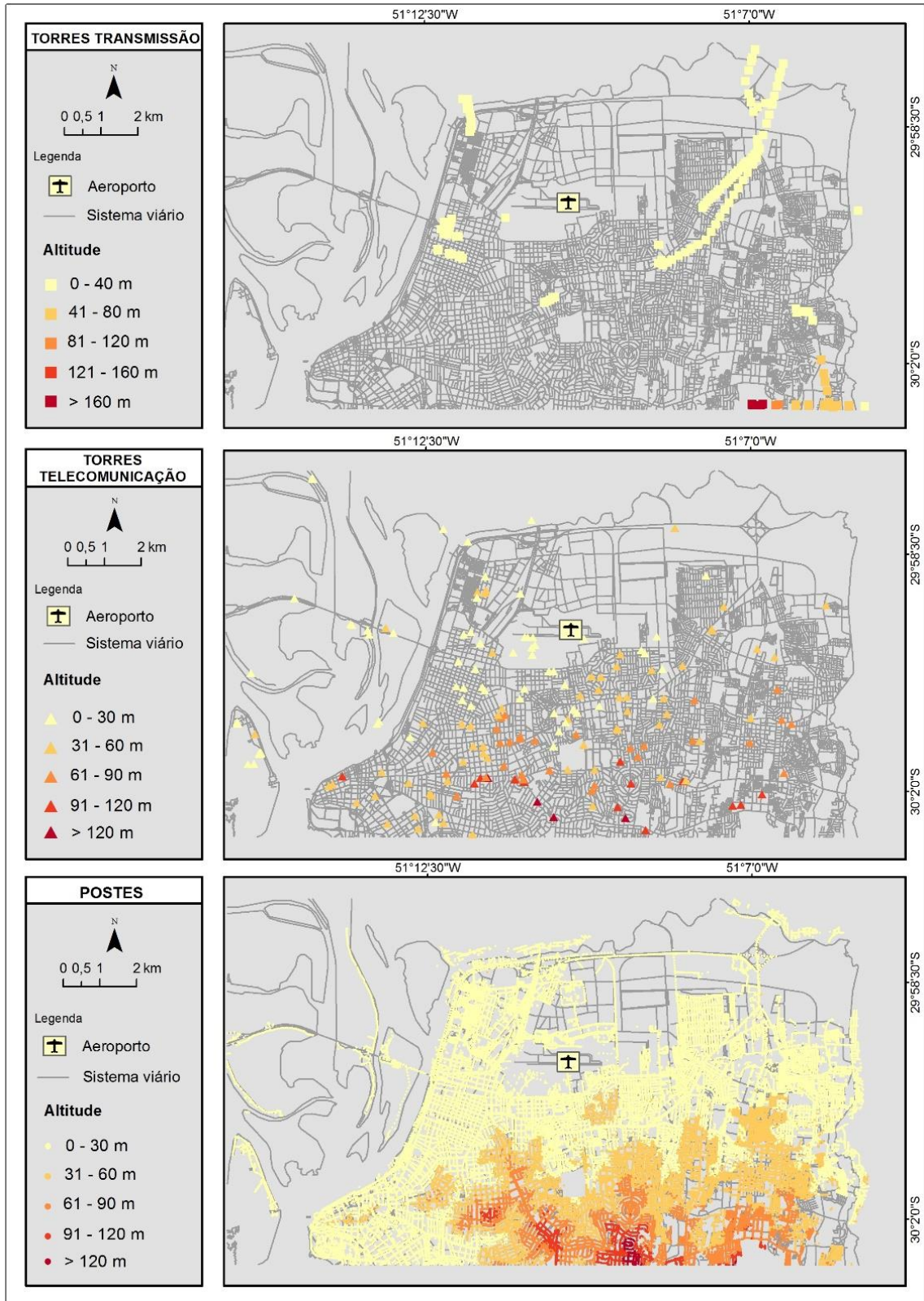
## 5.2 Altimetria postes e torres

Nesse estudo foram incluídos os postes e as torres na avaliação dos obstáculos. Assim, foi necessário atribuir informação altimétrica a essas feições. Para isso, foi feito primeiramente um mosaico das 39 estruturas matriciais do MDS, por meio da ferramenta “*Mosaic to New Raster*” do *software* ArcGIS (aplicativo ArcMap). Essa ferramenta agrupa várias estruturas matriciais em uma nova estrutura matricial de saída. O resultado desse processamento foi uma estrutura matricial que representa o MDS da área de estudo.

Após, por meio do mosaico do MDS e da ferramenta “*Extract Values to Points*” do *software* ArcGIS (aplicativo ArcMap), foi atribuída a informação altimétrica do MDS às feições. Essa ferramenta extrai o valor dos pixels da estrutura matricial com base em um conjunto de feições ponto e registra os valores da estrutura de dados matricial na tabela de atributos da estrutura vetorial de saída.

As estruturas vetoriais dos postes e das torres e a estrutura matricial do MDS consistiram nas estruturas de dados de entrada e, a partir desse processamento, foram obtidas as estruturas vetoriais dos postes e das torres em que cada feição tinha associado a informação altimétrica do MDS como um atributo. A Figura 20, a seguir, ilustra a altimetria dos postes e das torres.

Figura 20 – Representação da altitude dos postes e das torres.



Fonte: Elaboração própria.

Segundo a Figura 20, percebe-se que as torres e os postes com maiores altitudes concentram-se nas porções sul e sudeste da área de estudo, acompanhando o relevo da mesma. No entorno do aeroporto estão presentes as torres e postes de menores altitudes.

### **5.3 Identificação e quantificação de obstáculos**

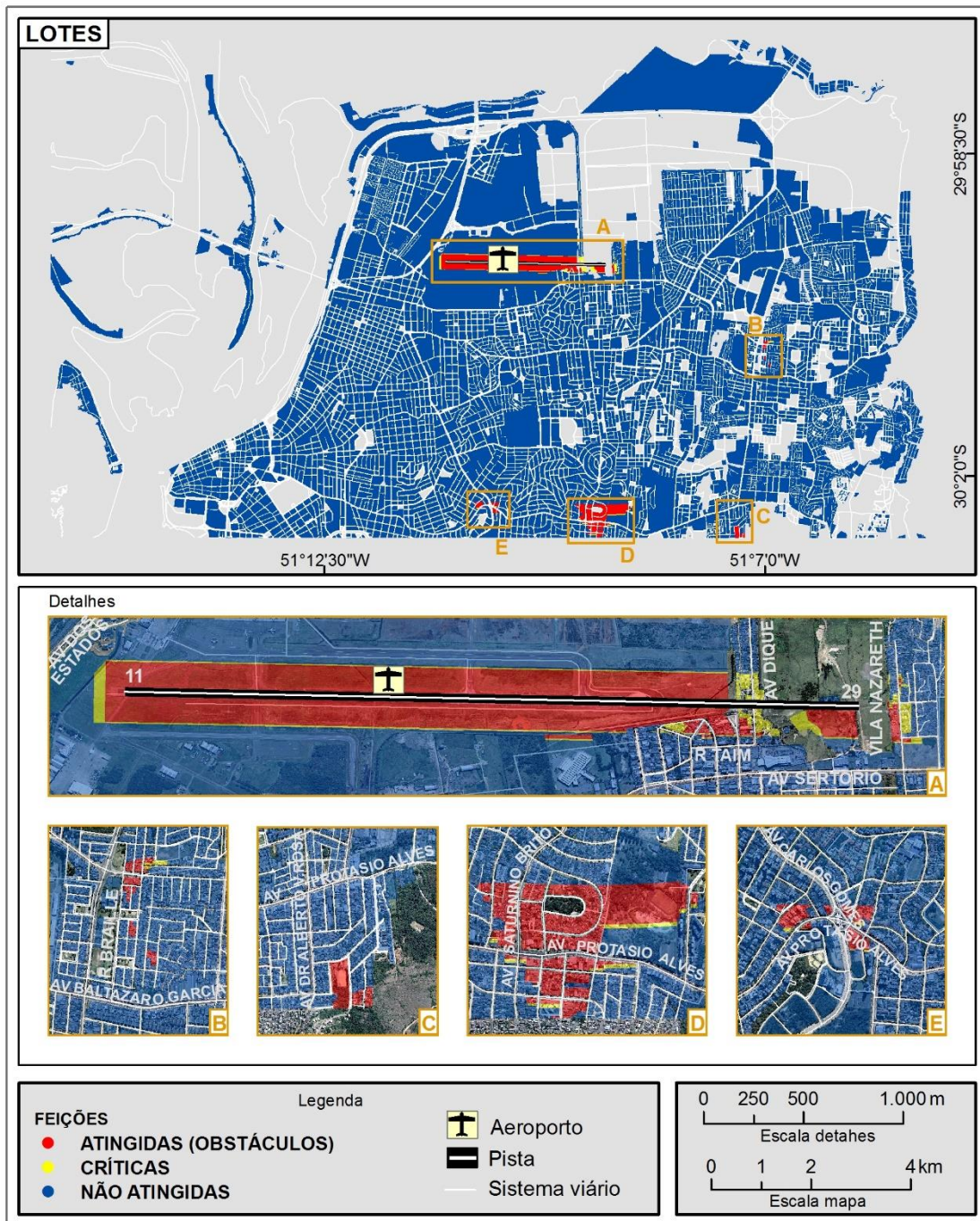
Para a identificação das feições consideradas obstáculos, considerando o PBZPA aprovado em 2016, a metodologia descrita no primeiro artigo foi reproduzida para os lotes e as edificações. Assim, as informações do PBZPA foram atribuídas aos lotes e às edificações por meio de intersecção geométrica: o PBZPA foi o nível identificador e os lotes e as edificações as feições a serem identificadas. Com isso, as informações do PBZPA passaram a constar na tabela de atributos das estruturas vetoriais dos lotes e das edificações e assim, a informação da altitude permitida pelo PBZPA ficou associada a cada lote e edificação.

No caso dos postes e torres, a associação da informação do PBZPA foi feita de forma semelhante ao realizado no processo de atribuição das altitudes do MDS às feições. Como os postes e as torres são representados pela primitiva geométrica de ponto na base cartográfica, a informação altimétrica do PBZPA foi atribuída por meio de extração direta do MD-PBZPA. Nesse processo, a informação do PBZPA também passa a constar na tabela de atributos das estruturas vetoriais dos postes e das torres e assim, a informação da altitude permitida pelo PBZPA fica associada a cada feição.

A identificação dos obstáculos ao aeroporto foi feita a partir da subtração das altitudes das superfícies do PBZPA pelas altitudes das feições. As feições que apresentam diferença negativa entre as altitudes são consideradas atingidas, isto é, são consideradas obstáculos ao aeroporto; àquelas que apresentam diferença nula são consideradas áreas críticas para construção civil (no caso dos lotes), para ampliação vertical (no caso das edificações), ou para mudança e atualização vertical de estruturas (no caso dos postes e das torres); por fim, àquelas que apresentam diferença positiva não são consideradas atingidas, ou seja, são áreas que permitem construção civil, ampliação vertical ou mudança e atualização vertical de estruturas. Assim como no primeiro artigo, as feições atingidas (obstáculos), críticas e não

atingidas foram organizadas em três categorias: vermelha, amarela e azul, respectivamente. A Figura 21, a seguir, ilustra os lotes críticos e atingidos pelo PBZPA.

Figura 21 – Lotes críticos e atingidos pelo PBZPA.



Fonte: Elaboração própria.

Comparando a Figura 21 com o resultado obtido no primeiro artigo para os lotes, nota-se que a mudança na legislação do espaço aéreo referente à alteração do PBZPA do aeroporto implicou a redução dos lotes considerados atingidos. Pela Figura 21, percebe-se que existem lotes atingidos na área do aeroporto, bem como nas suas proximidades, conforme o detalhe “A” da figura, e também nas porções leste e sul da área de estudo, segundo os detalhes “B”, “C”, “D” e “E” da mesma figura. Nota-se que as áreas atingidas são altamente densificadas e fundamentalmente residenciais, apresentando pontos comerciais próximos às avenidas.

Pelo detalhe “A” da Figura 21 nota-se que as áreas da pista e da faixa de pista do aeroporto são atingidas; isso ocorre, pois foi utilizada a altitude média dos lotes no cálculo da diferença entre as altitudes do PBZPA e dos lotes. A altitude média da pista e da faixa de pista do aeroporto, de acordo com o MDS, é aproximadamente 4,2 metros. Segundo o Anexo I da Portaria DECEA nº 260/ICA, que traz as características do aeródromo, a elevação atual do aeroporto é 3,4 metros, mesma altitude das cabeceiras 11 e 29 da pista. Após as obras de ampliação da pista, a elevação do aeroporto deverá ser igual a 3,7 metros, mesma altitude da nova posição da cabeceira 29. O detalhe “A” traz também os lotes críticos, atingidos e não atingidos, localizados na área de ampliação do aeroporto, que precisaram ser desapropriados ou que estão em processo de desapropriação, devido às obras de expansão do aeroporto; esses lotes correspondem àqueles localizados no entorno da Avenida Dique e da Vila Nazareth até a Rua Taim.

