

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências

Programa de pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas
Ambientais

Luis Felipe dos Santos Melo

**ASPECTOS ECOLÓGICOS PARA O DIAGNÓSTICO DE ANÁLISE DE RISCO DE
FAUNA NOS AERÓDROMOS BRASILEIROS**

Belo Horizonte

2023

Luis Felipe dos Santos Melo

**ASPECTOS ECOLÓGICOS PARA O DIAGNÓSTICO DE ANÁLISE DE RISCO DE
FAUNA NOS AERÓDROMOS BRASILEIROS**

Versão Final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pela Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistema Ambientais.

Área de concentração: Análise e modelagem de sistemas ambientais

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega

Coorientador: Doutor Vinícius Donisete Lima Rodrigues Goulart

Belo Horizonte

2023

M528a
2023

Melo, Luis Felipe dos Santos.

Aspectos ecológicos para o diagnóstico de análise de risco de fauna nos aeródromos brasileiros [manuscrito] / Luis Felipe dos Santos Melo. – 2023.
139 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega.

Coorientador: Vinícius Donisete Lima Rodrigues Goulart.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

Área de concentração: Análise, Modelagem e Gestão de Sistemas Ambientais.

Bibliografia: 118-123.

Inclui apêndices e anexos.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Aeroportos – Brasil – Teses. 3. Aeroportos – Medidas de segurança – Teses. 4. Mapeamento da cobertura do solo – Teses. I. Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega. II. Goulart, Vinícius Donisete Lima Rodrigues. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6(81)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

ASPECTOS ECOLÓGICOS PARA O DIAGNÓSTICO DE ANÁLISE DE RISCO DE FAUNA NOS AERÓDROMOS BRASILEIROS

LUIS FELIPE DOS SANTOS MELO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE, MODELAGEM E GESTÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Vinicius Donisete Lima Rodrigues Goulart - UFMG - Coorientador - (Doutor)
Fernanda Cristina Marques Lima - Sama Consultoria e Engenharia Ltda - (Doutora)
Vagner Braga Nunes Coelho - UFMG - (Doutor)
Weber Galvão Novaes - ProHabitat Assessoria Ambiental - (Doutor)

Belo Horizonte, 25 de julho de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Fernanda Cristina Marques Lima, Usuário Externo**, em 31/07/2023, às 09:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vagner Braga Nunes Coelho, Professor do Magistério Superior**, em 31/07/2023, às 17:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Weber Galvão Novaes, Usuário Externo**, em 02/08/2023, às 14:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Donisete Lima Rodrigues Goulart, Usuário Externo**, em 09/08/2023, às 18:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

*Aos gigantes
aos quais eu
me apoio nos
ombros.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Neiva dos Santo Melo, meu pai Raimundo Santana Melo e a minha irmã, Jacqueline Melo Takano pelo apoio e carinho infinitos, que me guiaram neste vasto mundo do conhecimento.

Agradeço a minha companheira, Ana Paula Minelli Moreira pela sua paciência inesgotável durante esta dura e longeva trajetória.

Agradeço ao Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega, Vinícius Donisete Lima Rodrigues Goulart, Maria Auxiliadora Drumond, Danielle Ramos de Alvarenga e Anderson Abade pela sua inestimável contribuição na construção do meu saber científico, tão quanto por partilharem da minha vida.

A CAPES pelo suporte financeiro necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

Pelo elevado número de aeródromos distribuídos nos mais diversos contextos geográficos e faunísticos ao longo do território brasileiro, tem-se que a conversão de habitats pela ocupação humana traz consigo a alteração do uso e cobertura do solo. Conseqüentemente, essa alteração pode influenciar a distribuição e riqueza de espécies de aves locais. A presença de espécies pode ser explicada por fatores biofísicos e socioeconômicos que alteram a composição da comunidade. Tendo como premissa que a comunidade de aves presente na Área de Segurança Aeroportuária (ASA) pode ser estimada através da interação entre os fatores no entorno dos aeródromos, o objetivo deste trabalho é prever a distribuição espacial e ocorrência das espécies oficialmente reportadas em colisão de fauna para auxiliar a previsão e o risco desses eventos. Frente a este contexto, estão sendo analisados os fatores atuantes na ASA dos 29 aeroportos de uso civil mais movimentados do Brasil, dado a maior incidência de colisões. A investigação em curso recorre ao modelo de distribuição de espécies (MaxEnt) a partir dados de ocorrência de espécie do banco de informações dados do *eBird Observation Dataset*, para elaborar o modelo de nicho de ocupação, e por consequência, o risco às operações aeroportuárias. Os resultados indicam que as variáveis utilizadas são sensíveis para identificar a adequabilidade de nichos das espécies frequentes nos reportes oficiais de colisão de fauna. A pesquisa possui aderência a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, mais especificamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável nº11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e nº15 (Vida terrestre), pois visa beneficiar a sociedade promovendo cidades mais seguras, resilientes e em equilíbrio com a avifauna no entorno dos aeródromos. O tema da pesquisa vai ao encontro das necessidades apontadas pela Agência Nacional de Aviação Civil e visa promover a segurança nas operações aeronáuticas indicando quais habitats estão mais propensos ao risco de ocorrência de aves, e o nível de risco associado.

Palavras-chave: colisão com aeronaves; área de segurança aeroportuária (ASA); modelagem geográfica; modelagem de distribuição de espécies (MDEs); gestão do risco de fauna.

ABSTRACT

Due to the high number of aerodromes distributed across diverse geographical and faunal contexts throughout the Brazilian territory, the conversion of habitats through human occupation brings about changes in land use and land cover. Consequently, this alteration can influence the distribution and species richness of local bird species. The presence of species can be explained by biophysical and socioeconomic factors that alter the composition of the community. Assuming that the bird community present in the Airport Safety Area (ASA) can be estimated through the interaction between factors in the vicinity of the aerodromes, the objective of this study is to predict the spatial distribution and occurrence of species officially reported in wildlife collisions to aid in the prediction and risk assessment of these events. Within this framework, the factors at play in the ASA of the 29 busiest civil airports in Brazil are being analyzed, given the higher incidence of collisions. This study investigated utilized species distribution model (MaxEnt) using species occurrence data from the eBird Observation Dataset to develop the niche occupancy model and, consequently, its risk to airport operations. The results indicate that the variables used are significant in identifying the niche suitability of species frequently reported in official wildlife collision records. The research aligns with the United Nations 2023 Agenda, Sustainable Development Goals No. 11 (Sustainable Cities and Communities) and No. 15 (Life on Land), as it aims to benefit society by promoting safer, more resilient cities in balance with avifauna in the vicinity of aerodromes. The research topic addresses the needs identified by the National Civil Aviation Agency and aims to enhance safety in aviation operations by indicating which habitats are more or less prone to the risk of bird occurrences and the associated level of risk.

Keywords: birdstrike; airport operations area; geographical modelling; species distribution model (SDM); wildlife hazard management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Inauguração do Aeroporto Santos Dumont (RJ) em 1936.	19
Figura 2 - Primeiro conflito pelo espaço aéreo, quando Calbraith Rogers colidiu com uma revoada de pássaros em 1912	21
Figura 3 - Colisões reportadas e frota nacional de aviões, anualmente	22
Figura 4 - Entorno do aeroporto Xi'an (China). Com pontos de ocorrência de colisão e uso e cobertura do solo como variável preditora para estimativa de locais com maior risco de colisão ao longo das diferentes estações do ano	25
Figura 5 – Mapa da área de estudo, aeroporto Internacional Marco Polo (Veneza) e gráfico com a distribuição dos agrupamentos de pássaros responsáveis pela maioria dos eventos de colisão nos quatro habitats amostrados.	26
Figura 6 - (a) Mapa área de estudo, base aérea de Ysterplaat (África do Sul) com a localização dos quadrantes de observação da avifauna. (b) Decréscimo das riquezas de espécies no ambiente urbano (c) Boxplot dos agrupamentos de pássaros e seu risco associado.....	27
Figura 7 - Resumo metodológico.....	35
Figura 8 - Localização dos 29 aeródromos amostrados e seus respectivos biomas	37
Figura 9 – Processo metodológico para cálculo do Risco Espécie Específico (REE), neste caso, foram coletados dados do total de ocorrência por espécie e a partir da reclassificação, determinados o grau de risco em caso de colisão com aeronave. ..	49
Figura 10 - Rotina de programação em R para validação de modelo	53
Figura 11 – (a) Gráfico em barra com proporção obtida de reportes de avistamento, colisão e quase colisão a partir de dados obtidos no Sistema de Gerenciamento de Risco Aviário (SIGRA). (b) Gráfico em barras indicando a proporção de dados segundo grau de identificação da espécie.	55
Figura 12 - Contagem de ocorrências de colisões e suas categorias (Efeito no voo, Dano e Dano maior), componentes da Frequência Relativa, que contabiliza o Risco associado a colisões entre aves e aeronaves.....	57
Figura 13 - Gráficos em barras empilhadas e normalizadas das variáveis e sua contribuição ao modelo em cada espécie de interesse amostrada	66
Figura 14 - Mapa de calor da probabilidade de ocorrências (variando de 0, probabilidade nula de ocorrência à 1 alta probabilidade de ocorrência da espécie) .	68

Figura 15 - Boxplot das EIA, ordenadas pela mediana da probabilidade de ocorrência, quanto mais escuras, menores probabilidades de ocorrências, quanto mais claras, maiores as medianas da ocorrência predita da espécie. O gráfico também representa em pontos os valores outliers (pontos fora da curva), além dos limites superiores e inferiores das amostras.	70
Figura 16 - Mapa de calor do número de colisões amostradas para as espécies de interesse aeroportuário.	72
Figura 17 - Conjunto de gráficos de dispersão para os 29 aeródromos amostrados. Em cada gráfico foi inserida a reta do efeito aleatório (em vermelho) e a reta média dos efeitos fixos (em cinza), no eixo y foram utilizados os valores do total de colisões amostradas e no eixo x a média de ocorrência predita nas espécies de interesse...74	74
Figura 18 - Gráfico QQ (Quartil-Quartil) dos resíduos para aferir a distribuição dos dados obtidos, neste caso os pontos dos dados não acompanham a linha vermelha (mensura tendência à normalidade dos dados)	75
Figura 19 - Mapa de calor do Risco Global das espécies de interesse aeroportuário	77
Figura 20 – Mapa de ocorrência predita da Marreca-parda (<i>Anas georgica</i>) no aeroporto Salgado Filho (RS).....	83
Figura 21 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça amarela (<i>Cathartes burrovianus</i>) no aeroporto Salgado filho (RS)	84
Figura 22 - Mapa de ocorrência predita da Marreca-parda (<i>Anas georgica</i>) no aeroporto Eurico de Aguiar Salles (ES).....	85
Figura 23 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça amarela (<i>Cathartes burrovianus</i>) no aeroporto Eurico de Aguiar Salles (ES).....	86
Figura 24 - Mapa de ocorrência predita da Marreca-parda (<i>Anas georgica</i>) no aeroporto Hercílio Luz (SC).....	87
Figura 25 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça amarela (<i>Cathartes burrovianus</i>) no aeroporto Hercílio Luz (SC).....	88
Figura 26 - Mapa de ocorrência predita da Marreca-parda (<i>Anas georgica</i>) no aeroporto de Congonhas (SP).....	89
Figura 27 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça amarela (<i>Cathartes burrovianus</i>) no aeroporto de Congonhas (SP).....	90
Figura 28 - Mapa de calor das ocorrências nos aeródromos em que foram analisados a probabilidade de ocorrência das espécies segundo o MOPEIA.....	99

Figura 29 - Imagem Sentinel-2 do São Paulo Catarina Aeroporto Executivo (SP). Neste caso podemos notar uma paisagem com extensa vegetação, preenchida pontualmente por usos do solo antropizados.	101
Figura 30 - Recorte do uso e cobertura do solo (Copernicus, 2021) para a ASA no São Paulo Catarina Aeroporto Executivo (SP). Neste caso, podemos observar a variabilidade dos tipos de uso do solo ao longo da Área de Estudo, tão quanto a predominância da vegetação perene.	102
Figura 31 - Imagem NDVI do São Paulo Catarina Aeroporto Executivo (SP)	103
Figura 32 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça preta (<i>Coragyps atratus</i>) no São Paulo Catarina Aeroporto Executivo(SP)	105
Figura 33 - Mapa de ocorrência predita do Quero-quero (<i>Carcara plancus</i>) no São Paulo Catarina Aeroporto Executivo(SP)	106
Figura 34 - Composição natural a partir de Imagens Sentinel-2 do Aeroporto Araçuaí (MG). Neste caso podemos notar a mudança nos tipos vegetacionais amostrados, agora muito mais arbustivos, preenchidos também contínuos florestais que preenchem uma proporção menor da paisagem.....	108
Figura 35 - Recorte do uso e cobertura do solo (Copernicus, 2021) para a ASA no Aeroporto Araçuaí (MG). Neste caso, podemos observar uma paisagem heterogênea com maior variedade de tipos de uso do solo ao longo da Área de Estudo.	109
Figura 36 - Imagem NDVI do Aeroporto Araçuaí (MG).....	110
Figura 37 - Recorte do uso e cobertura do solo (Copernicus, 2021) para a ASA no Aeroporto Araçuaí (MG). Neste caso, podemos observar uma paisagem heterogênea com maior variedade de tipos de uso do solo ao longo da Área de Estudo.	111
Figura 38 - Mapa de ocorrência predita do Papagaio-verdadeiro (<i>Amazona aestiva</i>) no Aeroporto Araçuaí (MG).	112
Figura 39 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça preta (<i>Coragyps atratus</i>) no Aeroporto Araçuaí (MG)	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quadro síntese de referências chave	24
Tabela 2 - Tabela dos 29 aeródromos amostrados no território nacional, constando sua classe e informações adicionais	39
Tabela 3 - Variáveis geológicas selecionadas, descrição sua descrição e hipóteses do estudo.....	42
Tabela 4 - Resultados da classificação das espécies segundo dados do SIGRA. Os resultados dos fatores de risco reclassificados, Avistamento, Tamanho, Colisão Múltipla, Frequência relativa e REE, quantificada a partir da soma dos fatores de risco.	58
Tabela 5 - Resultados modelagem das 89 espécies de interesse aeroviário brasileiro, o número de amostras utilizadas no treino e no teste de cada modelo. AUC e desvio padrão.	62
Tabela 6 - Resultados do Generalized Linear Mixed Model (Modelo linear generalizado misto) efeitos fixos para aferir a correlação entre a média de ocorrência predita de espécies da avifauna aeroportuária através do modelo MaxEnt e o número de colisões amostradas.....	73
Tabela 7 - Aeroportos contemplados para análise através de aplicação do MOPEIA.	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

ASA - Área de Segurança Aeroportuária

CAA – Colisões entre Aves e Aeronaves

CENIPA - Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos

ESO - Eventos de Segurança Operacional

ICAO - International Civil Aviation Organization

IPF – Identificação do Perigo a Fauna

MOPEIA-Modelagem Preditiva de Espécies de Interesse Aeroportuário

MRGEIA - Modelo de Risco Global das Espécies de Interesse Aeroportuário

PGRF – Programa de Gerenciamento do Risco da Fauna

RBAC - Regulamentos Brasileiros da Aviação Civil

REE- Risco Espécie Específico

SGSO - Sistema de Gerenciamento de Segurança Operacional

SIGRA - Sistema de Gerenciamento de Risco Aviária

TCSP - Total de Colisões Amostradas em cada Espécie

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	14
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. Implantação de aeródromos no Brasil e marcos da segurança aeroportuária	18
2.2. Contextualização dos eventos de colisão entre avifauna e aeronaves	21
2.3. Principais expoentes no estudo do fenômeno de colisões entre aeronaves e avifauna	23
2.4 Ecosystemas, abordagem sistêmica e aplicabilidade ao entendimento do fenômeno de risco da fauna	28
2.5 Modelo de distribuição de espécies MaxEnt	30
2.5.1 Otimização do modelo de distribuição de espécie através da Máxima entropia (Maximum Entropy)	31
2.5.2 Configurações do modelo MaxEnt.....	32
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Critério de escolha da área de estudos	36
3.2 Seleção e obtenção dos dados	41
3.2.1. Obtenção de ocorrências de Espécies de Interesse Aeroportuário (EIA)	41
3.2.2 Obtenção de dados geocológicos.....	42
3.2.3 Obtenção dos limites geográficos das áreas de segurança aeroportuária amostradas.....	45
3.3 Tratamento dos dados obtidos	45
3.3.1 Tratamento dos dados de input para o modelo MaxEnt	46
3.4 Cálculo de Risco espécie-específico (REE)	47
3.5 Método de Modelagem de Ocorrência Preditada das Espécies de Interesse Aeroportuário (MOPEIA), calibração do modelo. e avaliação do modelo ...	51
3.5.1 Transformação do output pós modelagem	52
3.5.2 Validação de modelos de ocorrência predita de espécies através do Generalized linear mixed model (GLMM)	52
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	54
4.1. Resultados Risco Espécie Específico (REE)	54
4.1.1 Caracterizando o banco de dados obtido e análise de frequência de colisão	54

4.1.2 Estimando Risco espécie específico (REE).....	58
4.2 Resultados do Modelo de Ocorrência Predita das Espécies de Interesse Aeroportuário (MOPEIA) em 29 aeródromos brasileiros	61
4.2.1 Performance dos modelos obtidos	62
4.2.2 Avaliação da distribuição das probabilidades segundo MOPEIA em 29 aeródromos brasileiros	67
4.2.3 Validação do Modelo de Ocorrência Predita das Espécies de Interesse Aeroportuário (MOPEIA) através de Generalized Linear Mixed Model (GLMM).	71
4.2.4 Modelo de Risco Global das Espécies de Interesse Aeroportuário (MRGEIA)	75
CAPÍTULO 5 - DISCUSSÃO	78
5.1 Análise de Risco espécie específico (REE), potencialidades e limitações do ranqueamento de espécies	78
5.2 Modelagem preditiva de espécies de interesse aeroportuário (MOPEIA)	81
5.2.1 Limitações e melhorias na aplicação do MOPEIA como ferramenta na manutenção da segurança aeroportuária	93
5.2.2 Aplicabilidade do Modelo de Ocorrência Predita das Espécies de Interesse Aeroportuário (MOPEIA)	95
CONCLUSÕES	115
REFERÊNCIAS	118
ANEXOS	124
APÊNDICES	124

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Colisão entre aeronaves e aves (CAA) é um fenômeno de grande preocupação à segurança da aviação mundial, uma vez que nas últimas décadas tem se tornado cada vez mais presente (THORPE 2005, DOLBEER, 2015) resultando não somente no aumento do risco a milhões de passageiros que utilizam este meio de transporte, mas também no acréscimo dos custos de operação e manutenção de aeronaves, com perdas estimadas em 1.28 bilhões de dólares anualmente a aviação mundial (ALLAN & OROSZ, 2001). Tais estimativas podem ser subestimadas, dado que a reportes dos incidentes são muitas vezes são incompletos (DOLBEER, 2015)

No Brasil, as perdas econômicas em virtude de eventos de colisão com aves são estimadas em 10 milhões de reais anualmente. Somente no período entre 2011-2020 foram 9.801 colisões com aves, sendo que 20 destas colisões alteraram drasticamente a normalidade de operação e a segurança da aeronave (CENIPA, 2021).

Na compreensão do fenômeno da CAA brasileiro, o estabelecimento de Áreas de Segurança Aeroportuária (ASA), que corresponde a um círculo de 20 quilômetros, estabelecido a partir do centro da pista, tem sido adotada e se tornado cada vez mais relevante para a identificação de locais de riscos no sítio aeroportuário e na criação de esforços de controle e mitigação de comunidades de aves locais (ICAO, 2013a). Tal fato decorre de 85% à 90% das colisões com aves ocorrerem nas fases de aproximação, pouso, decolagem e subida da aeronave, sendo que tais manobras ocorrem abaixo dos 1066 metros de altitude, dentro dos 20 quilômetros da ASA.

No contexto brasileiro, apesar de existirem estudos abordando fatores de risco que podem atrair e fomentar a ocorrência de fauna na ASA, assim como análises da composição e riqueza das espécies (CARVALHO *et al*, 2016, NOVAES & CINTRA, 2015), não há estudos que abordam o problema das colisões entre aves e aeronaves utilizando como ferramenta a modelagem preditiva de espécies, sendo que esta ferramenta possui a capacidade de estimar os locais com maior risco de ocorrência de aves através da combinação entre pontos de ocorrência das espécies e diversas variáveis ambientais (clima, relevo, hidrografia, volume de vegetação, temperatura, precipitação, uso e cobertura do solo, entre outras). Dessa forma, é possível identificar a distribuição das áreas de potencial risco de ocorrência de aves e quais variáveis

mais contribuem para explicar a distribuição das aves no entorno do aeródromo (PHILLIPS *et al*, 2006, 2008; OWENS *et al*. 2013). Nesse sentido, a modelagem preditiva se torna peça fundamental às ações de Identificação de Perigo de Fauna (IPF), e na elaboração de ações mitigatórias, que visam alterar a distribuição da fauna em ASAs e diminuir o risco e gravidade de eventos de Colisão entre Aves e Aeronaves (CAA).

Partindo-se do princípio de que aeródromos estão inseridos em um contexto ecológico e geográfico definido previamente à sua instalação, e que tais contextos trazem consigo desafios únicos a cada aeródromo, faz-se necessário a compreensão do histórico e de quais critérios foram, ou deixaram de ser utilizados na criação da infraestrutura aeroviária no território brasileiro, bem como as consequências para o atual quadro da AA.

Inicialmente a implantação de aeroportos ocorria em regiões distantes de núcleos urbanos, com a escolha do local de criação de aeródromos sendo realizada muitas vezes a partir de parâmetros físicos como a topografia, ao tipo de solo, a disponibilidade de água no subsolo e fatores relacionados ao planejamento urbano, como acessibilidade e baixa densidade populacional (ROBINSON *et al*, 2021)

Com a expansão dos grandes centros urbanos, ocorre então a conversão de habitats pela ocupação humana e alteração do uso e cobertura do solo, impactando a distribuição e riqueza de espécies de avifauna que integram as regiões aeroportuárias (JEFFERY & BUSCHKE, 2019, KOH *et al* 2006). Tal ocupação é influenciada por fatores biofísicos e socioeconômicos que alteram a composição da paisagem ao longo de uma escala espaço-temporal, sendo proximamente relacionadas a variáveis socioeconômicas, ecológicas e geográficas (SHAO *et al*, 2020).

A alteração da riqueza, distribuição e habitat das espécies está diretamente relacionada ao aumento no risco de colisão entre a fauna local e aeronaves. Em decorrência desta alteração temos por exemplo, o aumento de incidência de espécies sinantrópicas, ou seja, que não somente se adaptaram, mas que se beneficiaram da artificialização e homogeneização do habitat (SOLDATINI *et al*, 2010). A presença de Urubus-de-cabeça-preta (*Coragyps atratus*), por exemplo, está proximamente relacionada ao acúmulo de matéria orgânica, fornecida por aterros sanitários, feiras-livres e ausência de uma política de gestão dos resíduos. Quando analisados em

conjunto com características pertinentes a seu hábito alimentar saprófago, pode-se então traçar como cada uma das variáveis presentes nestes habitats promove a atração destas aves nas proximidades de aeródromos, e, portanto, propicia maiores riscos às operações nos aeródromos brasileiros (NOVAES, 2013).

Outros fatores de risco associados a presença na AA residem em comportamentos únicos de cada espécie, sendo importante a compreensão aprofundada de sua interação com o meio abiótico, algo que varia de acordo com a temporada, horário do dia, clima e outros fatores. Estas variações afetam diretamente a disponibilidade de alimentos, habitats e, portanto, a escolha do local para alimentação e reprodução do espécime, alterando, por exemplo, os ciclos migratórios das espécies, período também de maior ocorrência de CAA (DOLBEER, 2006, 2015; CENIPA, 2021).

Dentro deste contexto, atualmente algumas medidas mitigatórias são tomadas como parte da gestão de risco a fauna, em concordância com o Regulamento Brasileiro Da Aviação Civil (RBAC) nº 153, sendo definida como medida mitigatória,

Modificação ou exclusão de habitat, implicando na alteração, manutenção ou eliminação dos seguintes ambientes ou estruturas que provoquem atração de aves (ANAC, 2014 p.12-13).

Através das quais são realizados o controle de focos atrativos e afugentamento da fauna listados e descritos na Instrução Suplementar nº164.

- (i) vegetação;
- (ii) focos secundários;
- (iii) valas de drenagem e galerias de água pluvial;
- (iv) dispositivos de esgotamento sanitário e sistema de tratamento de efluentes;
- (v) lagos, áreas alagadiças e demais formas de acúmulo de água;
- (vi) resíduos sólidos;
- (vii)edificações, equipamentos e demais implantações;
- (viii) sistema de proteção; e
- (ix) demais estruturas que possam atrair aves e outros animais
- (x) Realocação ou eliminação dos espécimes causadores do risco (ANAC, 2014 p.11)

Conforme indicado, a mitigação do risco de fauna visa combater os possíveis focos de ocorrência de espécies de risco à aviação, procurando alterar o habitat tornando-o menos adequado aos espécimes. Tal iniciativa presente neste projeto visa atender a

demanda pela identificação de habitats que possam fomentar o crescimento de espécies de aves, que cada vez mais apresentam risco a aviação brasileira. O desenvolvimento de ferramentas capazes de prever a localização, quantificar e qualificar o grau de risco relativo aos habitats presentes nas ASA se tornam centrais no processo de mitigação dos riscos associados a avifauna (COCCON, 2015; NOVAES; 2015; CENIPA, 2016), trazendo assertividade necessária para a implantação e manutenção destas ações e a redução da CAA.

Com base na discussão apresentada, o objetivo geral desta pesquisa é modelar o potencial de ocorrência de avifauna em aeródromos brasileiros.

Os objetivos específicos são:

- (1) Aferir a qual o grau de correlação entre a ocorrência predita das espécies e o número de colisões a fim de validar o modelo de distribuição de espécies obtido.
- (2) Extrapolar os resultados obtidos a outros aeródromos nacionais.
- (3) Definir o grau de severidade associado as espécies da avifauna aeroviária

Considerando que os aeródromos brasileiros, apesar de sua variação espacial, possuem problemas relacionados ao risco de fauna como fator em comum, presume-se que os pontos de ocorrência das espécies e suas respectivas variáveis preditoras possam ser utilizadas para estimar a probabilidade de ocorrência da avifauna através de um modelo de distribuição de espécies e que através desta ferramenta pode-se estimar o seu grau de adequabilidade aos habitats tanto dentro das ASAs quanto fora destes.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será discutido o histórico do fenômeno de colisão entre aves e aeronaves (CAA), logo traçando um panorama no contexto dos aeródromos brasileiros. Tal recapitulação parte do princípio que não existem, até o momento, artigos em que estejam descritos panoramas da história e prevalência dos eventos CAA à nível nacional.