Conforme os detalhes “B”, “C”, “D” e “E” da Figura 21, existem lotes críticos e atingidos nas proximidades da Rua Braille com a Avenida Baltazar de Oliveira Garcia e da Avenida Protásio Alves com as Avenidas Dr. Alberto Vianna Rosa, Saturnino de Brito e Carlos Gomes, respectivamente. Os lotes atingidos ilustrados no detalhe “C” e os críticos e atingidos no detalhe “D” da referida figura localizam-se nas partes mais altas da área de estudo, com altitudes médias que variam de 103 a 171 metros.

Considerando a mudança do PBZPA, a quantificação dos lotes total e parcialmente atingidos foi refeita. Os resultados da diferença entre as altitudes do PBZPA e dos lotes (Tabela 3), em termos de número, área loteada e porcentagem, confirmam a redução dos obstáculos e de áreas críticas percebida na análise da



Figura 21. Quantitativamente, houve uma redução de 3,85% dos lotes atingidos e de 0,74% dos lotes considerados críticos.

Tabela 3 – Quantificação dos lotes atingidos e considerados críticos.

LOTES		106.838		69,68 km <sup>2</sup>	
	Total (T)	Parcial (P)	T + P	Área loteada	
Atingidos	597	114	711	0,66%	1,21 km <sup>2</sup> 1,74%
Críticos	121	143	264	0,25%	0,12 km <sup>2</sup> 0,17%

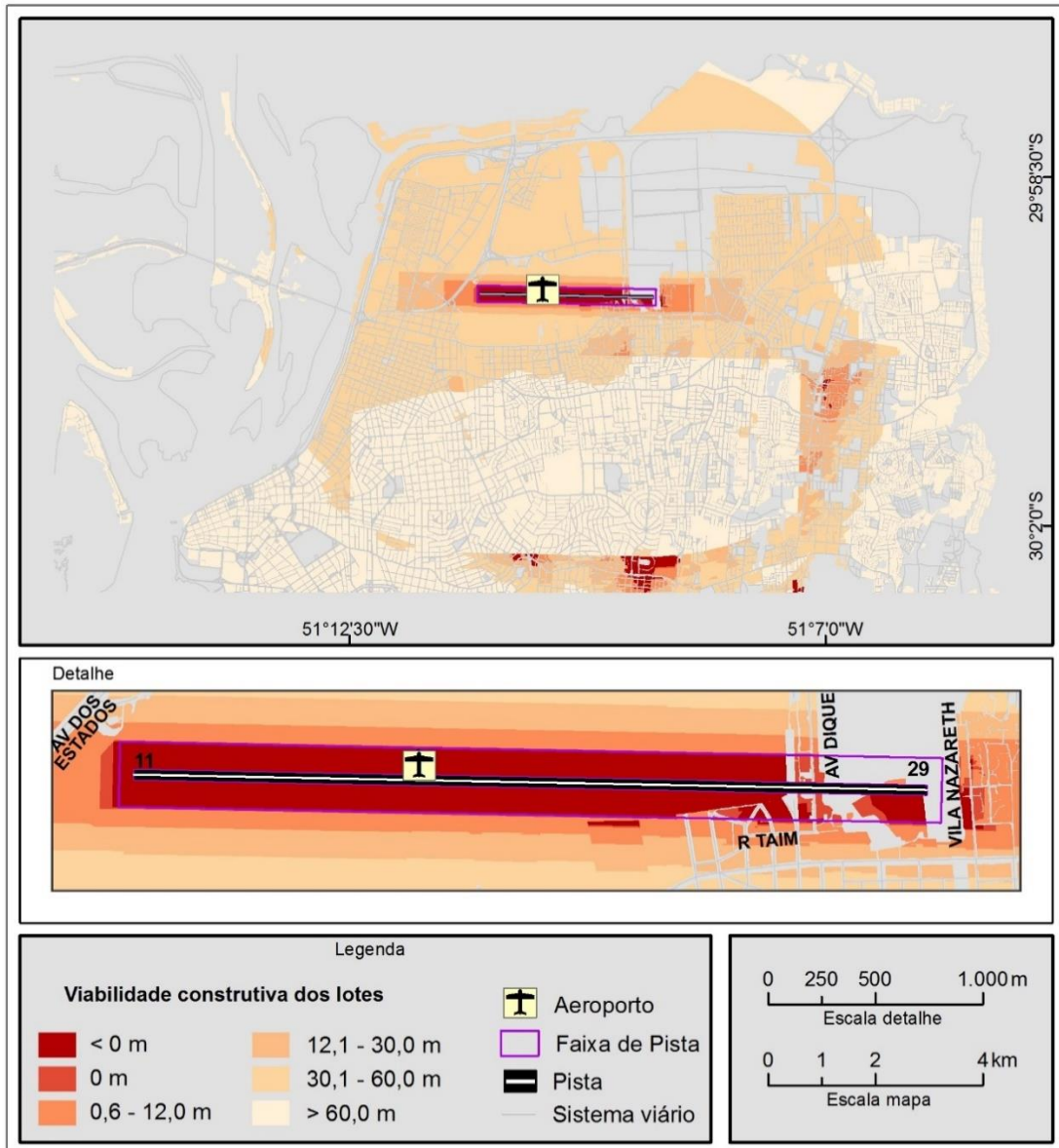
Fonte: Elaboração própria.

A partir da Tabela 3, percebe-se que do total de 106.838 lotes, 711 são atingidos, o que representa 0,66% dos lotes da área de estudo. Desses, 597 lotes são atingidos totalmente e 114 são parcialmente atingidos; isso corresponde a 1,74% da área loteada, ou seja, 1,21 km<sup>2</sup> de área que além de não possuir viabilidade construtiva, representa obstáculos ao aeroporto. Nota-se também que foram identificados 264 lotes críticos (0,25%), sendo 121 lotes totalmente críticos e 143 parcialmente críticos; isso corresponde a 0,12 km<sup>2</sup> (0,17%) de área loteada que não possui viabilidade construtiva. Além disso, os lotes inseridos na área de ampliação do aeroporto foram desapropriados e também não possuem viabilidade construtiva, são exemplos os lotes da Vila Dique e da Vila Nazareth e os lotes do entorno da Rua Taim. A maioria dos lotes atingidos está inserida nas superfícies cônica e horizontal interna e a maioria dos críticos está inserida na seção 1 da superfície de aproximação do PBZPA.

Considerando os lotes críticos, atingidos e não atingidos, elaborou-se uma representação da viabilidade construtiva dos lotes da área de estudo, segundo as restrições altimétricas impostas pelo PBZPA. Na Figura 22, a seguir, são representados em vermelho os lotes total e parcialmente atingidos pelo PBZPA, ou seja, são lotes ou frações destes que não permitem construção, pois a altitude do próprio terreno já ultrapassa o limite altimétrico imposto pelo PBZPA. Os lotes críticos são os que apresentam viabilidade construtiva zero (0 m), isto é, são lotes que também não permitem edificação, pois a altitude do terreno já corresponde ao limite altimétrico imposto pelo PBZPA. Ressaltam-se os lotes inseridos na faixa de

pista do aeroporto, detalhe da Figura 22, que não permitem edificação independente da altura.

Figura 22 – Viabilidade construtiva dos lotes.

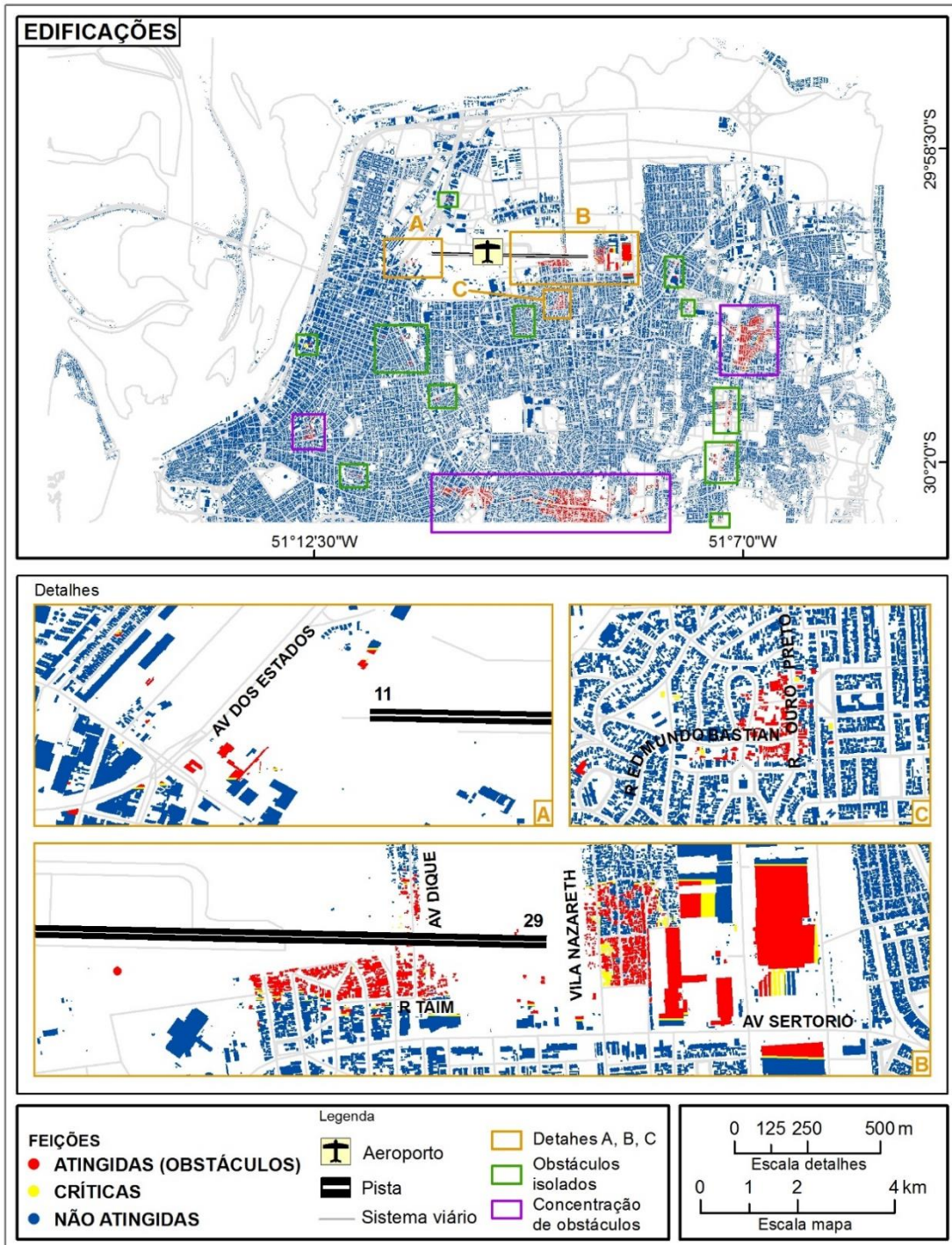


Fonte: Elaboração própria.

Nota-se pela Figura 22 que no entorno do aeroporto são permitidas edificações que variam de 0,6 a 60 metros de altura; isso significa que considerando o limite altimétrico imposto pelo PBZPA e um pé-direito mínimo de 2,60 metros para edifícios residenciais, de acordo com o estabelecido no Código de Edificações de Porto Alegre (PORTO ALEGRE, 2001), poderiam ser aceitos no entorno do aeroporto edifícios de 1 (um) a 20 (vinte) pavimentos, aproximadamente.

Na sequência é apresentada a Figura 23 que ilustra as edificações críticas e atingidas pelo PBZPA. De acordo com a Figura 23, nota-se uma redução das edificações consideradas obstáculos ao aeroporto, considerando a mudança na legislação, referente ao PBZPA do aeroporto.

Figura 23 – Edificações críticas e atingidas pelo PBZPA.



Fonte: Elaboração própria.