2.1. Implantação de aeródromos no Brasil e marcos da segurança aeroportuária

No Brasil, a história da construção de seus primeiros aeródromos ocorreu na década de 1930, quando no mesmo período ocorreu a inauguração dos aeroportos de Congonhas - Deputado Freitas Nobre, Santos Dumont no Rio de Janeiro, (Figura 1), Pampulha-Carlos Drummond de Andrade em Belo Horizonte, Bacacheri em Curitiba, entre outros. A princípio estas obras tinham como objetivo a inserção econômica destas capitais ao mundo. Inadvertidamente, a implantação destes aeródromos, pautado em um viés econômico tem como característica em comum a ausência de estudos em relação à avifauna local e possíveis riscos associados previamente a sua instalação (ROBINSON *et al*, 2021; JEFFREY & BUSCHKE, 2019).

Tal fenômeno pode ser exemplificado em aeroportos que alteraram propositalmente sua região do entorno com intuito de atrair maior influxo de turismo, à exemplo do represamento do Rio das velhas para a implantação da Lagoa da Pampulha em 1938. Tal proximidade com o novo corpo d'água, implantado nas mediações do Aeroporto da Pampulha, trouxe consigo o aumento de recursos naturais disponíveis à avifauna, fator comumente associado a atração de aves, e, portanto, ao aumento do risco de CAA (SHAO, 2020).

Figura 1 - Inauguração do Aeroporto Santos Dumont (RJ) em 1936



Fonte: Arquivo nacional (1936).

Um importante marco na aviação mundial foi a Convenção Civil Internacional, que ocorreu em Chicago, no ano de 1944, da qual o Brasil é estado membro permanente. Hoje conhecida como *International Civil Aviation Organization* (ICAO), esta instituição tem como objetivo principal a cooperação a nível internacional, visando o desenvolvimento do mercado da aviação (ICAO, 2013). Neste contexto, foram criadas regras aplicáveis a todos os seus estados membro, com enfoque na segurança, eficiência e regularidade das operações aéreas de maneira ampla e padronizada, alcançando a totalidade da infraestrutura de navegação aérea brasileira.

A ICAO possui um papel fundamental no desenvolvimento da segurança aeroportuária nacional, e sua gestão de riscos à aviação. O anexo 13, intitulado *Aircraft Accident and Incident Investigation* (ICAO, 2013), por exemplo, se tornou nos anos seguintes a base para a criação do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) no Brasil, instituído a partir 1971 sendo referência em análises técnico-científicas de incidentes aeroportuários, incluindo dentre diversas instâncias, os incidentes envolvendo aves e aeronaves, estudando suas causas e compondo a criação de bancos de dados que registram e compilam a ocorrência de CAA.

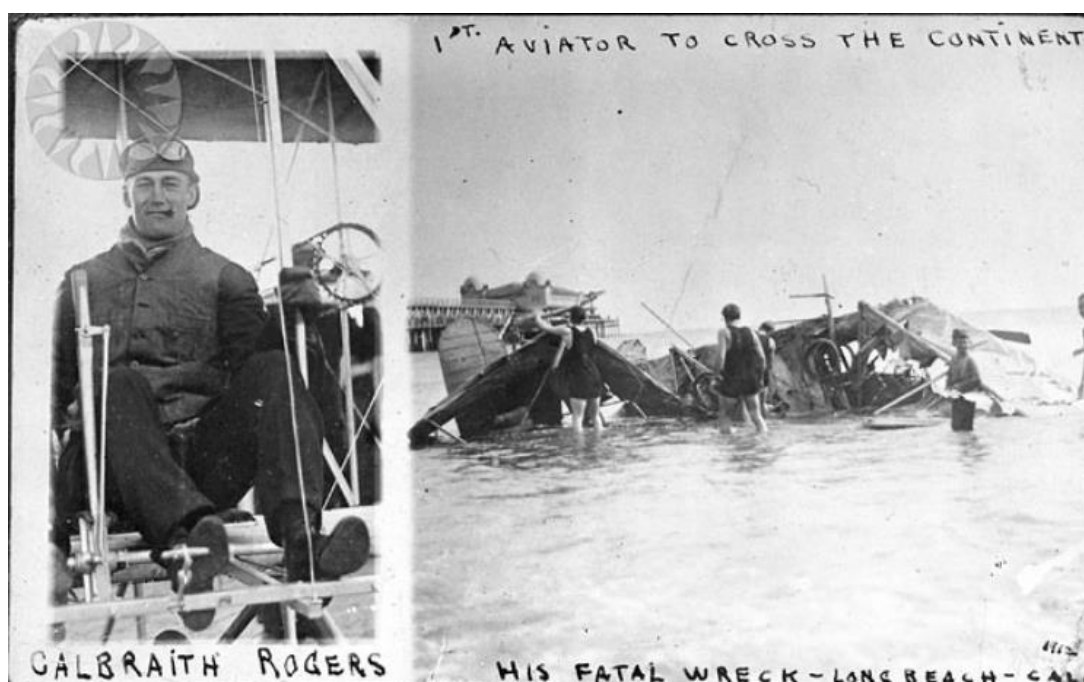
No ano seguinte à criação do CENIPA, foi instituída a Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO) através da Lei nº 5.862, sendo deste órgão central a responsabilidade por gerir técnica, operacional e administrativamente a infraestrutura aeroportuária, com enfoque no aprimoramento e homogeneização da infraestrutura aeroportuária dos maiores aeroportos do país. Já em 2005, ocorre a criação da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) através da lei Nº11.182, assumindo as atribuições até então do Departamento de Aviação Civil (DAC), e consigo o papel de manutenção da segurança aeroportuária.

É importante ressaltar que, segundo a própria ANAC, o Brasil, embora signatário da ICAO, tem historicamente adotado protocolos de gerenciamento de risco de fauna e de colisão de fauna derivados de estudos desenvolvidos em outros países. As autoridades federais de aviação reconhecem a necessidade de desenvolvimento no Brasil, não só pela sua dimensão territorial e mega diversidade faunística, mas também pela grande frota e aeronaves e número de voos com origem, destino ou intersecção no espaço aéreo, de estudos geograficamente abrangentes, capazes de contribuir com a segurança no transporte aéreo.

2.2. Contextualização dos eventos de colisão entre avifauna e aeronaves

Colisões entre aves e aeronaves são tão antigas quanto a aviação. Em setembro de 1905 os irmãos Wright registraram o primeiro conflito por espaço entre a humanidade e a avifauna quando uma revoada de pássaros atingiu o seu *Flyer III*, matando um dos pássaros, sendo também o primeiro registro de uma colisão deste tipo. Já em abril de 1912, a primeira fatalidade foi registrada quando Calbraith Rogers, em um voo de exibição atingiu uma revoada de gaivotas que atravessava a região (Figura 2). A tendência de conflitos pelo espaço aéreo se intensificou ao longo das décadas seguintes, com aumento da frequência e da velocidade dos voos, principalmente com a criação da aviação civil, em meados da década de 50 (MCKEE *et al*, 2016).

Figura 2 – Primeira morte registrada de tripulante, quando Calbraith Rogers colidiu com uma revoada de pássaros em 1912



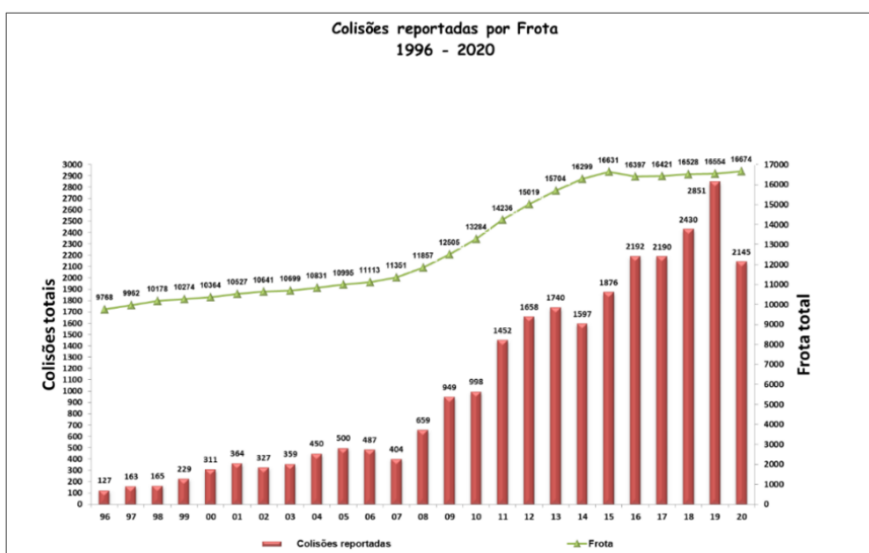
Fonte: Adaptado de McKee *et al* (2016).

Entre as primeiras duas décadas do século 21, o número total de eventos CAA tem aumentado constantemente em países como Estados Unidos, Canadá e Austrália sendo que, de 5-10% do total das CAA foram classificados como de alto risco, pois causaram danos à fuselagem e/ou que alteraram a normalidade da operação do voo, obrigando o operador a arrematar (METZ *et al*, 2020), voltando para o aeroporto de origem, para realização pouso de emergência.

Esta tendência internacional se reflete em aeródromos brasileiros, na medida em que dados do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) apontam uma tendência de aumento na frota de aeronaves em circulação e no número total de colisões, com um aumento de 20% nos últimos 4 anos (Figura 3). O questionamento do presente estudo circunda o aumento nas colisões reportadas e as variáveis podem atuar em tal circunstância, investigando o potencial de modelos de distribuição de espécies em prever os habitats de maior risco de ocorrência de aves e seu papel no aumento de incidência de eventos CAA.

Figura 3 - Colisões reportadas e frota nacional de aviões, anualmente

Ano	Colisões reportadas	Frota
1996	127	9.768
1997	163	9.962
1998	165	10.178
1999	229	10.274
2000	311	10.364
2001	364	10.527
2002	327	10.641
2003	359	10.699
2004	450	10.831
2005	500	10.995
2006	487	11.113
2007	404	11.351
2008	659	11.857
2009	949	12.505
2010	998	13.284
2011	1.452	14.236
2012	1.658	15.019
2013	1.740	15.704
2014	1.597	16.299
2015	1.876	16.631
2016	2.192	16.397
2017	2.190	16.421
2018	2.430	16.528
2019	2.851	16.554
2020	2.145	16.674



Fonte: Anuário de Risco de Fauna 2011-2020 (CENIPA, 2020).

2.3. Principais expoentes no estudo do fenômeno de colisões entre aeronaves e avifauna

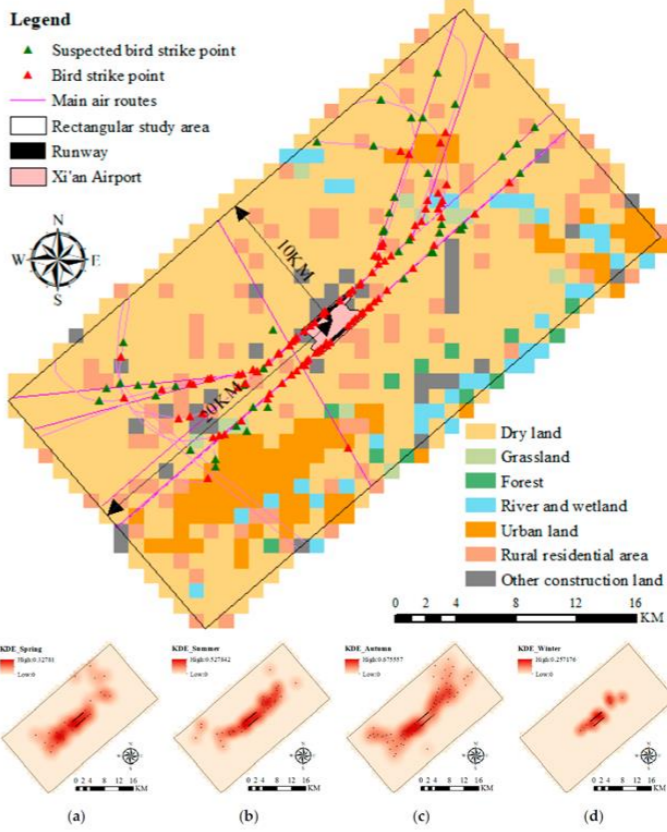
Para compreensão e contextualização deste tema, os principais autores no campo de estudo do risco de avifauna foram obtidos através de uma revisão sistemática da literatura (MOHER et al., 2009), onde foram utilizados três bancos agregadores de artigos científicos amplamente utilizados: *Web of Science*, *Search Scopus* e *Science direct*.

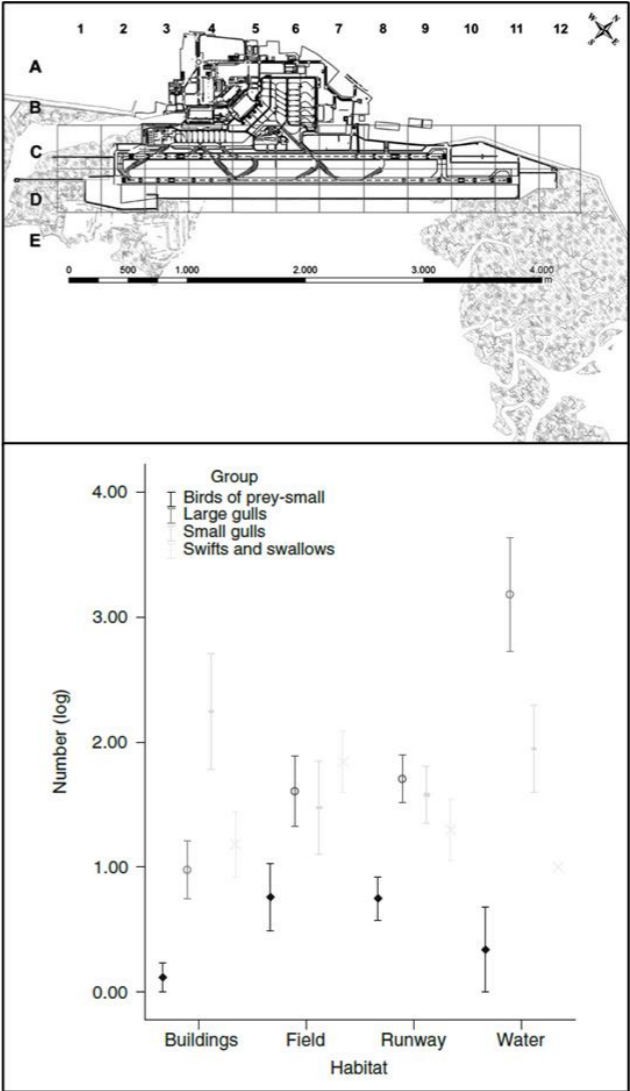
Uma particularidade deste campo de estudo reside no fato de existirem compilações de dados de colisão em relatórios nacionais (CENIPA) e internacionais (ICAO), que trazem a luz discussões relevantes com relação à segurança aeroportuária, tal literatura também foi adicionada de maneira complementar.

Destaca-se que a partir deste levantamento bibliográfico foram obtidos 38 artigos científicos complementados por relatórios nacional e internacionalmente relevantes. Tais artigos discutem em diferentes contextos as características da paisagem na ASA. As literaturas de maior relevância a esta pesquisa foram compiladas e contextualizadas na Tabela 1.

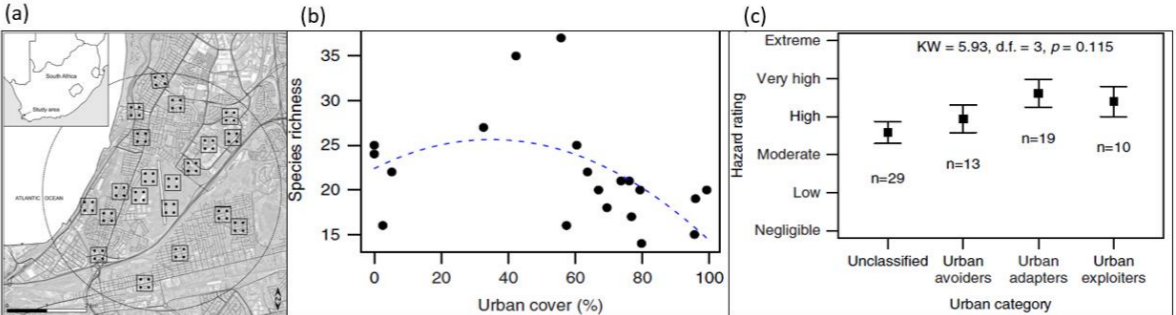
Tabela 1 - Quadro síntese de referências chave

Título	Autores	Relevância	Figuras
<i>Assessing the risks: An analysis of wildlife-strike data at the three busiest Brazilian airports (2011-2016)</i>	Flavio A. C. Mendonça (2018)	Este artigo contextualiza o problema de colisões entre avifauna e aeronaves no contexto brasileiro de aeroportos de classe 3 e 4. A partir de dados do CENIPA, o autor discute, horários e temporadas com maior probabilidade de ocorrência de CAA e sua relação com a legislação utilizada na gestão de risco da fauna. Desta forma, este compõe a presente análise pois apresenta uma análise dos aeródromos que tem como premissa a quantidade de movimentações realizadas por estes. Tal discussão incute a necessidade desta abordagem tanto pelo ponto de vista legislativo, quanto pelo objetivo da análise, quantificar os riscos a partir de dados. Ademais, este estudo elenca importantes fontes de dados nacionais relacionadas a colisões com avifauna, tão quanto discute as suas deficiências.	-
<i>A Land-Use Perspective for Birdstrike Risk Assessment: The Attraction Risk Index</i>	Francesca Coccon (2012)	Este <i>paper</i> aborda o fenômeno da CAA através do ponto de vista do uso e cobertura do solo, traçando correlações entre algumas classes específicas e a presença/ausência de espécies da avifauna associadas a colisões. Também foi abordada a ecologia das espécies e seu comportamento migratório, a partir da qual foram elaborados índices de risco por temporada. A partir desta metodologia foi então desenvolvido um índice de risco de atração, uma ferramenta central a esta pesquisa, uma vez que estuda correlações entre a ecologia das espécies e a paisagem na ASA. Apresenta-se a variação espaço-temporal do risco de eventos de colisão ao longo do ano, além de sua maior associação com usos do solo agrícolas tão quanto o papel da hidrografia local. Esta discussão foi o ponto de partida da presente pesquisa, que visa, dentre outras variáveis, analisar o uso e cobertura do solo, sua variação espaço temporal e sua interação com o comportamento migratório das espécies da avifauna.	-
<i>Civil airports from a landscape perspective: Multi-scale approach</i>	Pfeiffer (2018)	Este artigo investiga a paisagem, explorando características como nível de fragmentação e composição para determinar quais características estão correlacionadas ao aumento na incidência de CAA a partir de dados de 98 aeroportos Norte Americanos, concluindo que paisagens mais homogêneas tendem a promover mais recursos para espécies generalistas. Características como arranjo mais próximo e corpos d'água também foram positivamente associados ao aumento da incidência de colisões.	-
<i>Wildlife collisions with aircraft: A missing component of land-use planning for airports, a review</i>	Bradley F. Blackwell (2009)	Neste artigo de revisão, Blackwell traz pautas importantes relacionadas à quais usos do solo apresentam maior risco a segurança aeroportuária como lixões, aquicultura, agricultura, refúgios da vida silvestre, lagoas e abatedouros. O autor também discute ações mitigatórias, apontando medidas mitigatórias correspondentes a cada uso e cobertura do solo de maior risco, assim como a extensão geográfica em que tais medidas devem ser tomadas, partindo-se da premissa em que devemos sempre que possível diminuir áreas que possam servir como abrigos e/ou fontes de alimento para espécies da avifauna. Esta discussão é central nesta pesquisa, uma vez que busca-se determinar quais tipos de uso e cobertura do solo estariam mais associadas a espécies da avifauna potencialmente nocivas a segurança operacional de aeronaves.	-

Título	Autores	Relevância	Figuras
<p><i>Key Factors Assessment on Bird Strike Density Distribution in Airport Habitats: Spatial Heterogeneity and Geographically Weighted Regression Model</i></p>	<p>Shao et al (2020)</p>	<p>Neste artigo, Shao utiliza a análise da riqueza de espécies, densidade populacional, densidade da vegetação e distância entre a pista de pouso e o corpo d'água mais próximo no aeroporto Xi'an, combinado a um modelo de regressão espacial ponderado e Moran local e global, para determinar quais variáveis estão positivamente correlacionadas à maior incidência de colisões na área que compreende 800 quilômetros quadrados a partir do centro da pista. O autor traz importantes contribuições ao campo de estudo das colisões, já que indica que quanto maior a diversidade e riqueza de avifauna, maior é sua contribuição para o aumento no número total de colisões, seguido pela distribuição de recursos aquáticos e pela densidade populacional, apontando a importância de estudo que trazem consigo conceitos ecológicos para que o diagnóstico de risco de fauna. Estas discussões e conclusões são importantes para a presente pesquisa, visto que procura-se avaliar como as variáveis se comportam espaço-temporalmente, e como sua conformação e associação as habita locais podem apontar regiões de maior incidência de risco de ocorrência de aves, e seu risco a segurança de operação das aeronaves (Figura 4).</p>	<p>Figura 4 -</p> <p>Figura 4 - Entorno do aeroporto Xi'an (China). Com pontos de ocorrência de colisão e uso e cobertura do solo como variável preditora para estimativa de locais com maior risco de colisão ao longo das diferentes estações do ano</p>  <p>Fonte: Adaptado de Shao <i>et al.</i> 2020</p>

Título	Autores	Relevância	Figuras																									
<i>Height Distribution of Birds as Recorded by Collisions with Civil Aircraft</i>	Richard A. Dolbeer <i>et al</i> (2006)	O enfoque desta pesquisa, tal como sugerido pelo seu título, foi a altura em que ocorrem os impactos entre a avifauna e aeronaves. A partir da análise de 38.961 eventos CAA conclui-se que 99% destes eventos ocorreram abaixo dos 609m, faixa de altitude em que ocorrem a decolagem e o pouso das aeronaves. Este estudo foi pioneiro em apontar o habitat em que os aeroportos se encontram como fator central na resolução do problema das colisões entre aves e aeronaves, e por este motivo se encontra como ponto central da discussão desta pesquisa.	-																									
<i>An ecological approach to birdstrike risk analysis</i>	Cecilia Soldatini & Vyron Georgalas & Patrizia Torricelli & Yuri V. Albores-Barajas (2009)	Este artigo traz consigo o estudo aprofundado da ecologia das espécies e seus padrões comportamentais como forma de gerar uma ferramenta analítica capaz de definir o risco de colisão em períodos, locais e espécies específicas. As discussões e conclusões nele elucidadas contribuem para o estudo de aspectos comportamentais como o comportamento gregário assim como características físicas, como o tamanho e o peso das aves. Tais variáveis compõem análise de risco não somente da probabilidade de colisão, mas de sua gravidade. Um aspecto importante dessa análise integrada a presente pesquisa, foi o enfoque na criação de agrupamentos de espécies (Figura 5) e habitats-chave atuantes na região aeroportuária.	<p data-bbox="1581 636 2751 751">Figura 5 – Mapa da área de estudo, aeroporto Internacional Marco Polo (Veneza) e gráfico com a distribuição dos agrupamentos de pássaros responsáveis pela maioria dos eventos de colisão nos quatro habitats amostrados.</p>  <table border="1" data-bbox="1869 787 2457 1806"> <caption>Data from Figure 5 Graph: Number (log) of birds by group and habitat</caption> <thead> <tr> <th>Habitat</th> <th>Birds of prey-small</th> <th>Large gulls</th> <th>Small gulls</th> <th>Swifts and swallows</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Buildings</td> <td>~0.1</td> <td>~1.0</td> <td>~1.1</td> <td>~1.2</td> </tr> <tr> <td>Field</td> <td>~0.8</td> <td>~1.6</td> <td>~1.5</td> <td>~1.8</td> </tr> <tr> <td>Runway</td> <td>~0.7</td> <td>~1.7</td> <td>~1.6</td> <td>~1.9</td> </tr> <tr> <td>Water</td> <td>~0.4</td> <td>~3.2</td> <td>~2.0</td> <td>~1.0</td> </tr> </tbody> </table>	Habitat	Birds of prey-small	Large gulls	Small gulls	Swifts and swallows	Buildings	~0.1	~1.0	~1.1	~1.2	Field	~0.8	~1.6	~1.5	~1.8	Runway	~0.7	~1.7	~1.6	~1.9	Water	~0.4	~3.2	~2.0	~1.0
Habitat	Birds of prey-small	Large gulls	Small gulls	Swifts and swallows																								
Buildings	~0.1	~1.0	~1.1	~1.2																								
Field	~0.8	~1.6	~1.5	~1.8																								
Runway	~0.7	~1.7	~1.6	~1.9																								
Water	~0.4	~3.2	~2.0	~1.0																								

Fonte: Adaptado de Soldatini *et al.* (2009)