Os retângulos verdes da Figura 23 apontam a existência de edificações atingidas de forma isolada, ou seja, uma edificação é considerada obstáculo e as edificações de seu entorno não. Nesse caso, é importante uma avaliação *in loco* da edificação e de seu entorno para verificar a altitude da edificação considerada obstáculo. Os retângulos roxos marcam a existência de uma concentração de edificações atingidas em uma localidade. Nota-se que essas concentrações estão localizadas nas partes leste, sul e sudoeste da área de estudo. Conforme os detalhes “A”, “B” e “C”, percebe-se que há edificações críticas e atingidas próximas ao aeroporto. O detalhe “A” traz as edificações total e parcialmente críticas e atingidas localizadas próximas à cabeceira 11 da pista do aeroporto. Dessas, cinco edificações pertencem ao aeroporto. Destacam-se também as edificações do estabelecimento Boulevard Laçador, total e parcialmente atingidas, e a edificação do Posto Ipiranga, totalmente atingida. O detalhe “B” ilustra as edificações críticas e atingidas localizadas próximas à cabeceira 29 da pista do aeroporto, pós-ampliação da mesma. As edificações inseridas na área de ampliação do aeroporto, correspondentes às localizadas no entorno da Avenida Dique até a Rua Taim, foram removidas devido às obras de expansão do aeroporto. Destaca-se a presença de edificações críticas e atingidas na Vila Nazareth e apontam-se os estabelecimentos do Big Sertório, mais de 90% atingido, e do Atacadão, parcialmente atingido, bem como os comércios próximos total e parcialmente atingidos. Por fim, o detalhe “C” da Figura 23 ilustra as edificações críticas e atingidas localizadas próximas ao aeroporto, no entorno das ruas Ouro Preto e Edmundo Bastian. A maioria dessas edificações são edifícios residenciais, inseridos na superfície horizontal interna do PBZPA.

Assim como os lotes, a quantificação das edificações total e parcialmente atingidas foi refeita. Os resultados da diferença entre as altitudes do PBZPA e das edificações (Tabela 4), em termos de número, área edificada e porcentagem, apontam uma redução de edificações consideradas obstáculos e críticas, de acordo com a mudança da legislação. Quantitativamente, houve uma redução de 9,66% das edificações atingidas e de 0,73% das edificações consideradas críticas.

Tabela 4 – Quantificação das edificações atingidas e consideradas críticas.

EDIFICAÇÕES	200.573		27,86 km <sup>2</sup>			
	Total (T)	Parcial (P)	T + P		Área edificada	
Atingidas	6707	334	7041	3,51%	0,87 km <sup>2</sup>	3,12%
Críticas	280	402	682	0,34%	0,07 km <sup>2</sup>	0,25%

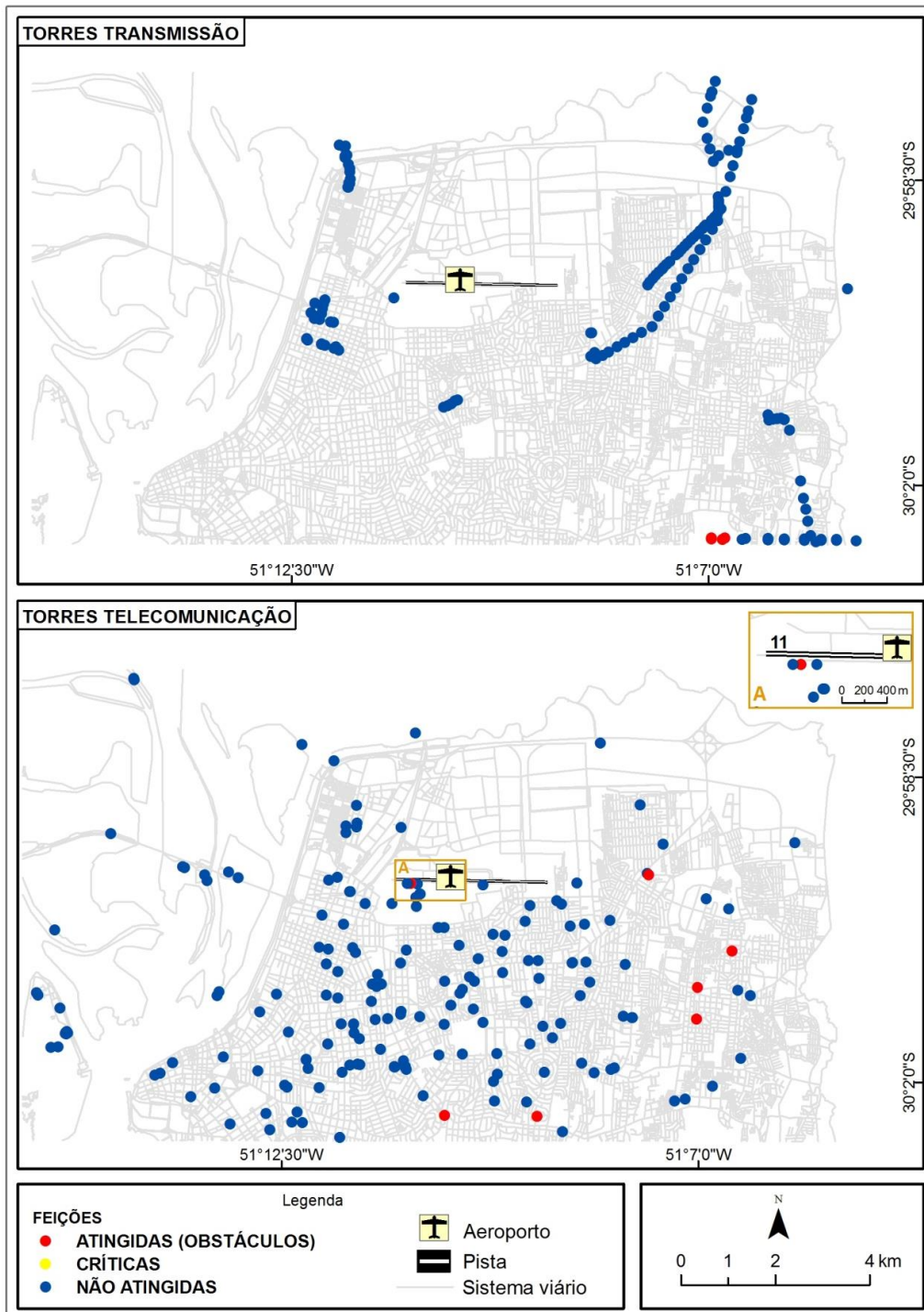
Fonte: Elaboração própria.

Considerando as edificações, foram identificadas 7.041 atingidas, que representam 3,51% das edificações da área de estudo. Dessas, 6.707 edificações são totalmente atingidas e 334 são atingidas de forma parcial; isso representa 3,12% da área edificada, ou seja, 0,87 km<sup>2</sup> de obstáculos ao aeroporto. Pela Tabela 4, nota-se também que foram identificadas 682 edificações críticas (0,34%), sendo 280 edificações totalmente críticas e 402 parcialmente críticas; isso representa 0,07 km<sup>2</sup> (0,25%) da área edificada e significa que nessas áreas, para casos de ampliação vertical de estruturas ou de instalação de antenas e de SPDA, deve-se observar o limite altimétrico imposto pelo PBZPA. Além disso, as edificações que se encontravam na área de ampliação do aeroporto foram removidas, independentemente de suas altitudes, são exemplos: as edificações da Vila Dique e da Vila Nazareth e do entorno da Rua Taim. A maioria das edificações críticas e atingidas está inserida nas superfícies cônica e horizontal interna do PBZPA. Vale apontar também que há várias (mais de 900) edificações críticas e atingidas, total e parcialmente, inseridas na seção 1 da superfície de aproximação e na superfície de transição do PBZPA; entre elas, destacam-se os estabelecimentos Big Sertório, Atacadão, Hotel Express, Posto Ipiranga e Boulevard Laçador.

Para as torres e os postes também foi feita uma representação das feições críticas e atingidas pelo PBZPA. A Figura 24, a seguir, ilustra as torres de transmissão e telecomunicação atingidas pelo PBZPA, segundo a diferença altimétrica encontrada entre as feições e o PBZPA. Nota-se pela Figura 24 que existem torres de transmissão atingidas na porção sudeste da área de estudo. Essas torres localizam-se no Morro Santana, que é o local mais alto do município e, de acordo com a Figura 20, essas torres possuem mais de 160 metros de altitude. Nota-se também a existência de torres de telecomunicação atingidas nas porções leste e sul da área de estudo e de uma torre atingida próxima ao aeroporto,

conforme detalhe “A” da Figura 24. A torre atingida localizada próxima à cabeceira 11 da pista do aeroporto é uma antena, inserida na faixa de pista, e é um provável auxílio de navegação do aeroporto. Percebe-se também pela Figura 24 que não há torres de transmissão e telecomunicação críticas na área de estudo.

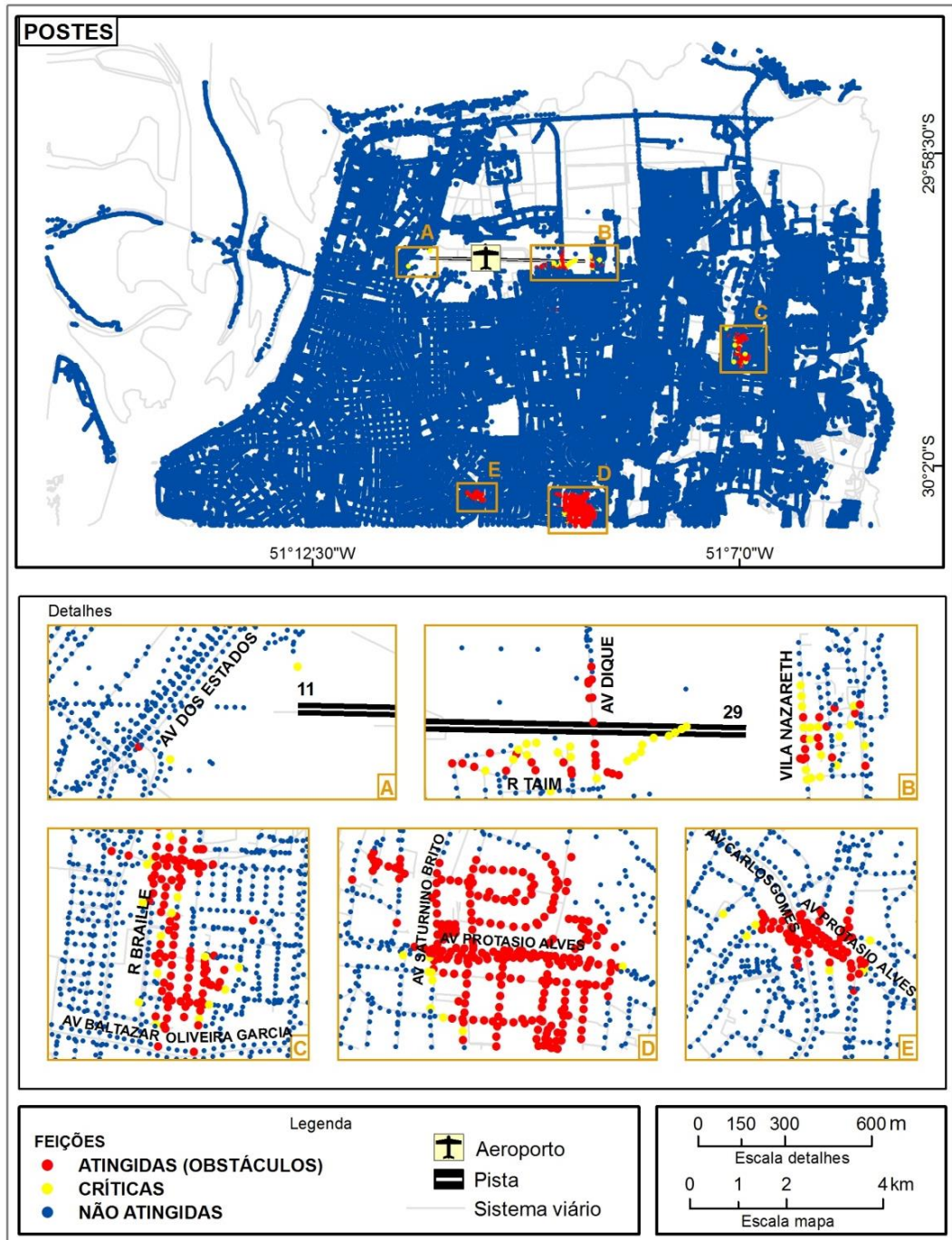
Figura 24 – Torres de transmissão e telecomunicação atingidas pelo PBZPA.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 25, a seguir, apresenta os postes críticos e atingidos pelo PBZPA. De acordo com a Figura 25, percebe-se que existem postes críticos e atingidos nas porções leste e sul da área de estudo, conforme detalhes “C”, “D” e “E” e também próximo ao aeroporto, conforme detalhes “A” e “B” da referida figura.