<p><i>Urbanization around an airfield alters bird community composition, but not the hazard of bird-aircraft collision</i></p>	<p>Roderick F. Jeffery & Falko T. Buschke (2018)</p>	<p>Neste artigo, Roderick e Falko discutem o papel da urbanização e sua mudança espaço temporal sob a avifauna local e qual o impacto deste fenômeno sobre os eventos de CAA na cidade do Cabo, África do Sul. Os autores concluem que apesar das mudanças na riqueza e densidade populacional das espécies, a homogeneização dos habitats não resulta na diminuição de seu risco (Figura 6).</p> <p>Tal resultado é importante nesta pesquisa, dado que os aeródromos estão inseridos, em sua maioria, em ambientes parcialmente ou totalmente urbanizados. Esta discussão serve como forma de suplantar o planejamento de planos mitigatórios em um contexto de interações complexas, em constante alteração e que estão inseridas, inequivocadamente, em um contexto social.</p>	<p>Figura 6 - (a) Mapa área de estudo, base aérea de Ysterplaat (África do Sul) com a localização dos quadrantes de observação da avifauna. (b) Decréscimo das riquezas de espécies no ambiente urbano (c) Boxplot dos agrupamentos de pássaros e seu risco associado.</p>  <p>Fonte: Jeffery & Buschke (2018)</p>
<p><i>Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States (1990-2014)</i></p>	<p>Richard A. Dolbeer, Sandra E. Wright, John R. Weller, Amy L. Anderson, Michael J. Begier (2015)</p>	<p>Além de artigos científicos, uma importante fonte de informações são os relatórios técnicos criados por instituições governamentais em diversos países integrantes da International Civil Aviation Organization (ICAO), em que são realizadas compilações de dados de colisão coletados ao longo de décadas. Neste relatório foram compiladas 156.114 colisões durante 25 anos, reunindo dados da aviação Norte Americana que apontam um crescimento de 127% no número total de colisões que em 71% dos casos analisados, ocorre abaixo dos 152,4 metros de altitude. Tais dados, apesar do contexto Norte americano, trazem consigo importantes tendências no campo de estudo do gerenciamento do risco de fauna, pois apontam as perdas econômicas geradas em virtude das colisões que alcançam 631,8 milhões de dólares no período amostrado assim como medidas de mitigação mais efetivas para diferentes grupos faunísticos.</p>	<p>-</p>
<p>Anuário de Risco de Fauna 2011-2020</p>	<p>Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos CENIPA (2020)</p>	<p>Neste anuário, assim como no apresentado acima, os autores coletaram informações referentes as colisões entre avifauna e aeronave como forma de orientar medidas de controle de fauna. Este relatório é importante no contexto desta pesquisa uma vez que traz diversas características sobre os eventos CAA na aviação brasileira. Este relatório também aponta algumas limitações do CENIPA, dado que somente 30% das colisões são efetivamente reportadas e destas, somente 53% tiveram alguma identificação da espécie, esta é uma condição fundamental para que sejam elaboradas medidas de controle de espécies-problema.</p>	<p>-</p>

Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

2.4 Ecossistemas, abordagem sistêmica e aplicabilidade ao entendimento do fenômeno de risco da fauna

Neste capítulo será definido *a priori* o conceito de abordagem holística e posteriormente será discutida a definição para o contexto de análises sistêmicas segundo Haigh, aplicado ao contexto do risco da fauna aeroportuária. Ademais, será tratada a forma como modelo de distribuição de espécies MaxEnt foi adotado para que fosse possível estimar a probabilidade de ocorrência ao longo do campo de estudos.

Adotada como premissa no presente estudo, a definição de Eugene Odum (*The strategy of Ecosystem Development*, 1969), reflete uma abordagem holística no estudo da ecologia, enfatizando as interrelações e interdependências entre os diferentes componentes do sistema:

“The ecosystem, or ecological system, is considered to be a unit of biological organization made up of all the organisms in a given area (that is, “the community”) interacting with the physical environment so that a flow of energy leads to characteristic trophic structure and material cycles within the system” (ODUM, 1969, p. 4).

Esta importante definição trouxe o enfoque da pesquisa ecológica de abordagens reducionistas que se concentram em variáveis isoladas para abordagens mais integradas que buscam entender fenômenos ecológicos como sistemas complexos e interconectados (ANEXO A).

O presente estudo, apresenta como prerrogativa de sua elaboração uma aplicação da teoria dos sistemas a fenômenos geográficos, sendo neste caso adotada a abordagem holística dos sistemas, que visa compreender interconexões e *feedbacks* entre diferentes componentes de um sistema, sendo útil à compreensão das complexas interações entre as espécies e o ambiente ao qual estão inseridas. Ao adotar a visão abrangente, parte-se da premissa de que a interdisciplinaridade é essencial para compreensão das dinâmicas que atuam nos ecossistemas, ou seja, que a análise de espécies individuais ou elementos do ambiente isoladamente podemos incorrer na criação de uma visão potencialmente enviesada ou incompleta do sistema.

Neste aspecto, a análise sistêmica é uma ferramenta para compreensão de fenômenos complexos, tendo por base a estudo da ligação entre as componentes que

interagem entre si e partilham do ambiente, tornando-se intrinsecamente relacionadas, tal como definida por Haigh (1985):

“A system, then, is a wholeness that is created by the integration of its component parts. It is an entity containing a structured set of components whose structural and functional inter-relationships create an entirety which was not implied by those components in disaggregation.” (HAIGH, 1985, p.2)

A partir desta visão, o fenómeno do risco de avifauna, e sua relação com a probabilidade de colisão com aeronaves deve ser compreendido através das intersecções entre seus componentes bióticos e abióticos. Com enfoque nos pontos que ligam os componentes deste sistema, e trazem consigo maior ou menor risco as operações aeroviárias (ANEXO B).

2.5 Modelo de distribuição de espécies MaxEnt

A análise preditiva da distribuição de espécies tem sido cada vez mais utilizada como uma ferramenta para estimar e compreender a distribuição espacial de nossa biodiversidade, sendo empregada em diversos campos do conhecimento relacionados a gestão da diversidade biológica.

A modelagem preditiva é um campo multidisciplinar que utiliza de variáveis ambientais preditoras (temperatura, precipitação, elevação, declividade, dentre outras) combinados com dados presença de espécies (pontos de ocorrência da espécie) para explicar a distribuição probabilística de uma espécie ao longo de uma escala espacial pré-determinada, em outras palavras, para estimar a probabilidade de ocorrência de uma espécie através da simulação de sua interação com o ecossistema ao seu entorno:

Na modelagem de distribuição de espécies (MDEs) através do MaxEnt, a distribuição predita da espécie é realizada a partir da coleta dos valores de cada variável preditora em cada célula amostrada ao longo da totalidade da escala espacial. A probabilidade de ocorrência $\Pr(y = 1|z)$ é calculada a partir dos pontos de presença de acordo com a fórmula:

$$\Pr(y = 1|z) = \frac{f_1(\mathbf{z})\Pr(y = 1)}{f(\mathbf{z})}$$

O componente da fórmula $f_1(\mathbf{z})$, representa a densidade de probabilidade das covariáveis ao longo do campo de estudo onde a espécie está presente. $\Pr(y = 1)$ representa a prevalência da espécie amostrada, ou seja, a proporção de locais ocupados pela espécie. e finalmente, onde $f(\mathbf{z})$ representa a densidade de probabilidade das covariáveis em toda a paisagem amostrada. No caso, modelos de máxima entropia com este utilizam, dentre as muitas possibilidades de distribuição aquela mais próxima do $f(\mathbf{z})$. Esta aproximação tem como principal consequência o aumento da precisão da estimativa do modelo pois leva em conta tanto os dados de ocorrência das espécies quanto sua distribuição geral das variáveis ambientais ao longo da paisagem amostrada (ELITH, 2010).

2.5.1 Otimização do modelo de distribuição de espécie através da Máxima entropia (*Maximum Entropy*)

A palavra entropia, tal como definido por Shannon (1948), descreve o grau de aleatoriedade de um sistema físico. Neste campo de estudo da distribuição de espécies, a máxima entropia se refere ao cálculo de probabilidade de ocorrência da espécie ocorrer longo da totalidade da área de estudo (ou máxima quantidade de escolhas) amostrada, inclusive nas localizações em que a probabilidade de ocorrência da espécie é, *a priori*, desconhecida. A entropia é calculada a partir da seguinte fórmula:

$$Ent(p) = -k \sum_{x \in X} p(y|x) \ln (p(x|y))$$

Onde a Entropia $Ent(p)$ é calculada a partir da probabilidade de ocorrência da espécie $p(y|x)$ que é calculada em cada ponto ao longo da superfície de estudo, sendo utilizada para otimizar os pesos utilizados no modelo logístico (referência à fórmula anterior) e estimar a localização da ocorrência da espécie assim como os locais onde sua prevalência será menor de acordo com as características do meio ambiente.

Tal aplicação serve como forma de utilizar a totalidade do campo de estudo para o cálculo da probabilidade de ocorrência da espécie, utilizando toda a entropia (ou escolhas possíveis) para se estimar sua presença.

2.5.2 Configurações do modelo MaxEnt

As configurações utilizadas durante o processo de modelagem variam de acordo com as variáveis ambientais utilizadas, assim como em relação a biologia das espécies-alvo do estudo. Sendo importante definir as principais configurações utilizadas nesta pesquisa assim como os critérios de escolha utilizados em cada caso, e as recomendações correspondentes a cada utilização de acordo com a literatura. Não há uma única solução para todos os casos, e são necessários testes para ajustar o modelo de acordo com o objetivo da pesquisa e dados disponíveis.

Neste caso, primeiro deve-se definir o percentual de utilizado para realização de teste do desempenho do modelo. A abordagem mais comum reside em utilizar 25% dos dados para testes. Porém há na literatura recomendações que variam de 20% até 50% (ELITH *et al.* 2011), enquanto alguns autores preconizam a utilização de diversos percentuais de teste para avaliar o desempenho do modelo para cada um (WISZ *et al.* 2008).

Outra importante configuração é o número de pontos de fundo (*Max number of Background points*), podendo influenciar significativamente o desempenho do modelo. Tal como o percentual utilizado para testes, não há um consenso com relação a melhor abordagem, sendo necessário ajustes ao longo da construção do modelo.

Sendo assim, alguns autores apontam para o uso de um número mínimo de pontos de ocorrência das espécies com relativa distância entre si para reduzir efeitos de autocorrelação espacial, assim como análise de autocorrelação das pseudoausências (também chamado de *background data*), que são as variáveis ambientais utilizadas no campo de estudo, para reduzir o risco de sobreajustes nos resultados da modelagem (PHILLIPS *et al.* 2004, 2008).

Por fim, apresenta-se o número de replicações, e o tipo de execução das réplicas. O primeiro se refere o número de execuções do modelo para estimar a distribuição da espécie, sendo que enquanto alguns autores apontam para o uso de um número baixo de réplicas para modelos simples e aumentar o número para modelos mais complexos (MEROW *et al.* 2014). Outros apontam para uso de um mínimo de 10 réplicas para reduzir o efeito da estocasticidade (WARREN & SEIFERT, 2011). A segunda configuração das replicações se refere ao tipo de execução utilizada na replicação,

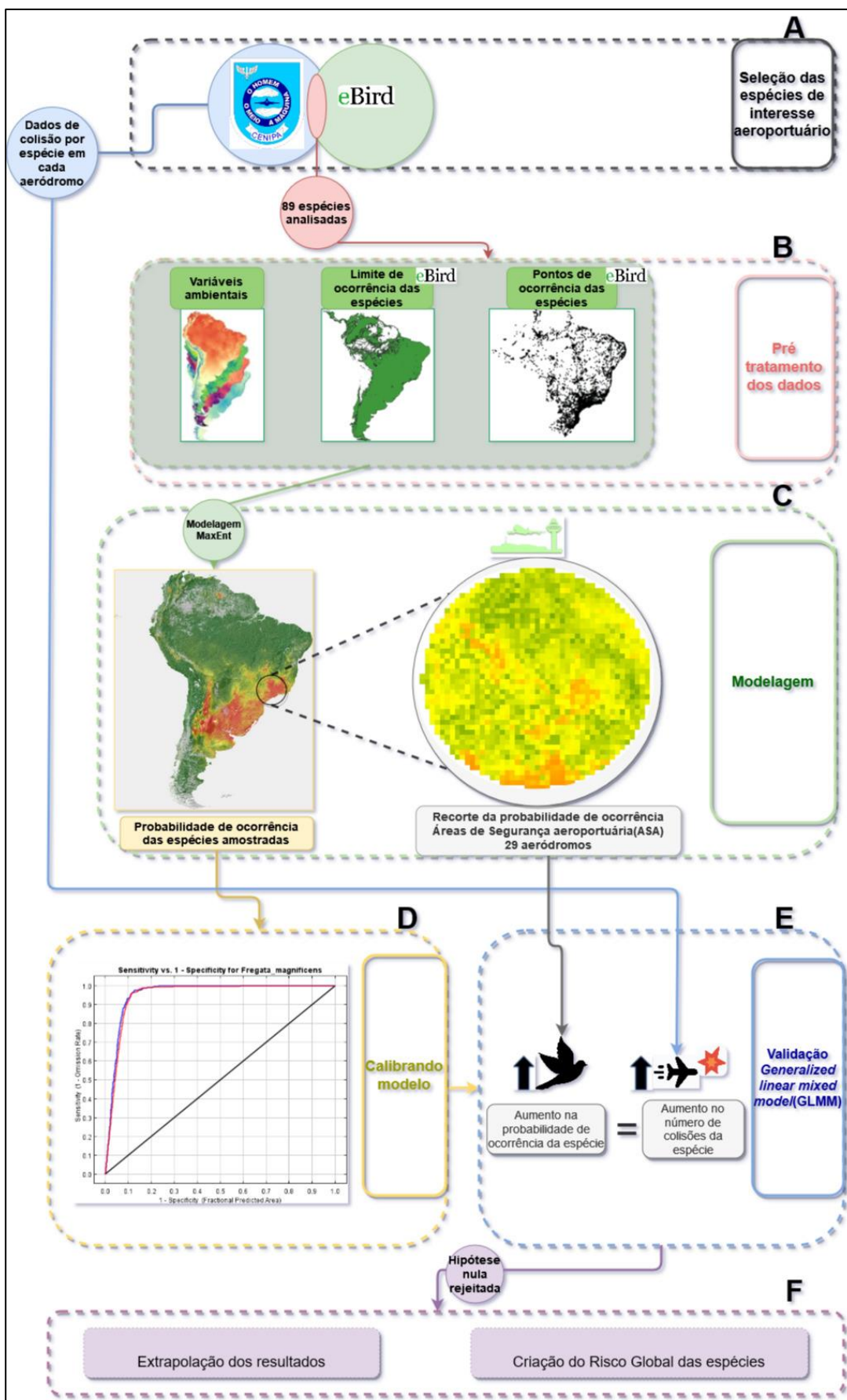
podendo ser *bootstrap*, *crossvalidate* ou *subsample*, definidos como diferentes maneiras em que se particiona os dados em conjuntos de treinamento e teste durante o ajuste do modelo.

O método *bootstrap* seleciona aleatoriamente um subamostra dos dados para usar como conjunto de treinamento em cada replicação. O método *crossvalidate* divide os dados em um número especificado de subconjuntos e testa o modelo em cada um enquanto uso os demais subconjuntos para o treinamento do modelo. O *subsample* seleciona aleatoriamente um percentual especificado dos dados para uso como conjunto de treinamento em cada replicação. Os dados remanescentes são utilizados para o teste do modelo.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Estabeleceu-se um resumo metodológico síntese (Figura 7) onde são detalhadas as etapas de elaboração e implementação deste trabalho. Inicialmente, em suma, aborda-se o critério de seleção dos aeródromos amostrados e então a seleção e coleta de dados de ocorrência das espécies do banco de dados *eBird Observation Dataset*, utilizados em associação às variáveis preditoras amostradas (Figura 7 B) para que então seja possível a construção da modelagem das espécies através do modelo MaxEnt.

Figura 7 - Resumo metodológico



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

3.1 Critério de escolha da área de estudos

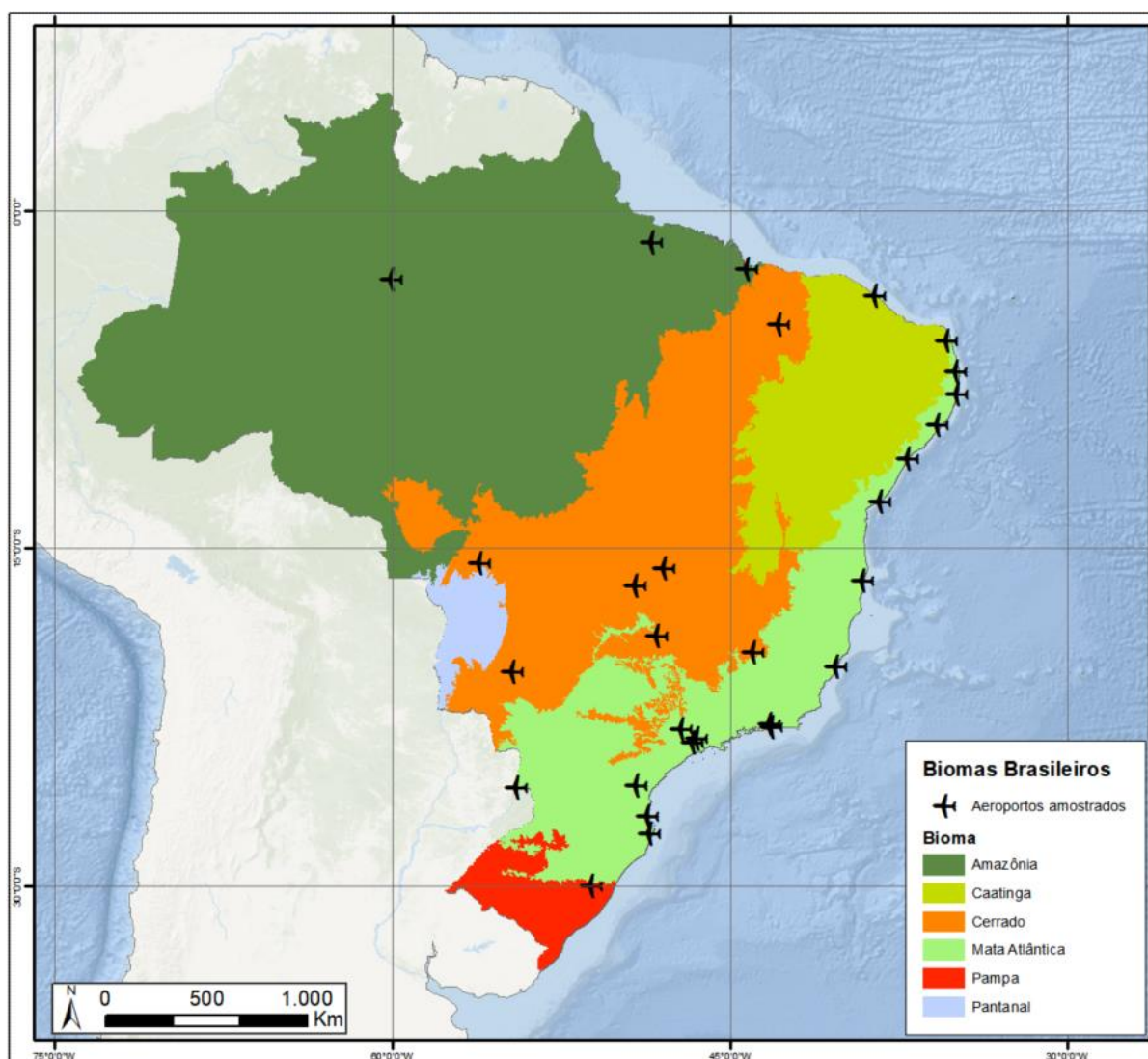
A região da modelagem de ocorrência da avifauna de interesse compreende os limites da América do Sul, espaço amostral a partir do qual foram recortadas as variáveis ambientais preditoras utilizadas na modelagem de risco de ocorrência da avifauna (Figura 7 B). Tal área foi escolhida (além das fronteiras do território brasileiro), tendo-se em conta que:

- (1) Processos ecológicos não correspondem a fronteiras políticas pois os padrões de distribuição das espécies são determinados por variáveis ecológicas, topográficas, disponibilidade de nutrientes dentre outros fatores, que desconhecem fronteiras artificiais (PHILLIPS *et al.*, 2006)
- (2) Limitar a região de estudo traria consigo uma representação incompleta do padrão de distribuição das espécies amostradas, causando um potencial viés as conclusões obtidas através da modelagem preditiva, enquanto impacta também a sua aplicabilidade (JIMÉNEZ-VALVERDE *et al.* 2008, ELITH *et al.*, 2010)

É importante destacar que dentre os mais de 3.000 aeródromos brasileiros, 29 foram selecionados (Figura 8). A escolha por estes aeródromos advém do fato destes possuírem o Programa de Gerenciamento do Risco da Fauna (PGRF) e realizarem a Identificação do Perigo da Fauna (IPF), obrigatório para aeroportos enquadrados nas classes III ou IV, que segundo disposto pelo Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC 153), possuem mais de 1 milhão de passageiros processados no período de um ano.

A prerrogativa de possuírem PGRF e IPF é importante, pois de acordo com o Plano Básico de Gerenciamento de Risco de Fauna (PBGRF) tal como disposto na PCA 3-3/2020, tais aeroportos tornam públicos os dados de colisão com a avifauna através do Sistema de Gerenciamento de Risco Aviário (SIGRA), foco do presente estudo, que visa, a partir de dados qualitativos e quantitativos fornecidos por este banco de dados compreender quais espécies ocorrem nos aeródromos brasileiros e qual a probabilidade de sua ocorrência ao longo da área de estudo amostrada.

Figura 8 - Localização dos 29 aeródromos amostrados e seus respectivos biomas



Fonte: IBGE (2012) e ANAC (2012). Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2022.

Ressalta-se que estas duas classes de aeródromos são responsáveis por mais de 90% das movimentações de aeronaves em território nacional e englobam 75% do total de colisões com a avifauna (CENIPA, 2021) e que portanto, segundo disposto pelo Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC-153), os aeródromos de classe III ou IV são responsáveis pelo estabelecimento de um plano de ações para o gerenciamento e mitigação do risco da fauna através do controle de focos atrativos, manutenção de áreas verdes e sistemas de drenagem na ASA, sendo o presente estudo necessário como forma de estimar a presença de espécies de risco a operações aviárias, de maneira a nortear ações de mitigação da avifauna nos aeródromos brasileiros de maneira assertiva e escalável.

Tais regulamentos atualmente aplicados à aviação civil de grande porte como a criação de um PGRF e IPF não se aplicam a aeroportos privados, militares e aeroportos com menos de 1 milhão de passageiros processados (ANAC, 2021), não sendo contemplados por este trabalho.

A compreensão das características naturais e antrópicas de um ambiente é crucial para identificação e estudo das dinâmicas e processos envolvidos no mesmo. Sendo a escolha de 29 aeroportos (Tabela 2), em biomas distintos (Figura 8), relevante para evidenciar como as variáveis preditoras, neste caso, os componentes ecológicos e biofísicos que integram a região no entorno dos aeródromos podem influenciar a distribuição de espécie (NILSSON *et al.* 2021).

Tabela 2 - Tabela dos 29 aeródromos amostrados no território nacional, constando sua classe e informações adicionais

Código OACI	CIAD	Nome	UF	Latitude	Longitude	Altitude	Classe (Portaria Nº 7736/2022 e alterações posteriores)	Bioma
SBAR	SE0001	SANTA MARIA	SE	10° 59' 7" S	37° 4' 24" W	7 m	Classe III	Mata Atlântica
SBBE	PA0001	INTERNACIONAL DE BELÉM/VAL DE CANS/JÚLIO CEZAR RIBEIRO	PA	1° 23' 5" S	48° 28' 44" W	17 m	Classe III	Amazônia
SBBR	DF0001	PRESIDENTE JUSCELINO KUBITSCHEK	DF	15° 52' 16" S	47° 55' 7" W	1066 m	Classe IV	Cerrado
SBCF	MG0001	TANCREDO NEVES	MG	19° 37' 28" S	43° 58' 19" W	829 m	Classe IV	Cerrado/Mata Atlântica
SBCG	MS0001	CAMPO GRANDE	MS	20° 28' 10" S	54° 40' 13" W	559 m	Classe III	Cerrado
SBCT	PR0001	AFONSO PENA	PR	25° 31' 54" S	49° 10' 34" W	911 m	Classe IV	Mata Atlântica
SBCY	MT0001	MARECHAL RONDON	MT	15° 39' 0" S	56° 7' 3" W	188 m	Classe III	Cerrado/Pantanal
SBEG	AM0001	EDUARDO GOMES	AM	3° 2' 28" S	60° 3' 2" W	80 m	Classe III	Amazônia
SBFI	PR0002	CATARATAS	PR	25° 36' 1" S	54° 29' 6" W	240 m	Classe III	Mata Atlântica
SBFL	SC0001	HERCÍLIO LUZ	SC	27° 40' 13" S	48° 33' 9" W	5 m	Classe III	Mata Atlântica
SBFZ	CE0001	PINTO MARTINS	CE	3° 46' 33" S	38° 31' 56" W	25 m	Classe IV	Caatinga
SBGL	RJ0001	RIO DE JANEIRO/GALEÃO – ANTÔNIO CARLOS JOBIM	RJ	22° 48' 36" S	43° 15' 2" W	9 m	Classe IV	Mata Atlântica
SBGO	GO0001	SANTA GENOVEVA/GOIÂNIA	GO	16° 37' 57" S	49° 13' 16" W	747 m	Classe III	Cerrado
SBGR	SP0002	GUARULHOS - GOVERNADOR ANDRÉ FRANCO MONTORO	SP	23° 26' 8" S	46° 28' 23" W	750 m	Classe IV	Mata Atlântica
SBJP	PB0001	PRESIDENTE CASTRO PINTO	PB	7° 8' 54" S	34° 57' 1" W	66 m	Classe III	Caatinga

Código OACI	CIAD	Nome	UF	Latitude	Longitude	Altitude	Classe (Portaria Nº 7736/2022 e alterações posteriores)	Bioma
SBKP	SP0003	VIRACOPOS	SP	23° 0' 25" S	47° 8' 4" W	661 m	Classe IV	Mata Atlântica
SBMO	AL0001	ZUMBI DOS PALMARES	AL	9° 31' 2" S	35° 47' 30" W	118 m	Classe III	Mata Atlântica
SBNF	SC0002	MINISTRO VICTOR KONDER	SC	26° 52' 43" S	48° 39' 3" W	5 m	Classe III	Mata Atlântica
SBPA	RS0001	SALGADO FILHO	RS	29° 59' 38" S	51° 10' 16" W	4 m	Classe IV	Pampa/Mata Atlântica
SBPS	BA0002	PORTO SEGURO	BA	16° 26' 17" S	39° 4' 40" W	51 m	Classe III	Mata Atlântica
SBRF	PE0001	GUARARAPES - GILBERTO FREYRE	PE	8° 7' 35" S	34° 55' 22" W	10 m	Classe IV	Mata Atlântica
SBRJ	RJ0002	SANTOS DUMONT	RJ	22° 54' 36" S	43° 9' 45" W	3 m	Classe IV	Mata Atlântica
SBSG	RN0001	GOVERNADOR ALUIZIO ALVES	RN	5° 46' 8" S	35° 21' 59" W	83 m	Classe III	Caatinga
SBSL	MA0001	MARECHAL CUNHA MACHADO	MA	2° 35' 13" S	44° 14' 10" W	54 m	Classe III	Amazônia
SBSP	SP0001	CONGONHAS	SP	23° 37' 34" S	46° 39' 23" W	802 m	Classe IV	Mata Atlântica
SBSV	BA0001	DEPUTADO LUÍS EDUARDO MAGALHÃES	BA	12° 54' 31" S	38° 19' 21" W	20 m	Classe IV	Mata Atlântica
SBTE	PI0001	SENADOR PETRÔNIO PORTELLA	PI	5° 3' 38" S	42° 49' 28" W	67 m	Classe III	Cerrado
SBUL	MG0002	TEN CEL AVIADOR CÉSAR BOMBONATO	MG	18° 53' 1" S	48° 13' 31" W	943 m	Classe III	Cerrado
SBVT	ES0001	EURICO DE AGUIAR SALLES	ES	20° 15' 29" S	40° 17' 11" W	3 m	Classe III	Mata Atlântica

Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos, Melo, 2023.