Figura 25 – Postes críticos e atingidos pelo PBZPA.



Fonte: Elaboração própria.

O detalhe “A” ilustra a presença de dois postes críticos e um atingido próximo ao aeroporto. O poste crítico, localizado na faixa de pista próximo à cabeceira 11 da pista, pertence ao aeroporto; o outro poste crítico localiza-se no estacionamento do estabelecimento Boulevard Laçador e o poste atingido encontra-se em frente ao Posto Ipiranga, na Avenida dos Estados. O detalhe “B” da Figura 25 ilustra os postes localizados na área de ampliação do aeroporto, que abrange o entorno da Avenida Dique e da Vila Nazareth até a Rua Taim. Essa região foi desapropriada devido às obras de ampliação do aeroporto, portanto é provável que os mesmos já tenham sido removidos.

Conforme os detalhes “C”, “D” e “E” existem postes críticos e atingidos nas proximidades da Rua Braille com a Avenida Baltazar de Oliveira Garcia e da Avenida Protásio Alves com as Avenidas Saturnino de Brito e Carlos Gomes, respectivamente. Os postes críticos e atingidos ilustrados nos detalhes “D” e “E” da Figura 25 localizam-se nas partes mais altas da área de estudo e, conforme a Figura 20, possuem altitudes que variam de 91 a mais de 120 metros. A quantificação das torres e dos postes atingidos e críticos, em termos de número e porcentagem, pode ser verificada na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantificação dos postes e das torres atingidos e críticos.

<b>TORRES TRANSMISSÃO</b>	<b>147</b>	<b>100%</b>
Atingidas	4	2,72%
Críticas	0	0%
<b>TORRES TELECOMUNICAÇÃO</b>	<b>197</b>	<b>100%</b>
Atingidas	7	3,55%
Críticas	0	0%
<b>POSTES</b>	<b>51.877</b>	<b>100%</b>
Atingidos	487	0,94%
Críticos	76	0,15%

Fonte: Elaboração própria.



A partir da interpretação da Tabela 5, nota-se que do total de 147 torres de transmissão, quatro são atingidas, o que representa 2,72% das torres de transmissão localizadas na área de estudo. Todas as quatro torres atingidas estão inseridas na superfície horizontal externa do PBZPA. Com relação às torres de telecomunicação, de um total de 197 torres, sete são atingidas, representando 3,55% das torres de telecomunicação. As torres de telecomunicação são classificadas em antenas e torres; das sete feições atingidas, cinco são antenas e duas são torres. Dessas, apenas uma antena localiza-se em cima de um prédio, as demais antenas e torres estão sobre o terreno. Uma antena atingida está inserida na faixa de pista do aeroporto, a qual é um provável auxílio de navegação do aeroporto; uma torre atingida está inserida na seção 1 da superfície de aproximação; uma antena atingida, na superfície horizontal interna e uma torre e três antenas atingidas estão inseridas na superfície cônica do PBZPA. Nenhuma torre de transmissão e de telecomunicação foi considerada crítica. Os postes, por sua vez, somam 51.877 e desses, 487 postes são atingidos e 76 são críticos, o que representa respectivamente 0,94% e 0,15% do total de postes presentes na área de estudo. A maioria dos postes críticos e atingidos está inserida nas superfícies cônica e horizontal interna do PBZPA.

De acordo com a Padronização PAD-11.058 e os Regulamentos de Instalações Consumidoras para fornecimento em tensão primária e secundária de distribuição, da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE), a altura dos postes pode variar entre 3,9 e 21,0 metros, descontando o engastamento, que é a parte enterrada do poste (CEEE, 2017; 2018; 2019). A altura das torres de transmissão e telecomunicação, por sua vez, pode variar, respectivamente, entre 30 a mais de 100 metros (GABRIELLI, 2004; ELIAS, 2015) e entre 20 a 120 metros (ZAMPIRON, 2008; ROTHIER, 2017), dependendo do tipo da estrutura.

Para avaliar o método de atribuição de altitudes às torres e aos postes, a altura dessas feições foi obtida através da subtração entre as altitudes do MDS e do MDT. As alturas obtidas foram então comparadas com os intervalos encontrados nas referências para verificar a coerência dos resultados. Das 197 torres de telecomunicação, 118 apresentam altura inferior a 20 metros e as demais (79 torres) altura igual ou superior a 20 metros. Das 147 torres de transmissão, 144 apresentam altura inferior a 30 metros e apenas três (3) torres altura igual ou superior a 30

metros. Dos 51.877 postes, 6.177 apresentam altura dentro do intervalo estabelecido nas normas, 34 apresentam altura superior a 21 metros, 32 postes estão fora da cobertura do MDT e, portanto, não foi possível determinar suas alturas e os demais (45.634 postes) apresentam altura inferior a 3,9 metros.

Tanto para as torres quanto para os postes que apresentaram altura inferior às estabelecidas nas referências e normas de padronização, considerou-se que o lidar não detectou a altura dessas feições, pois a altitude do topo das mesmas não foi registrada. Os postes que apresentam altura superior à estabelecida nas normas podem ser torres de transmissão do tipo poste ou torres de iluminação, que têm estruturas similares aos postes, porém têm altura maior, e que podem ter sido restituídas como postes. As torres de iluminação existentes na Avenida Castelo Branco, próximo à ponte do Guaíba (vão móvel) e as torres de transmissão do tipo poste existentes na Avenida Assis Brasil, próximo à divisa entre os municípios de Porto Alegre e Cachoeirinha, são exemplos de torres restituídas como postes. Além dessas, foram identificadas duas torres de telecomunicação restituídas como postes, uma localizada no aeroporto, próxima ao terminal 2, e outra localizada na FIERGS.

Uma análise complementar foi realizada para os postes adicionando uma constante de altura a ser somada aos valores de altitude dos 45.634 postes identificados com altura inferior a 3,9 metros. Para isso, considerou-se que todos esses postes fossem de média tensão (até 25 kV). Assim, segundo o Regulamento de Instalações Consumidoras para Média Tensão – Até 25 kV, da CEEE, o comprimento mínimo desse tipo de poste é de 11,0 metros (CEEE, 2018), com um engastamento de 1,7 metros (CEEE, 2019), o que resulta em uma altura igual a 9,3 metros. Com isso, foram identificados 1.214 postes atingidos e 95 críticos, ou seja, aproximadamente 2,5 vezes mais postes atingidos e 1,25 vezes mais postes críticos. No entanto, notou-se que a localização espacial dos postes identificados como atingidos e críticos na análise complementar permaneceu praticamente igual à da primeira análise (Figura 24). Dos 487 postes atingidos, 421 apresentam altura inferior a 3,9 metros, ou seja, o próprio terreno já é identificado como obstáculo, pois a altura do poste não foi detectada pelo lidar.

No caso das torres não foi feito o mesmo, pois sua altura varia de acordo com o tipo de estrutura e não há uma padronização. Existe a NBR 5422/1985 que fixa as condições básicas para projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica,

a qual em seu item “14 Aproximação de Aeroportos e Sinalização” observa a proximidade das linhas de transmissão a aeroportos para definição de sua altura, salientando que as mesmas “devem ser projetadas de forma a ficarem inteiramente situadas abaixo do gabarito de aproximação do aeroporto” (ABNT, 1985, p. 35). Contudo, realizou-se uma análise complementar para as torres de telecomunicação. Na página eletrônica da AISWEB, do DECEA, são disponibilizadas informações sobre obstáculos a aeródromos. Para o Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho constam informações planialtimétricas de sete obstáculos, sendo três torres de telecomunicação, duas antenas, um mastro e pilares sobre a ponte do Lago Guaíba (AISWEB, 2021). Desses obstáculos, cinco estão localizados dentro da área de estudo, porém os pilares sobre a ponte do Lago Guaíba, uma torre de telecomunicação e um mastro localizado no topo de uma edificação não constavam na base cartográfica da PMPA. Assim, apenas dois obstáculos foram avaliados para verificar a convergência das informações altimétricas. Com isso, notou-se uma diferença de aproximadamente 15 e 17 metros para as altitudes do topo das torres de telecomunicação avaliadas. Diante disso, considerou-se que o lidar não detectou a altura das torres, pois a altitude do topo dessas estruturas não foi registrada. Assim, entendeu-se que existe uma limitação da qualidade do dado para a determinação da altitude dessas feições. No entanto, salienta-se que ainda assim as torres avaliadas foram identificadas como obstáculos pelo método. Destaca-se que a edificação em que o mastro está localizado foi identificada como obstáculo pelo método.

#### **5.4 Mapa de risco dos obstáculos**

O modelo de classificação do risco de obstáculos resultou da aplicação de um questionário a um especialista da aviação civil e do método AHP, conforme apresentado no segundo artigo. O objetivo do questionário consistiu em obter a opinião do especialista sobre a relevância dos fatores de risco na análise, bem como a importância relativa entre eles na modelagem do risco de obstáculos a aeroportos. A aplicação do questionário foi feita em março de 2020 e o especialista foi novamente consultado em agosto de 2020 para rever dois julgamentos. O envio do

questionário, a nova consulta ao especialista e o recebimento das respostas foram feitos por e-mail.

O questionário elaborado (Apêndice A) apresenta duas partes: (i) informações do especialista e (ii) opinião do especialista. A primeira parte traz informações sobre o nível de escolaridade, cargo/ocupação e a experiência na área da aviação e aeroportos do especialista. Tais informações foram colhidas para traçar um perfil do profissional e auxiliar a interpretação das respostas fornecidas pelo mesmo. A segunda parte consiste na opinião do especialista sobre os fatores de risco, as classes dos fatores de risco e a importância relativa dos fatores, considerando o risco de obstáculos à segurança aérea. As questões são objetivas e a escolha das mesmas foi feita com base no questionário de Barroso e Correia (2014) e no estudo de Wang, Hu e Tao (2004).

O entrevistado inicia o questionário com suas informações pessoais e profissionais. Segundo as respostas fornecidas no questionário, o especialista apresenta o seguinte perfil: possui nível superior, ocupa o cargo de engenheiro e tem mais de 20 anos de experiência na área de aviação e aeroportos.

A seguir, o especialista é questionado sobre a importância dos fatores de risco considerados na classificação do risco e é solicitado ao mesmo que aponte a relevância de cada fator na análise, a fim de verificar a pertinência de todos os fatores ao estudo. A partir disso, cada fator de risco é dividido em classes e o especialista é questionado a respeito da probabilidade ou da periculosidade de cada classe, considerando o comprometimento da segurança e regularidade das operações aéreas. Para avaliação das classes, o especialista utilizou uma escala de 1 a 5, em que o número 1 representa “muito pouco provável/perigoso” e o número 5 “extremamente provável/perigoso”. Por fim, o especialista é convidado a comparar os fatores de risco entre si, ou seja, determinar suas importâncias relativas. Assim, de acordo com o proposto pelo método AHP, os fatores foram organizados aos pares (i, j) e o especialista, utilizando a escala fundamental de Saaty, comparou os fatores entre si, estabelecendo as importâncias relativas dos mesmos (julgamentos). Para simplificar o julgamento do especialista e evitar inconsistência, os valores intermediários da escala fundamental não foram utilizados (BARROSO; CORREIA, 2014).

Com a aplicação do modelo de classificação do risco de obstáculos foi possível associar um nível de risco para cada obstáculo identificado. Isso resultou em um mapa de risco dos obstáculos considerando o comprometimento da segurança e manutenção das operações aéreas do aeroporto. O modelo foi implementado através da álgebra de mapas, utilizando a ferramenta “*Calculadora Raster*” do software QGIS. Para isso, foi necessário fazer a estruturação dos dados geoespaciais, de acordo com as respostas do especialista constantes no questionário. Assim, foram geradas as estruturas de dados digitais “DISTÂNCIA”, “LOCALIZAÇÃO”, “TIPO” e “PROJEÇÃO”, correspondentes aos fatores de risco definidos no questionário.

A estrutura de dados vetorial “DISTÂNCIA” foi gerada a partir da posição geográfica das cabeceiras da pista do aeroporto. A partir de cada cabeceira foram gerados *buffers*, de acordo com os intervalos de distância fornecidos pelo especialista no questionário. Para isso foi utilizada a ferramenta “*Multiple Ring Buffer*” do software ArcGIS (aplicativo ArcMap), a qual gera múltiplos *buffers* de distâncias específicas ao redor das feições de entrada. Assim, as cabeceiras da pista, representadas pela primitiva geométrica ponto, serviram como dado de entrada e foi inserida a informação dos intervalos de distância para geração dos *buffers*. A opção para gerar *buffers* não sobrepostos foi escolhida. Os intervalos de distância foram então classificados de acordo com as notas de risco dadas pelo especialista, o qual considerou um obstáculo localizado em um desses intervalos de distância e a probabilidade desse obstáculo comprometer a segurança e a manutenção das operações aéreas do aeroporto. Na sequência, a estrutura de dados vetorial foi transformada para a estrutura matricial utilizando como atributo as notas de risco, a partir da ferramenta “*Rasterizar*” do software QGIS.