3.2 Seleção e obtenção dos dados

Nos itens a seguir serão descritas as etapas de seleção e obtenção dos dados de Espécies de Interesse Aeroportuário (EIA), bem como os dados geocológicos e de limites das Áreas de Segurança Aeroportuárias (ASAs). Nos tópicos seguintes será abordado o tratamento das informações obtidas para sua modelagem através do MaxEnt.

3.2.1. Obtenção de ocorrências de Espécies de Interesse Aeroportuário (EIA)

Os registros de ocorrência de espécie foram obtidos através de duas fontes distintas de dados, segundo o primeiro fruto do Sistema de Gerenciamento de Risco Aviária (SIGRA), onde são compiladas e registradas as espécies da avifauna presentes em colisões com aeronaves ou avistamentos de espécimes ao longo das ASAs as quais foram descritas nos tópicos a seguir.

3.2.1.1 Avifauna aeroportuária segundo Sistema de Gerenciamento de Risco Aviário (SIGRA)

Como forma de caracterizar a fauna aeroportuária foram utilizadas informações do banco de dados SIGRA onde são registradas informações com relação ao avistamento e colisão com a fauna aeroportuária, bem como a localização aproximada, altitude e outras informações relevantes ao entendimento do fenômeno CAA. Foram compilados dados de espécies da fauna aeroportuária a partir do período de dezembro de 2011 até dezembro de 2021. Inicialmente, foi realizada análise das espécies envolvidas em colisões e avistamentos nos 29 aeródromos brasileiros de classe 3 e 4. A partir deste levantamento foi então elaborada a listagem das EIA.

Nesta etapa foram excluídas ocorrências (avistamentos, colisões ou quase colisões) que não possuíam a identificação a nível de espécie, tão quanto ocorrências que envolviam espécimes que não pertencem a avifauna (ex: colisões com mamíferos etc.).

3.2.1.2 Pontos de ocorrência da avifauna Sul-americana *eBird Observation Dataset*

Como forma de se estimar a ocorrência de espécies de interesse aeroportuário (EIA) ao longo da escala espacial da América do Sul, foram obtidos pontos de ocorrência

junto ao Banco de dados EOD – *eBird Observation Dataset* através do agregador GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*) (AUER *et al*, 2022).

No banco de dados *BirdLife International* foram também obtidos arquivos vetoriais dos limites de ocorrência das espécies sul-americanas de avifauna amostrada, utilizadas posteriormente na modelagem da probabilidade de ocorrência das espécies. Tal método visa garantir que a ocorrência predita da espécie ocorrerá dentro de um limite geográfico pré-estabelecido aquele espécime (Figura 7 B).

3.2.2 Obtenção de dados geocológicos

A partir desta premissa, a escolha das variáveis foi realizada de acordo com hipóteses pré-estabelecidas, necessárias à compreensão final do resultado gerado através da modelagem e que, a probabilidade de presença da AA pode estar ligada a probabilidade de contato com aeronaves. A Tabela 3 a seguir apresenta as hipóteses para cada variável preditora utilizada na modelagem de ocorrência das espécies.

Tabela 3 - Variáveis geocológicas selecionadas, descrição sua descrição e hipóteses do estudo

Variável amostrada	Descrição	Hipótese	Fonte	Tipo
Hipsometria	Padrão de elevação do terreno na área de estudo	Presença ou ausência de determinadas espécies de acordo com a altitude média da área	SRTM - 2018	Contínua
Declividade	Padrão de inclinação do relevo a área de estudo	Terrenos planos são propícios para ocorrência de certas espécies, outras espécies se beneficiam com variação na declividade.	SRTM - 2018	Contínua
NDVI	Quantidade de água na folha da planta	Há correlação positiva entre florestas em estágio de desenvolvimento tardio e maior probabilidade de ocorrência de avifauna	Copernicus – 2021,	Contínua
Uso e cobertura do solo	Usos agrícolas/agropecuários e outros associados à maior incidência de avifauna	Na presença de tipos de uso do solo associados à maior acúmulo de matéria orgânica, há maior probabilidade de fauna	Copernicus - 2021	Catagórica
Temperatura anual média	Média das temperaturas ao longo do ano.	Tolerância térmica limita o local de reprodução e coleta de recursos das espécies	WorldClim - 2020	Contínua
Varição Média Diurna	Diferença entre temperaturas máxima e mínima diárias.	Aves podem preferir áreas com padrões de temperatura diária estáveis.	WorldClim - 2020	Contínua

Variável amostrada	Descrição	Hipótese	Fonte	Tipo
Isotermalidade	Quantifica a oscilação das temperaturas diurnas em relação às oscilações sazonais (anuais) de verão para inverno.	Presença/ausência de espécies irá variar de acordo com oscilações sazonais	WorldClim - 2020	Contínua
Sazonalidade da Temperatura	Variação da temperatura ao longo do ano.	Mudanças sazonais na temperatura afetam a época de migração e reprodução.	WorldClim - 2020	Contínua
Temperatura Máxima do Mês Mais Quente	Maior temperatura no mês mais quente.	Altas temperaturas podem limitar a distribuição de algumas espécies.	WorldClim - 2020	Contínua
Temperatura Mínima do Mês Mais Frio	Menor temperatura no mês mais frio.	Este fator pode afetar o alcance de espécies	WorldClim - 2020	Contínua
Variação Anual da Temperatura	Diferença entre temperaturas máxima e mínima anuais.	Flutuações de temperatura podem determinar a distribuição das espécies	WorldClim - 2020	Contínua
Temperatura Média do Trimestre Mais Chuvoso	Média da temperatura no trimestre mais chuvoso.	A reprodução e a busca por alimento podem coincidir com temperaturas favoráveis.	WorldClim - 2020	Contínua
Temperatura Média do Trimestre Mais Seco	Média da temperatura no trimestre mais seco.	Condições de seca podem afetar a disponibilidade de comida e água.	WorldClim - 2020	Contínua
Temperatura Média do Trimestre Mais Quente	Média da temperatura no trimestre mais quente.	Períodos mais quentes podem afetar os hábitos de nidificação e alimentação.	WorldClim - 2020	Contínua
Temperatura Média do Trimestre Mais Frio	Média da temperatura no trimestre mais frio.	Estratégias de sobrevivência no inverno podem depender da tolerância ao frio.	WorldClim - 2020	Contínua
Precipitação Anual	Quantidade total de chuva em um ano.	Quanto maior a precipitação, maior a disponibilidade de recursos hídricos, que podem atrair espécies de aves.	WorldClim - 2020	Contínua
Precipitação do Mês Mais Chuvoso	Quantidade de chuva no mês mais chuvoso.	A reprodução e a disponibilidade de alimentos podem ser afetadas pela quantidade de chuva.	WorldClim - 2020	Contínua
Precipitação do Mês Mais Seco	Quantidade de chuva no mês mais seco.	A escassez de água pode limitar a distribuição das espécies.	WorldClim - 2020	Contínua
Sazonalidade da Precipitação	Variação na quantidade de chuva ao longo do ano.	A variação na quantidade de chuvas pode afetar a adequabilidade das espécies	WorldClim - 2020	Contínua
Precipitação do Trimestre Mais Chuvoso	Quantidade de chuva no trimestre mais chuvoso.	A disponibilidade de fontes de água pode afetar a adequação do habitat.	WorldClim - 2020	Contínua

Variável amostrada	Descrição	Hipótese	Fonte	Tipo
Precipitação do Trimestre Mais Seco	Quantidade de chuva no trimestre mais seco.	Estratégias de resistência à seca podem determinar a presença/ausência de espécies	WorldClim - 2020	Contínua
Precipitação do Trimestre Mais Quente	Quantidade de chuva no trimestre mais quente.	Padrões de chuva podem afetar a abundância de alimentos e nidificação, que podem impactar a distribuição das espécies	WorldClim - 2020	Contínua
Precipitação do Trimestre Mais Frio	Quantidade de chuva no trimestre mais frio.	Umidade adequada durante as estações frias pode impactar a distribuição das espécies.	WorldClim - 2020	Contínua

Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Como parte deste trabalho, foi construído um banco composto de imagens coletadas para as 19 variáveis climáticas do *WorldClim*, comumente utilizadas na modelagem preditiva de espécies (HIJMANS, *et al*, 2005, FICK & HIJMANS 2017). Também foram compilados dados do modelo de elevação (MDE), utilizado para análises da hipsometria e declividade, (Figura 7 B) adquiridos junto a biblioteca *raster* (HIJMANS *et al*, 2023) em ambiente de programação R e recortadas para a limite da América do Sul.

Também foram obtidas imagens de satélite Sentinel-2, utilizadas para quantificação da Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) que mede a intensidade da atividade de clorofila nas plantas, medida importante para determinação da acumulação de biomassa da vegetação, e, portanto, uma medida da quantidade de recursos disponíveis às espécies da Avifauna que compõe o espaço aeroportuário. Foram também obtidos dados de uso e cobertura do solo através da plataforma *Copernicus* para o ano de 2021, as classes de uso do solo foram reclassificadas em uma escala de 0 a 5 de acordo com o grau de atratividade da avifauna (COCCON, 2015).

A seleção de tais variáveis utilizadas para estimarmos a probabilidade de ocorrência das espécies e sua reclassificação foi feita a partir de levantamento bibliográfico extensivo com relação a modelagem preditiva de espécies da avifauna. Os critérios priorizaram o menor tempo de processamento, decorrente da extensão da área de estudo utilizada para estimar a probabilidade de ocorrências das espécies, tão quanto o poder de processamento necessário para estimar a presença para as diversas espécies amostradas e a capacidade do modelo em gerar boas estimativas a partir de

poucos pontos de dados, sendo neste caso escolhido o modelo MaxEnt, de máxima entropia (ELITH *et al*, 2010, PRIETO-TORRES, 2020, HIJMAN, 2005).

3.2.3 Obtenção dos limites geográficos das áreas de segurança aeroportuária amostradas

Para criação do banco de dados contendo a infraestrutura aeroportuária foram coletadas informações de dois bancos de informações, a classificação dos 29 aeródromos civis públicos brasileiros de classes 3 e 4, divulgado através da portaria 1.540/SIA, 2020. O arquivo vetorial contendo as localizações dos aeroportos brasileiros foi obtido a partir de dados disponibilizados pelo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE - Logística dos Transportes no Brasil), deste arquivo vetorial foram filtrados os 29 aeródromos de classe 3 e 4 amostrados.

3.3 Tratamento dos dados obtidos

A primeira etapa de preparação dos dados consistiu em recolher as informações das espécies da avifauna nos 29 aeroportos, a limpeza dos dados obtidos, retirando-se ocorrências não relacionadas a Avifauna Aeroportuária (AA), como colisões com mamíferos e outros grupos amostrados. A partir destas informações foram criadas:

- 1) Listagem das 89 espécies presentes na (AA) amostrada;
- 2) Criação da matriz de risco espécie-específica (MREE), detalhado adiante.

A partir da listagem inicial foi realizado o cruzamento com o banco de dados *eBird Observation Dataset* (AUER *et al*. 2009). Tal medida foi tomada de forma a obtermos uma amostra relacionada a biodiversidade brasileira nas regiões aeroportuárias, de modo a criar-se um modelo global, que pudesse estimar a probabilidade de ocorrência de espécies da AA na América do Sul, sendo possível posteriormente o recorte dos dados para a região das ASAs amostradas. Tal dado também contribuirá para a elaboração do Risco espécie específico (REE), sendo este último fator de risco relacionado ao agravamento em caso de colisão (Hu *et al*, 2020).

Ressalta-se, que pelo grande volume de dados obtidos (~22 *Gigabytes* através do banco de dados *eBird Observation Dataset* (AUER *et al*, 2022), o tratamento e cruzamento dos dados foi realizado utilizando-se a biblioteca *Dask*, no ambiente Python, em vista de sua capacidade em lidar com bancos de dados neste volume.

Tendo como base este banco de dados foram tomadas algumas medidas para evitar redundâncias que possam causar vieses no resultado, trazendo maior acurácia ao modelo de forma geral:

- 1) Remoção de Duplicatas em Latitudes e Longitudes;
- 2) Remoção de pontos fora da área de estudo;
- 3) Seleção dos pontos de ocorrência das espécies somente quando dentro dos limites do polígono de ocorrência natural das espécies;

As mesmas medidas foram tomadas para todas as espécies amostradas. As variáveis ambientais, devidamente representadas como camadas matriciais, foram recortadas para a América do sul e as suas resoluções espaciais ajustadas 1 km².