A estrutura de dados digital “LOCALIZAÇÃO” consistiu na estrutura vetorial do PBZPA, a qual foi classificada de acordo com as notas de risco atribuídas a cada superfície limitadora pelo especialista, que considerou a probabilidade de um obstáculo inserido nessas superfícies comprometer a segurança e a manutenção das operações aéreas do aeroporto. Como a Portaria DECEA nº 260/ICA incluiu uma superfície limitadora de obstáculos ao PBZPA do SBPA, chamada superfície limitadora de interesse público, que não consta no questionário, foi atribuída a essa superfície a mesma nota de risco da superfície horizontal interna, ou seja, quatro (4);

tal decisão foi tomada por essa superfície estar localizada entre a superfície horizontal interna e a superfície cônica e a nota de risco associada à primeira superfície ser maior que a da segunda. A justificativa de não incluir a superfície limitadora de interesse público no questionário está na tentativa de elaborar um questionário abrangente a todos os aeroportos e não um específico para o Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho. Na sequência, a estrutura vetorial foi transformada para a estrutura matricial utilizando como atributo as notas de risco, a partir da ferramenta “*Rasterizar*” do *software* QGIS.

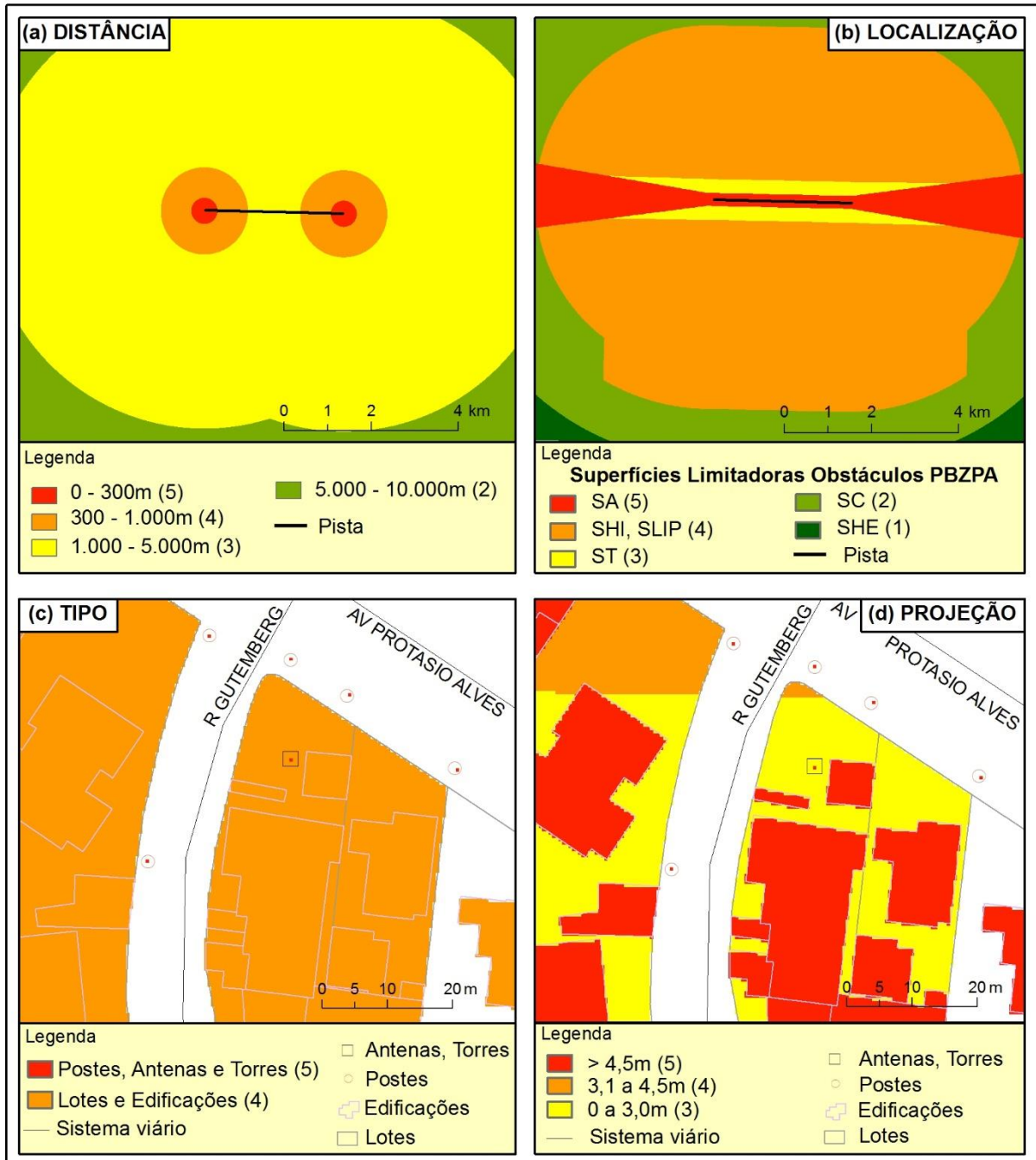
A estrutura de dados matricial “TIPO” foi gerada a partir da união dos lotes, edificações, postes e torres. Como essas estruturas vetoriais estão representadas por meio de primitivas geométricas diferentes (polígono e ponto) foi necessário primeiro converter as estruturas vetoriais em matriciais e depois unir as quatro estruturas de dados matriciais. A conversão entre as estruturas de dados e a união das estruturas matriciais foram realizadas no *software* QGIS, por meio das ferramentas “*Rasterizar*” e “*Calculadora Raster*”, respectivamente. Antes da conversão das estruturas vetoriais, as feições foram classificadas de acordo com as notas de risco atribuídas pelo especialista, que considerou a periculosidade que cada tipo de obstáculo pode representar ao comprometimento da segurança e da manutenção das operações aéreas do aeroporto.

A estrutura de dados matricial “PROJEÇÃO” foi gerada a partir do quanto cada obstáculo se projeta acima das superfícies limitadoras de obstáculos. Assim, a projeção dos postes, torres, lotes e edificações foi classificada de acordo com as notas de risco atribuídas pelo especialista aos intervalos de projeção constantes no questionário. Nesse caso, também foi necessário primeiro converter as estruturas de dados vetoriais dos postes, torres, lotes e edificações para estruturas matriciais e posteriormente unir essas estruturas matriciais em uma única estrutura de dados matricial com a projeção acima das superfícies limitadoras de todos os tipos de obstáculos. A conversão entre as estruturas de dados e a união das estruturas matriciais também foram realizadas no *software* QGIS, por meio das ferramentas “*Rasterizar*” e “*Calculadora Raster*”, respectivamente.

A Figura 26 ilustra as estruturas matriciais dos fatores de risco, classificadas de acordo com as notas de risco. O nome das superfícies limitadoras de obstáculos na Figura 26 é representado pelas siglas: SA (Superfícies de Aproximação), ST

(Superfície de Transição), SHI (Superfície Horizontal Interna), SLIP (Superfície Limitadora de Interesse Público), SC (Superfície Cônica) e SHE (Superfície Horizontal Externa).

Figura 26 – Fatores e notas de risco.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 26 pode-se verificar que nenhum tipo de obstáculo recebeu nota de risco inferior a quatro (4), ou seja, obstáculos como lotes (relevo) ou edificações são considerados muito perigosos. Além disso, todos os obstáculos que se projetam acima das superfícies limitadoras do PBZPA receberam nota de risco igual ou maior a três (3), o que significa que qualquer tipo de obstáculo que se projeta acima das superfícies limitadoras do PBZPA provavelmente comprometerá a segurança e a regularidade das operações aéreas do aeroporto.

De posse das estruturas matriciais dos fatores de risco, representados numa mesma escala de risco, foi possível obter o mapa de risco para os obstáculos do SBPA (Figura 27). Como mencionado anteriormente, o modelo de classificação do risco apresentado no segundo artigo foi implementado por meio de álgebra de mapas. A álgebra de mapas foi feita utilizando a ferramenta “*Calculadora Raster*” do software QGIS, na qual as estruturas matriciais dos fatores de risco “DISTÂNCIA”, “LOCALIZAÇÃO”, “TIPO” e “PROJEÇÃO” foram multiplicadas por seus respectivos pesos e somadas, de acordo com a expressão para a classificação do risco de obstáculos (6), resultando no mapa de risco da Figura 27.

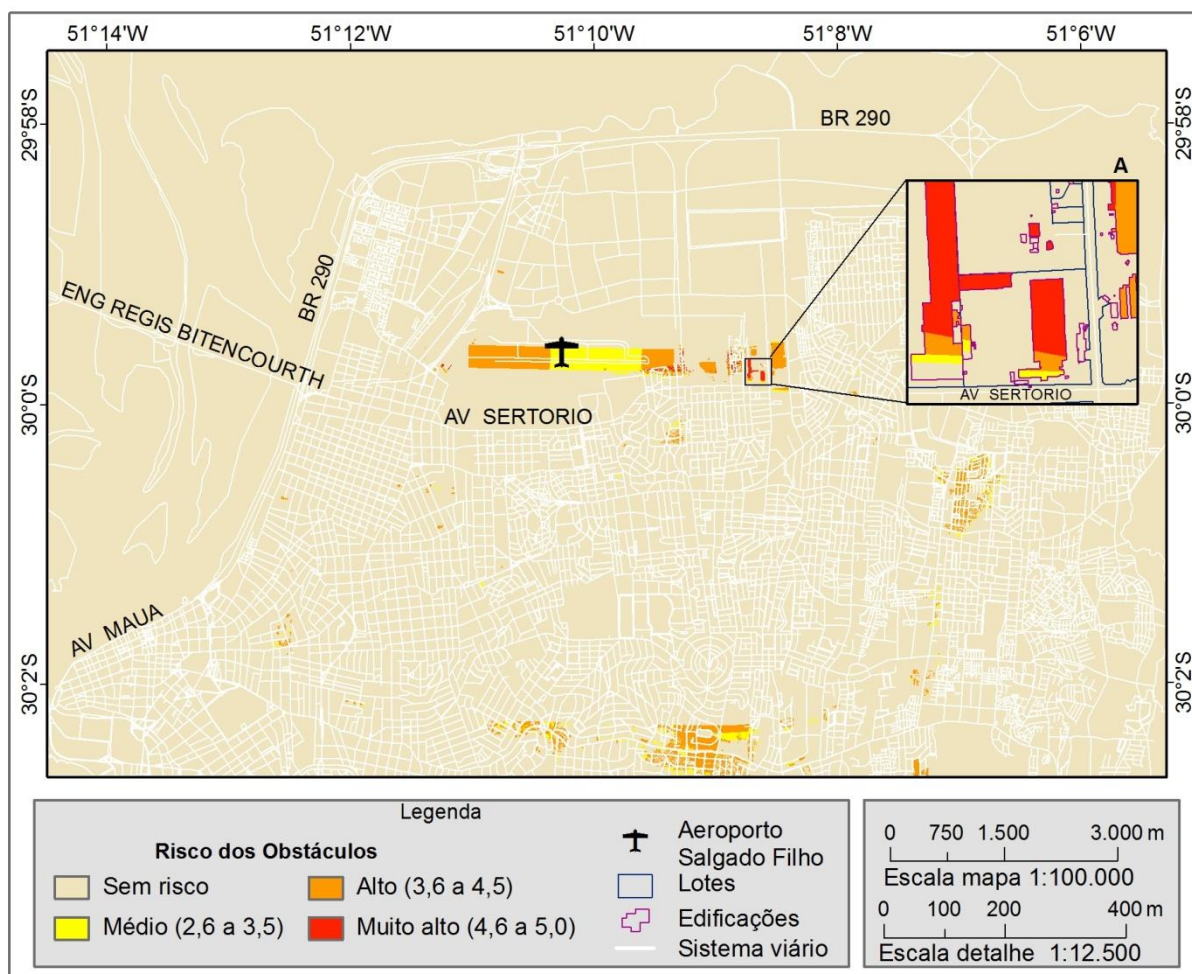
$$RISCO = (0,27 \times DISTÂNCIA) + (0,14 \times LOCALIZAÇÃO) + (0,05 \times TIPO) + (0,54 \times PROJEÇÃO) \quad (6)$$

Os obstáculos foram classificados como de médio, alto e muito alto risco às operações aéreas do aeroporto na Figura 27. Em amarelo são representados os obstáculos de médio risco, em laranja os de alto risco e em vermelho, os de muito alto risco. Nota-se, pelo detalhe A da Figura 27, que obstáculos do tipo edificação podem ter associado mais de um nível de risco ao longo de sua estrutura. Obstáculos do tipo edificação e lote podem receber mais de um nível de risco, pois a estrutura de uma edificação ou a área de um lote pode estar inserida dentro de um intervalo de limite altimétrico permitido por uma superfície limitadora do PBZPA; isto é, podem estar localizados dentro de uma das superfícies em rampa (primeira e segunda seção da superfície de aproximação, superfície de transição, superfície cônica e superfície limitadora de interesse público) e, desse modo, se projetar acima dessas superfícies de forma diferente ao longo de sua estrutura ou área. O mesmo não ocorre com os postes e as torres, pois tais feições são representadas pela primitiva geométrica de ponto, não abrangendo assim uma área e não estando, portanto, inseridos em um intervalo de limite altimétrico permitido por uma superfície limitadora do PBZPA. Considerando as notas de risco atribuídas às classes dos



fatores de risco, valores de risco entre 4,6 e 5,0 representam obstáculos muito ou extremamente perigosos, com alta probabilidade de comprometer a segurança e a manutenção das operações aéreas.

Figura 27 – Mapa de risco dos obstáculos do SBPA.



Fonte: Elaboração própria.

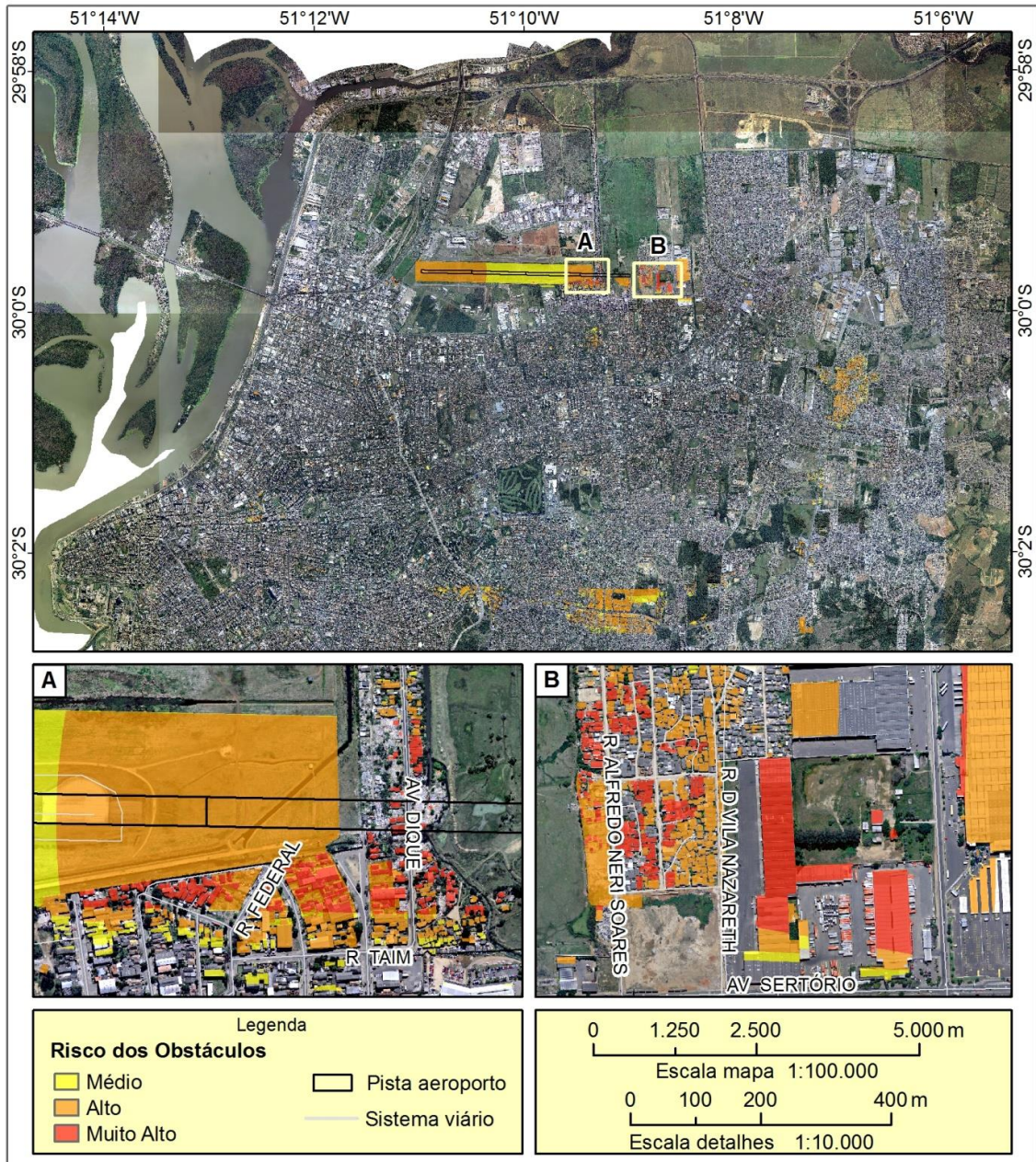
A área de estudo, representada por lotes, edificações, postes, torres e as superfícies limitadoras do PBZPA, compreende 174,60 km<sup>2</sup>. Desse total, 0,58 km<sup>2</sup> (0,33%) representam obstáculos de risco médio, 1,26 km<sup>2</sup> (0,72%) obstáculos de risco alto e 0,05 km<sup>2</sup> (0,03%) obstáculos de risco muito alto. Isso significa que 1,89 km<sup>2</sup> (1,1%) da área de estudo, considerando lotes, edificações, postes e torres, representam riscos às operações aéreas do aeroporto. Além disso, das 11 torres de telecomunicação e transmissão atingidas, dez (10) foram classificadas como de risco alto e uma (1) como de risco muito alto. Dessas dez torres, seis são torres de

telecomunicação e quatro são torres de transmissão; das seis torres de telecomunicação, quatro são antenas (três localizadas na superfície cônica e uma na superfície horizontal interna) e duas são torres (uma localizada na primeira seção da superfície de aproximação e a outra na superfície cônica); as quatro torres de transmissão estão localizadas na superfície horizontal externa. A torre de telecomunicação classificada como de risco muito alto é uma antena e está localizada na faixa de pista, sendo um provável auxílio de navegação do aeroporto. Dos 487 postes atingidos, 135 foram classificados como de risco médio, 350 como de risco alto e dois (2) como de risco muito alto; ambos os postes classificados como de risco muito alto provavelmente já foram removidos, pois se encontravam na área de ampliação do aeroporto: um localizava-se na Rua São Martim e outro na Rua Alfredo Neri Soares, Vila Nazareth.

É importante mencionar que para a avaliação do risco dos obstáculos não foi feita uma diferenciação entre as áreas e elementos pertencentes ao aeroporto e as demais áreas urbanas. No entanto, a Portaria nº 957/GC3, em seu capítulo VI, aborda o efeito adverso OPEA (Objeto Projetado no Espaço Aéreo), o qual avalia a possível interferência de um objeto projetado no espaço aéreo na segurança ou regularidade das operações aéreas (BRASIL, 2015). Os artigos 88 a 107 da referida Portaria abordam as situações nas quais um objeto causa efeito adverso OPEA, as possíveis exceções e quando é necessário realizar um estudo aeronáutico OPEA (BRASIL, 2015). Segundo o parágrafo 1º do artigo 86 da Portaria nº 957/GC3, esse estudo aeronáutico é de caráter qualitativo e consegue determinar se o prejuízo operacional é aceitável ou inaceitável, mas não é capaz de quantificar o aumento do risco associado às operações aéreas (BRASIL, 2015). A antena localizada na faixa de pista do aeroporto, classificada como de risco muito alto pelo método, se enquadra na seção II do capítulo VI, artigos 90 e 91, a qual informa que um objeto pode ser permitido nos limites verticais de uma zona desimpedida quando um estudo aeronáutico classificar o prejuízo operacional em aceitável (BRASIL, 2015).

Na Figura 28 podem ser visualizados os obstáculos do aeroporto e seus riscos associados. Os detalhes A e B da Figura 28 mostram a configuração urbana da Vila Dique, do entorno da Rua Taim e da Vila Nazareth anterior ao início das obras de expansão do aeroporto.

Figura 28 – Obstáculos do aeroporto e respectivos níveis de risco.



Fonte: Elaboração própria.

Vale destacar que a base cartográfica utilizada nesse estudo é referente à configuração do município de Porto Alegre do ano de 2009, quando foi realizado o aerolevantamento do município. Assim, mudanças ocorridas no uso e ocupação do solo após esse ano não foram atualizadas na base de dados geoespaciais. São exemplos, o já realizado reassentamento dos moradores e remoção das moradias e estrutura urbana da Vila Dique e o processo em andamento de reassentamento dos moradores e remoção das moradias e estrutura urbana da Vila Nazareth, para o

prosseguimento da expansão do aeroporto. Isso significa que alguns dos obstáculos identificados nesse estudo já foram removidos pela administração pública e não representam mais risco às operações aéreas. Além disso, loteamentos, edificações, postes e torres implantados posteriormente ao ano de 2009 não foram considerados no estudo, pois os mesmos não constavam na base cartográfica de referência. Assim, podem existir na área de estudo obstáculos do tipo lote, edificação, poste e torre não identificados nesse estudo.

A Figura 29 corresponde a uma imagem de satélite, referente ao mês de maio de 2021, adquirida no *software* Google Earth Pro, na qual é possível visualizar a configuração urbana atual da área representada nos detalhes A e B da Figura 28. Comparando as Figuras 28 e 29, percebe-se que a remoção das moradias e da infraestrutura urbana da Vila Dique está consolidada e que o traçado viário de alguns logradouros deixou de existir.

Figura 29 – Configuração espacial atual da área de expansão do aeroporto.



Fonte: GOOGLE EARTH PRO, 2021.

Para as representações 3D do risco dos obstáculos, a informação do risco foi atribuída às edificações, aos postes e às torres por meio de análises espaciais. As ferramentas “*Zonal Statistics as Table*” e “*Join*” do software ArcGIS (aplicativo ArcMap) foram utilizadas para atribuir a informação do risco às edificações. A primeira ferramenta teve a função de resumir os valores do mapa de risco (estrutura matricial) para a estrutura vetorial das edificações (*feature zone data*) e retornar os resultados em uma tabela de atributos; e a segunda, de combinar as informações da tabela gerada pela primeira ferramenta com as informações da tabela de atributos da estrutura vetorial das edificações, com base em um campo comum a ambas as tabelas de atributos (campo “OBJECTID” para esse caso). Para os postes e as torres, a informação do risco foi atribuída às feições a partir da ferramenta “*Extract Values to Points*” do software ArcGIS (aplicativo ArcMap), a qual extraiu o valor das células do mapa de risco com base na localização geoespacial das feições pontuais e registrou esses valores na tabela de atributos das estruturas vetoriais dos postes e das torres.

As Figuras 30 a 36 trazem uma representação 3D do risco dos obstáculos. Nas Figuras 30 a 33 pode-se visualizar o risco dos obstáculos próximos às cabeceiras 11 e 29 da pista do aeroporto. Nas Figuras 31 e 32, a posição da cabeceira 29 corresponde à configuração pré-expansão da pista. Destacam-se na Figura 30: a antena próxima à pista, provável auxílio de navegação do aeroporto, classificada como de muito alto risco; as edificações do Boulevard Laçador, parcialmente classificadas como de médio, alto e muito alto risco; o Posto Ipiranga e o poste localizado em frente ao posto, ambos classificados como de alto risco. Na Figura 33 destacam-se as edificações da Vila Nazareth, classificadas predominantemente como de alto e muito alto risco; a edificação do Big Sertório, classificada parcialmente como de médio, alto e muito alto risco; e a do Atacadão/Leroy Merlim, classificada parcialmente como de médio e alto risco. Nas Figuras 34 a 36 pode-se visualizar o risco dos obstáculos localizados próximos às Avenidas Carlos Gomes, Protásio Alves, Senador Tarso Dutra, Saturnino de Brito, Baltazar de Oliveira Garcia e Dante Angelo Pilla. Destaca-se na Figura 35 um poste de iluminação localizado no centro da rótula.

Figura 30 – Risco dos obstáculos próximos à cabeceira 11 da pista do aeroporto.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 – Risco dos obstáculos próximos à cabeceira 29 da pista do aeroporto.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 32 – Risco dos obstáculos próximos à cabeceira 29 da pista do aeroporto.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 33 – Risco dos obstáculos.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 34 – Risco dos obstáculos.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 35 – Risco dos obstáculos.



Fonte: Elaboração própria.



Figura 36 – Risco dos obstáculos.



Fonte: Elaboração própria.

## 6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A metodologia apresentada nesse trabalho se mostrou válida para identificação, quantificação, classificação e representação 3D do risco de obstáculos a aeroportos. Diante dos resultados apresentados, concluiu-se que o objetivo geral e os específicos foram alcançados e que a hipótese inicial da pesquisa foi confirmada.

A geração de representações 3D e a realização de análises espaciais permitiram a identificação e quantificação dos obstáculos existentes na zona de proteção do Aeroporto Internacional de Porto Alegre/Salgado Filho. A partir da definição de fatores de risco e da aplicação do método AHP, em conjunto com o conhecimento de um especialista da aviação civil, foi possível construir a matriz de comparação pareada dos fatores de risco e classificar o risco que os obstáculos representam à segurança e à manutenção das operações aéreas do aeroporto. O modelo de classificação do risco de obstáculos desenvolvido pode ser adaptado para qualquer aeroporto e legislação do espaço aéreo.

A qualidade dos dados geoespaciais utilizados na pesquisa se mostrou adequada para alcançar os objetivos propostos. As acurácias planimétrica e altimétrica de 0,5 metro da base cartográfica permitiu a avaliação dos lotes e das edificações. No entanto, a mesma não se mostrou muito apropriada para a avaliação dos postes e das torres. Como apontado nas discussões, notou-se que em muitos casos o lidar não detectou a altitude do topo dessas feições. Assim, visando a melhor avaliação dos postes e das torres em pesquisas futuras, aconselha-se a integração da metodologia apresentada com técnicas clássicas de levantamento, possibilitando, desse modo, a obtenção da informação altimétrica dessas feições com maior acurácia. Ainda que o dado lidar utilizado não se mostre totalmente adequado para a análise da altitude dos postes e das torres, ressalta-se que o mesmo é válido para o conhecimento da configuração altimétrica do solo. Postes ou torres identificados como obstáculos e que não tiveram a altitude do topo medida pelo lidar correspondem ao próprio terreno; isso significa que o terreno está violando o limite imposto pelas superfícies do PBZPA e essa informação é importante para alertar sobre a necessidade de avaliação da altura dos objetos no entorno dessas feições.

O conhecimento do risco dos obstáculos à segurança aérea é essencial para garantir um nível de segurança operacional aceitável nos aeroportos. Assim, a metodologia apresentada pode servir como uma ferramenta para filtrar as regiões que podem trazer potenciais riscos às operações aéreas, direcionando as ações dos gestores aeroportuários e auxiliando no gerenciamento eficaz dos obstáculos. Além disso, pode ser utilizada em conjunto com os métodos clássicos de levantamento, apontando a necessidade do levantamento de regiões críticas e estabelecendo prioridades, otimizando tempo e recursos.

A incorporação da superfície limitadora de interesse público ao PBZPA do aeroporto, a pedido da administração municipal, reduziu significativamente a quantidade de obstáculos ao aeroporto, conforme demonstrado nas Tabelas 1 e 2 do Artigo 1 e nas Tabelas 3 e 4 do subcapítulo 5.3. Essa mudança na legislação mostra um esforço entre os gestores aeroportuários e a administração municipal para adequar as necessidades da cidade, conciliando as solicitações do setor imobiliário e do aeroporto. Tal adequação da legislação foi necessária para não inviabilizar a operação do aeroporto e evitar um impacto socioeconômico negativo com a realocação de pessoas, bens e serviços já consolidados na região compreendida por essa superfície especial.

O PBZPA do Aeroporto Salgado Filho sofreu nova alteração em outubro de 2020. Assim, a Portaria DECEA nº 260/ICA, que definiu as superfícies limitadoras de obstáculos do PBZPA utilizado nesse trabalho, foi revogada e substituída pela Portaria ICA nº 678/SAGA, de 19 de outubro de 2020, que alterou a configuração futura da pista do aeroporto e, conseqüentemente, das superfícies limitadoras de obstáculos. Como a zona de proteção dos aeródromos varia de acordo com a mudança das características da(s) pista(s) do aeroporto, destaca-se a relevância da metodologia apresentada no apoio a estudos sobre o dimensionamento das superfícies limitadoras de obstáculos para aeroportos em expansão. A metodologia proposta se mostra uma potencial ferramenta para avaliações de cenários futuros, proporcionando aos gestores de aeroportos, à administração pública e ao planejamento urbano simular cenários e analisar os possíveis obstáculos e impactos na estrutura urbana existente no entorno do aeroporto.

Nesse trabalho foram considerados os lotes, as edificações, os postes e as torres existentes na área de estudo para a avaliação de obstáculos ao aeroporto. Em

pesquisas futuras, podem ser consideradas outras feições passíveis de afetar adversamente a segurança e a regularidade das operações aéreas, são exemplos: vegetação, árvores, pontes, passarelas e viadutos. Além disso, para a avaliação do risco de obstáculos em estudos futuros, sugere-se fazer uma diferenciação entre as áreas e elementos pertencentes ao aeroporto e as demais áreas urbanas, visto que a implantação da estrutura aeroportuária prevê estudos aeronáuticos quanto aos impactos na segurança e regularidade das operações aéreas.

Conforme discutido no segundo artigo, ajustes no questionário proposto podem ser feitos, a fim de torná-lo mais claro aos entrevistados e minimizar inconsistências. Em estudos futuros, aconselha-se a aplicação do questionário a um maior número de especialistas, pois a redundância de informação auxilia na resolução de inconsistências.

Outras recomendações consistem na abordagem dos impactos causados pela falta de atualização dos mapeamentos topográficos e pela carência de informações cartográficas em escalas grandes em estudos sobre obstáculos a aeroportos. Além disso, recomenda-se o aprofundamento dos conhecimentos sobre a cartografia necessária para atender a essa finalidade nos diferentes municípios e também sobre os conceitos de cartografia tridimensional para a representação de áreas de risco às operações aéreas. Sugere-se também a abordagem de métodos para automatização dos processos apresentados nesse trabalho, considerando alterações no uso e ocupação do solo e atualizações das legislações, e quais seriam as melhores plataformas para consulta e acesso aos dados.

## **FINANCIAMENTO**

Esse trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio de concessão de bolsa de pesquisa (Processo 133060/2019-5).

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422**: projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

AISWEB. **Salgado Filho (SBPA)**. 2021. Disponível em: <https://aisweb.decea.mil.br/?i=aerodromos&codigo=SBPA>. Acesso em: 12 abr. 2021.

AUDU, Ibrahim. **Spatial analysis of the threat of potential aerodrome obstacles on flight safety operations, in Mallam Aminu Kano International Airport, Kano-Nigeria**. 2016. Dissertação (Master of Science in Remote Sensing and GIS) – Department of Geography, Faculty of Science, Ahmadu Bello University, Zaria, 2016.

AUTODESK. **About Autodesk**. 2021a. Disponível em: <https://www.autodesk.com/company>. Acesso em: 13 set. 2021.

AUTODESK. **O que é o AutoCAD?** 2021b. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/autocad/overview#what-is-autocad>. Acesso em: 13 set. 2021.

AUTODESK. **AutoCAD**. 2021c. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/autocad/included-toolsets/autocad-map-3d>. Acesso em: 13 set. 2021.

BARROSO, Luiza Franco; CORREIA, Anderson Ribeiro. Risk assessment on runway safety areas: assessing the severity of accidents. *In*: 18th AIR TRANSPORT RESEARCH SOCIETY WORLD CONFERENCE, 2014, Bordeaux. **Anais...** [...]. Vancouver: ATRS, 2014. p. 1-20.

BRASIL. Decreto-lei nº 2.271, de 3 de junho de 1940. Dispõe sobre a denominação e o registro dos aeroportos e aeródromos. **Coleção das Leis de 1940** – Volume III, Atos do Poder Executivo, Decretos-leis de abril a junho. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1940.

BRASIL. Portaria nº 957/GC3, de 09 de julho de 2015. Dispõe sobre as restrições aos objetos projetados no espaço aéreo que possam afetar adversamente a segurança ou a regularidade das operações aéreas, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, n.135, 17 jul. 2015. Seção 1, p. 6.

CEEE. **Regulamento de Instalações Consumidoras Fornecimento em Tensão Secundária Rede de Distribuição Aérea**. Porto Alegre: CEEE, 2017. Disponível em: [https://www.ceee.com.br/normas-tecnicas/ric-arquivos/ric\\_bt\\_2016\\_versao\\_1-5.pdf](https://www.ceee.com.br/normas-tecnicas/ric-arquivos/ric_bt_2016_versao_1-5.pdf). Acesso em: 30 abr. 2020.

CEEE. **Regulamento de Instalações Consumidoras Fornecimento em Média Tensão Rede de Distribuição Aérea**. Porto Alegre: CEEE, 2018. Disponível em: [https://www.ceee.com.br/normas-tecnicas/ric-arquivos/ric\\_mt\\_2017\\_versao\\_2.pdf](https://www.ceee.com.br/normas-tecnicas/ric-arquivos/ric_mt_2017_versao_2.pdf). Acesso em: 30 abr. 2020.

CEEE. **PAD-11.058 Compartilhamento de Infraestrutura**. Porto Alegre: CEEE, 2019. Disponível em: <https://www.ceee.com.br/normas-tecnicas/padronizacoes/pad-11-058-compartilhamento-de-infraestrutura>. Acesso em: 29 mar. 2021.

CGNA. **Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo**. Rio de Janeiro: CGNA, 2018. Disponível em: <http://portal.cgna.gov.br/resources>. Acesso em: 29 jan. 2020.

CORREIA, Anderson Ribeiro; NETO, Júlio Alves Ribeiro. Safety evaluation of runway safety areas: case study at major Brazilian airports. **Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society**, 2014, v. 10, n. 1, p. 25-36.

DECEA. **Planos de Zona de Proteção**. 2019. Disponível em: <http://servicos.decea.gov.br/aga/?i=planos>. Acesso em: 23 set. 2019.

ELIAS, Karine Murta. **Torre de transmissão de energia elétrica: novo design e os desafios da inserção no contexto urbano**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ESRI. **ArcGIS Desktop**. 2021. Disponível em: <https://www.esri.com/pt-br/arcgis/products/arcgis-desktop/overview>. Acesso em: 13 set. 2021

FALAVIGNA, Gabriela Pasetto. **Mapeamento tridimensional da zona de proteção de aeródromo: o caso da zona norte de Porto Alegre/RS**. 2016. Trabalho de conclusão (Bacharelado em Engenharia Cartográfica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FALAVIGNA, Gabriela Pasetto; IESCHECK, Andrea Lopes; SOUZA, Sergio Florencio de. 3D modeling to identify and quantify obstacles in aerodrome protection zone. **Bulletin of Geodetic Sciences**, 2020, v. 26, n. 2, p.1-12. doi: 10.1590/s1982-21702020000200009

FORTES, João Luiz de Castro; CORREIA, Anderson Ribeiro. Safety assessment at airports: São Paulo/Congonhas Airport – A case study. **Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society**, 2012, v. 8, n.1, p. 29-42.

GABRIELLI, Tatianna Ventrorm. **Análise do comportamento estrutural de torres de transmissão tubulares via simulação computacional**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

GOOGLE EARTH PRO. **Imagem de satélite**. 2021. Acesso em: 21 jun. 2021.

HALL, J. *et al.* **ACRP Report 3 – Analysis of Aircraft Overruns and Undershoots for Runway Safety Areas**. Washington, DC: Federal Aviation Administration, 2008.

ICA. Portaria DECEA nº 260/ICA, de 23 de setembro de 2016. Aprova o Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromo (PBZPA) e o Plano de Zona de Proteção de Auxílios à Navegação Aérea (PZPANA) para o Aeródromo SALGADO FILHO (SBPA) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, n.190, 03 out. 2016. Seção 1, p. 7.

ICAO. **Doc 9859, Safety Management Manual (SMM)**. 2. ed. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2009.

ICAO. **Doc 9859, Safety Management Manual**. 4. ed. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2018.

INFRAERO. **Aeroporto Internacional de Porto Alegre – Salgado Filho**. 2020. Disponível em: <https://www4.infraero.gov.br/aeroportos/aeroporto-internacional-de-porto-alegre-salgado-filho/>. Acesso em: 29 jan. 2020.

MEDEIROS, Francisco Cesar de; CORREIA, Anderson Ribeiro. The construction non-compliances of the runway systems in Brazilian airports regarding safety rules. *In: 12th WORLD CONFERENCE OF TRANSPORTATION RESEARCH*, 2010, Lisboa. **Anais...** [...].Leeds: WCTRS, 2010. p. 1-16.

MILLER, George A. The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. **The Psychological Review**, 1956. v. 63, n. 2, p. 81-97.

OBSERVAPOA. **Porto Alegre e seus territórios**. 2016. Disponível em: <http://www.observapoa.com.br/>. Acesso em: 20 jun. 2016.

OBSERVAPOA. **Bairros Oficiais – Lei 12.112 de 2016**. 2021a. Disponível em: <https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1iau8bF4P7aoT0q6Xpqqxqxc2Fcr8hA7&ll=-29.995244179131642%2C-51.16881438900789&z=14>. Acesso em: 23 set. 2021.

OBSERVAPOA. **Territorialidades**. 2021b. Disponível em: [http://observapoa.com.br/default.php?reg=272&p\\_secao=46](http://observapoa.com.br/default.php?reg=272&p_secao=46). Acesso em: 17 set. 2021.

PARRISH, Christopher E.; NOWAK, Robert D. Improved approach to LIDAR airport obstruction surveying using full-waveform data. **Journal of Surveying Engineering**, 2009, v. 135, n. 2, p. 72-82. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9453(2009)135:2(72)

PINELLI, Gianpaolo; VERACINI, Tiziana. Remote Sensing monitoring of changes potentially associated to obstacles to air navigation. *In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS)*, 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milão. **Anais...** [...]. Nova York: IEEE, 2015. p. 3041-3044.

PORTO ALEGRE. Lei Complementar nº 284, de 27 de outubro de 1992. Institui o Código de Edificações de Porto Alegre e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, Porto Alegre, 03 nov. 1992. 5 ed. Porto Alegre: CORAG, 2001.

PORTO ALEGRE. Decreto nº 18.315, de 11 de junho de 2013. Institui o Sistema Cartográfico de Referência de Porto Alegre (SCR-POA). **Diário Oficial de Porto Alegre**, Porto Alegre, 21 jun. 2013.

PORTO ALEGRE. Decreto nº 19.047, de 02 de junho de 2015. Institui as Regiões Territoriais para prestação de serviços comuns aos órgãos, Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE), Departamento de Esgotos Pluviais (DEP),



Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU), Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SMAM) e Secretaria Municipal de Obra e Viação (SMOV), que tem por objetivo promover a otimização do emprego dos recursos humanos e materiais disponíveis para aprimorar a qualidade do atendimento da administração pública municipal às demandas dos municípios. **Diário Oficial de Porto Alegre**, Porto Alegre, 19 jun. 2015.

PORTO ALEGRE. **Mapas Digitais Oficiais - Secretaria do Meio Ambiente e da Sustentabilidade**. 2021. Disponível em: [https://www2.portoalegre.rs.gov.br/spm/default.php?p\\_secao=310](https://www2.portoalegre.rs.gov.br/spm/default.php?p_secao=310). Acesso em: 17 set. 2021.

PORTO ALEGRE AIRPORT. **Sobre o Porto Alegre Airport**. 2020. Disponível em: <https://portoalegre-airport.com.br/pt/institucional/sobre>. Acesso em: 29 jan. 2020.

QGIS. **Descubra o QGIS**. 2021a. Disponível em: [https://qgis.org/pt\\_BR/site/about/index.html](https://qgis.org/pt_BR/site/about/index.html). Acesso em: 13 set. 2021.

QGIS. **Aplicações**. 2021b. Disponível em: [https://qgis.org/pt\\_BR/site/about/features.html](https://qgis.org/pt_BR/site/about/features.html). Acesso em: 15 set. 2021.

ROTHIER, Ricardo Gonçalves da Fonseca. **Análise e dimensionamento de uma torre de aço de telecomunicações**. 2017. Trabalho de conclusão (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SAATY, Thomas L. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. **Journal of Mathematical Psychology**, 1977. v. 15, n. 3, p. 234-281. doi: 10.1016/0022-2496(77)90033-5

SAATY, Thomas L. **The Analytic Hierarchy Process: decision making in complex environments**. In: R. Avenhaus, R. K. Huber, eds. Quantitative Assessment in Arms Control. Boston, MA: Springer, 1984. p. 285-308. doi: 10.1007/978-1-4613-2805-6\_12

SAATY, Thomas L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, 2008. v. 1, n. 1, p. 83-98.

SAATY, Thomas L.; VARGAS, Luis G. **Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process**. 2. ed. Boston, MA: Springer, 2012. doi: 10.1007/978-1-4614-3597-6

SANTOS, Fábio Anderson Batista dos; MÜLLER, Carlos. Sistema de Informações Geográficas no apoio ao gerenciamento de obstáculos à superfície de segmento visual. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 2014, v. 20, n. 3. p. 504-525. doi: 10.1590/S1982-21702014000300029

SCILAB. **History**. 2021. Disponível em: <https://www.scilab.org/about/company/history>. Acesso em: 13 set. 2021.

SILVA, Roterdan Moura da; BELDERRAIN, Mischel Carmen Neyra. Considerações sobre métodos de decisão multicritério. In: XI ENCONTRO DE INICIAÇÃO

CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA, 2005, São José dos Campos. **Anais...** [...]. São José dos Campos: ITA, 2005.

SILVA, Amanda C. Simões da; BELDERRAIN, Mischel Carmen N.; PANTOJA, Francisco Carlos M. Prioritization of R&D projects in the aerospace sector: AHP method with ratings. **Journal of Aerospace Technology and Management**, 2010, v. 2, n. 3, p. 339-348. doi: 10.5028/jatm.2010.02039110

VASCONCELOS, Giancarlo Ribeiro; MOTA, Caroline Maria de Miranda. Modelo multicritério de comparação par a par baseado no AHP: proposta de linearização do processo de comparação. *In: XLVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL*, 2014, Salvador. **Anais...** [...]. Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2014. p. 453-464.

WANG, Chun; HU, Yong; TAO, Vincent. Identification and risk modeling of airfield obstructions for aviation safety management. *In: XX INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ISPRS) CONGRESS*, 2004, Istanbul. **Anais...** [...]. Hannover: ISPRS, 2004. p. 119-124.

WOLFF, Cristina Santos. **O método AHP – revisão conceitual e proposta de simplificação**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ZAMPIRON, Ivan. **Avaliação das características e desempenho de estruturas para telecomunicações visando o projeto de novo modelo de torre autoportante**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

## APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO

## QUESTIONÁRIO

### INFORMAÇÕES DO ESPECIALISTA

- A. Nível de escolaridade: Superior
- B. Cargo/Ocupação: Engenheiro
- C. Experiência na área da aviação e aeroportos:
- ( ) até 10 anos            ( ) de 11 a 20 anos            (  ) mais de 20 anos

### OPINIÃO DO ESPECIALISTA

Para responder às questões, considere as seguintes definições para as nomenclaturas DISTÂNCIA, LOCALIZAÇÃO, TIPO e PROJEÇÃO, tratadas nesse questionário.

- **DISTÂNCIA:** distância entre o obstáculo e a cabeceira mais próxima da pista do aeroporto.
- **LOCALIZAÇÃO:** superfície limitadora do PBZPA na qual o obstáculo está inserido.
- **TIPO:** natureza do obstáculo (relevo, edificação, poste, antena ou torre).
- **PROJEÇÃO:** o quanto o obstáculo se projeta acima de cada superfície limitadora do PBZPA (0,5m, 1m, 2m, etc.).

- I. Os fatores a seguir são importantes para avaliar o risco de obstáculos a aeroportos?

DISTÂNCIA (  ) sim ( ) não            LOCALIZAÇÃO (  ) sim ( ) não  
TIPO (  ) sim ( ) não            PROJEÇÃO (  ) sim ( ) não

- II. Numere os fatores de acordo com sua relevância:

(1) Pouco relevante            (2) Relevante    (3) Muito relevante            (4) Extremamente relevante

(  ) DISTÂNCIA                            (  ) LOCALIZAÇÃO  
(  ) TIPO                                      (  ) PROJEÇÃO

1. Considere a existência de obstáculos próximos às cabeceiras da pista de pouso/decolagem dos aeroportos. Informe cinco intervalos de distância. Em seguida, numere esses intervalos considerando o **provável** comprometimento da segurança e da regularidade das operações aéreas.

(1) Muito pouco provável      (2) Pouco provável      (3) Provável      (4) Muito provável  
(5) Extremamente provável

- a) ( 5 ) 0 a 300 m  
b) ( 4 ) 300 a 1000 m  
c) ( 3 ) 1000 a 5000 m  
d) ( 2 ) 5000 a 10000 m  
e) ( 1 ) mais de 10000 m

2. Considere as superfícies limitadoras de obstáculos estabelecidas pelos PBZPA dos aeroportos e os obstáculos inseridos nessas superfícies. Numere as superfícies de acordo com a **probabilidade** de um obstáculo localizado nessas superfícies comprometer a segurança e a regularidade das operações aéreas.

(1) Muito pouco provável      (2) Pouco provável      (3) Provável      (4) Muito provável  
(5) Extremamente provável

- ( 5 ) Superfície de Aproximação      ( 3 ) Superfície de Transição  
( 4 ) Superfície Horizontal Interna      ( 2 ) Superfície Cônica  
( 1 ) Superfície Horizontal Externa

3. Considere o TIPO (natureza) dos obstáculos. Numere o tipo de obstáculo de acordo com sua **periculosidade**, considerando o comprometimento da segurança e da regularidade das operações aéreas.

(1) Muito pouco perigoso      (2) Pouco perigoso      (3) Perigoso      (4) Muito perigoso  
(5) Extremamente perigoso

- ( 4 ) Relevô      ( 4 ) Edificação      ( 5 ) Poste      ( 5 ) Antena      ( 5 ) Torre

4. Considere a PROJEÇÃO de obstáculos acima das superfícies limitadoras estabelecidas pelos PBZPA dos aeroportos. Numere os intervalos de projeção considerando o **provável** comprometimento da segurança e da regularidade das operações aéreas.

(1) Muito pouco provável      (2) Pouco provável      (3) Provável      (4) Muito provável  
(5) Extremamente provável

- ( 3 ) 0 a 1,5m      ( 3 ) 1,6 a 3,0m      ( 4 ) 3,1 a 4,5m      ( 5 ) 4,6 a 6,0m  
( 5 ) mais de 6,0m

5. Utilize a escala numérica de comparação abaixo para assinalar a importância relativa dos fatores **DISTÂNCIA**, **LOCALIZAÇÃO**, **TIPO** e **PROJEÇÃO** no estudo do comprometimento da segurança e da regularidade das operações aéreas dos aeroportos.

Escala numérica de comparação:

- (1/9) O fator X é **extremamente MENOS importante** que o fator Y.  
(1/7) O fator X é **muito fortemente MENOS importante** que o fator Y.  
(1/5) O fator X é **fortemente MENOS importante** que o fator Y.  
(1/3) O fator X é **moderadamente MENOS importante** que o fator Y.  
( 3 ) O fator X é **moderadamente MAIS importante** que o fator Y.  
( 5 ) O fator X é **fortemente MAIS importante** que o fator Y.  
( 7 ) O fator X é **muito fortemente MAIS importante** que o fator Y.  
( 9 ) O fator X é **extremamente MAIS importante** que o fator Y.

- a) O fator **DISTÂNCIA** comparado ao fator **LOCALIZAÇÃO** é:

(1/3) (1/5) (1/7) (1/9) **(3)** (5) (7) (9)

- b) O fator **DISTÂNCIA** comparado ao fator **TIPO** é:

(1/3) (1/5) (1/7) (1/9) (3) **(5)** (7) (9)

- c) O fator **DISTÂNCIA** comparado ao fator **PROJEÇÃO** é:

**(1/3)** (1/5) (1/7) (1/9) (3) (5) (7) (9)

- d) O fator **LOCALIZAÇÃO** comparado ao fator **TIPO** é:

(1/3) (1/5) (1/7) (1/9) (3) (5) (7) **(9)**

- e) O fator **LOCALIZAÇÃO** comparado ao fator **PROJEÇÃO** é:

**(1/3)** (1/5) (1/7) (1/9) (3) (5) (7) (9)

- f) O fator **TIPO** comparado ao fator **PROJEÇÃO** é:

**(1/3)** (1/5) (1/7) (1/9) (3) (5) (7) (9)

6. Deixe seu comentário ou sugestão (opcional):

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---