3.3.1 Tratamento dos dados de input para o modelo MaxEnt

O tratamento foi realizado em quatro etapas em ambiente Python através da biblioteca GDAL (*Geospatial data abstraction library*) utilizada para:

- (1) Reclassificar variáveis categóricas e transformá-las em matrizes contínuas;
- (2) Redimensionar as variáveis de maneira a preservar a isonomia da resolução espacial, sendo neste caso, utilizada a resolução de 1 km².
- (3) Utilizando-se o pacote SDMtoolbox (BROWN, 2014) no Arcmap (10.5) foram retiradas variáveis com alta correlação espacial.
- (4) Na etapa final, converter o formato dos arquivos, de *Tag Image File Format* (.tif) para .asc, formato aceito como entrada no software MaxEnt (PHILLIPS *et al.* 2004, 2006).

3.3.1.1 Tratamento dos dados de ocorrência

Com objetivo de evitar erros causados informações redundantes, foram removidos pontos de ocorrência duplicados assim como pontos com proximidade menor que 5 quilômetros entre si para assim reduzir o efeito da autocorrelação espacial (VELOZ, 2009, HIJMAN, 2012). Esta análise visa diminuir o viés de seleção da amostra, sendo que foram realizados testes com diversas distâncias e seus efeitos nos valores da Áreas Abaixo da Curva (AUC). Neste caso, para melhor performance do modelo foi escolhida uma distância que não influenciavam os resultados finais e ao mesmo

tempo mantinham uma boa performance às 89 espécies amostradas. Nesta etapa foi desenvolvido um código automatizado em ambiente *Rstudio* para esta demanda.

Os dados de ocorrência das espécies foram então subdivididos em dois, no banco de dados de teste, referente a 1/5 do banco total foram realizadas análises para aferirmos a contribuição de cada variável ao resultado do Modelo de distribuição, retirando variáveis redundantes que possam enviesar o modelo, trazendo consigo problemas relacionados ao sobreajuste (*overfitting*) (PRADHAN, 2016; ELITH *et al*, 2010).

Dentre outros testes, foi aferida a qualidade do modelo obtido a partir da curva ROC, gráfico no qual a métrica de qualidade está associada a grandeza do valor da área abaixo da curva. Este método é útil pois provê em uma única medida da performance do modelo, independente da escolha de fatores limitantes, sendo um método de classificação binária, que mede a sensibilidade (Porcentagem de observações positivas) e especificidade do modelo (taxa de verdadeiros-positivos obtidos, ou, taxa de ausência de erros) (PHILLIPS *et al*, 2004, 2006).

3.4 Cálculo de Risco espécie-específico (REE)

A definição de um risco específico a cada espécie é peça fundamental no gerenciamento da fauna aeroportuária, dadas as características únicas de cada espécie, tanto fisiologicamente quanto em suas interações com o meio físico-biótico. Tal aspecto desta problemática torna inviável a aplicação de uma solução única à um problema de natureza específica. Sendo necessária identificação de espécies-problema, tão quanto dos fatores que as atraem as ASAs. Daí surge, segundo O Manual de Gerenciamento de Risco de Fauna [MCA 3-8]:

“[...] urge a necessidade de aplicar medidas práticas para reduzir a exposição, probabilidade e severidade de colisões com a fauna, considerando condições ecológicas sítio-específicas, espécie-específicas e sazonais da região onde há operação de aeronaves. aeronaves. Esta condição requer a compreensão de variáveis que extrapolam a área aeronáutica (Engenharia), ratificando a importância da integração com profissionais de outras áreas de conhecimento (Ecologia) (CENIPA, 2017)

Tal como exposto, a necessidade de uma priorização das espécies no espaço aeroportuário com relação ao risco oferecido é peça fundamental na mitigação de possíveis riscos à aviação, em especial nos casos em que recursos para extensivos levantamentos seja, na prática, infactível. Desta maneira, foi priorizado um método de menor grau de complexidade tanto em sua aplicação em meio ao ambiente

aeroportuário, quanto na obtenção de dados de fácil acesso através do SIGRA, tornando a ferramenta de cálculo de risco espécie-específico, neste contexto aplicada à aeroportos de classe 3 e 4, replicável também à aeródromos de menor porte.

A primeira etapa para criação do risco espécie-específico foi a exclusão de ocorrências (colisões, avistamentos, dano, dano maior, efeito no voo) do banco de dados que:

- 1) Envolviam mais de uma espécie de ave;
- 2) Espécies que não aves, por exemplo o cachorro doméstico (*Canis lupus*);
- 3) Espécies não identificadas;
- 4) Não possuíam a identificação da espécie, somente da família;
- 5) Espécies fora do escopo dos 29 aeródromos amostrados;
- 6) Espécies que possuísem ao menos 1.500 pontos de ocorrência no banco de dados *eBird Observation Dataset*, de maneira a garantir representatividade da espécie na etapa de modelagem dos dados.

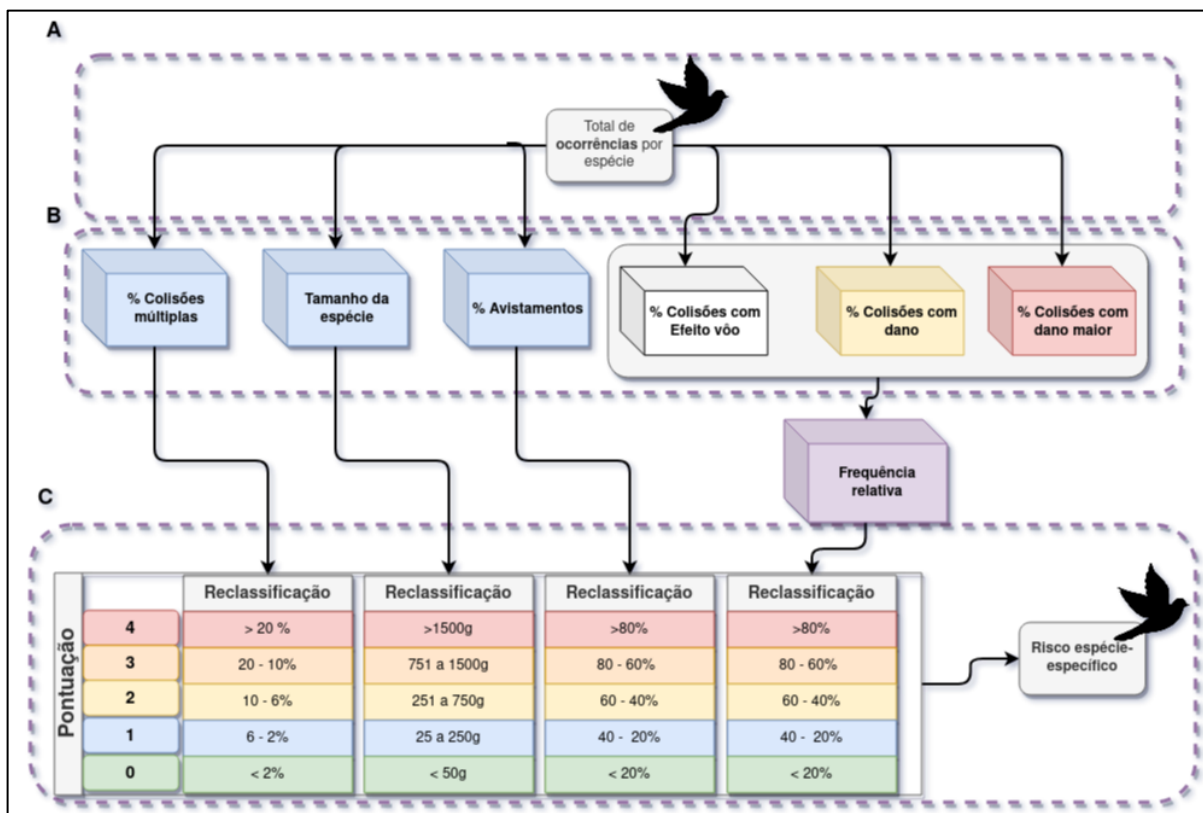
O segundo componente para esta análise foi o tratamento dos dados em ambiente de programação Python, de maneira à realizar tanto o pré processamento citado acima, quanto para a manipulação dos dados, que teve como enfoque a criação de um banco de dados que pudesse quantificar e classificar o risco inerente a cada espécie, ou seja, o risco que advém tanto de sua biologia, como seu porte, quanto da sua presença no ambiente aeroportuário, através da análise da quantidade de avistamentos por espécie. A manipulação dos dados consistiu em:

(A) Realizar a contagem do total de ocorrências de uma espécie em relação a cada uma das 6 categorias analisadas (Figura 9, A).

(B) Por categoria amostrada, calcular a porcentagem de ocorrência da espécie. No caso das colisões foi realizada a soma das porcentagens de maneira a calcular a Severidade relativa (Figura 9, B).

(C) As porcentagens obtidas para cada as espécies amostradas foram então reclassificadas a partir de uma pontuação que varia de 1 (menor risco agregado) à 5 (maior risco agregado) de maneira a gerar uma métrica de avaliação do grau de risco associado a cada espécie (Figura 9, C).

Figura 9 – Processo metodológico para cálculo do Risco Espécie Específico (REE), neste caso, foram coletados dados do total de ocorrência por espécie e a partir da reclassificação, determinados o grau de risco em caso de colisão com aeronave



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo.

Após reclassificação, a base de dados é composta pela frequência de ocorrência das espécies no ambiente aeroportuário, características comportamentais que podem agregar risco, como espécies que formam agrupamentos de vários indivíduos, fato que pode contribuir para uma maior probabilidade de múltiplas colisões. Também há características morfológicas, como o peso do espécime que estão diretamente associadas a maior a severidade em caso de colisão, ou seja, quanto maior o peso, maior a probabilidade de ocorrer danos significativos a operação da aeronave, quando comparado a aves de menor porte (DOLBEER *et al*, 2015, DOLBEER & ESCHENFELDER, 2003).

O componente de Frequência Relativa (FR) nos fornece uma informação importante, em qual frequência ocorrem as espécies incorrem em impactos significativos à operação aeroportuária, efeitos no voo, colisões e dano maior. Para o cálculo desta e de outras estimativas foi considerada a distribuição dos dados em relação ao fenômeno.

Finalmente, para cada um dos componentes analisados (Porcentagem de Colisões Múltiplas, Tamanho da espécie, Porcentagem de avistamentos e Frequência Relativa) foi atribuída uma pontuação variando de 1 a 5, e realizada a soma simples dos valores obtidos para que fosse possível a classificação do risco às operações aeroportuárias de cada uma das 89 espécies amostradas.

Ao final da criação do REE foi possível caracterizar a avifauna quanto ao seu risco a partir das espécies presentes no banco de dados do SIGRA e *eBirds Observation Dataset* (Figura 7 A), traçando o risco associado em caso de colisão tanto de espécies frequentes, assim como de espécies com pouca ocorrência em colisões e avistamentos. Essa amostragem heterogênea das espécies visa, por exemplo, trazer *insights* sobre espécies com menor quantidade de colisões, mas com alto grau de risco à aviação.

Ressalta-se que criação de metodologias para classificação de espécies segundo um padrão de risco é um tema recorrente na segurança aeroportuária no contexto nacional e internacional (DOLBEER, 2015) e visa compor a nossa análise através da criação de uma métrica capaz de estimar o risco em caso de colisão e a probabilidade de ocorrência da espécie na América do Sul.

3.5 Método de Modelagem de Ocorrência Predita das Espécies de Interesse Aeroportuário (MOPEIA), calibração do modelo. e avaliação do modelo

Nesta etapa, através de pontos de ocorrência das espécies de interesse amostradas em 29 aeródromos brasileiros utilizou-se variáveis ambientais (Tabela 3) para se estimar as probabilidades de ocorrência referentes as espécies de interesse aeroportuário amostradas na América do Sul. Neste contexto, o MaxEnt foi utilizado pelos seguintes motivos:

- (1) O MaxEnt utiliza dados de presença das espécies amostradas, sendo esta informação de fácil acesso de mais fácil acesso que dados de presença-ausência (ELITH *et al* 2011);
- (2) Este modelo é capaz de lidar com variáveis ambientais contínuas e categóricas, e tal como explicitado anteriormente no tópico 5.3, consegue normalizar a ocorrência das variáveis ao longo da escala espacial, evitando vieses (MEROW *et al.* 2014, ELITH *et al.*, 2010);
- (3) O MaxEnt calcula a importância das variáveis, auxiliando na caracterização de quais variáveis mais explicam a presença das espécies naquela região (JIMÉNEZ-VALVERDE *et al.*, 2008), algo importante ao objetivo desta pesquisa.

Para o cálculo do REE, foram definidas as configurações necessárias para geração do modelo. Há variações nas configurações que podem impactar de maneira significativa os resultados obtidos. Nesta etapa foi realizado o *finetuning* do modelo, ou seja, rodadas de teste para ajustes do modelo. Os resultados obtidos neste estudo foram gerados utilizando-se 250 replicações *Crossvalidate*, com 30% dos dados utilizados para teste do modelo, com 2.500 pontos de fundo.

Como maneira de avaliar o modelo obtido, foram utilizados os valores de *Area Under Curve* (AUC), erros de omissão e p-valor além da inspeção visual do mapa gerado pelo modelo (KONOWALIK, 2021). Neste, a probabilidade de ocorrência varia entre 0 e 1, variando de nenhuma probabilidade de ocorrência até 1, alta probabilidade de ocorrência da fauna.

3.5.1 Transformação do *output* pós modelagem

Após a obtenção da superfície de probabilidade de ocorrência para as espécies amostradas foi realizado a intersecção para as áreas das ASAs. A partir dos recortes para cada um dos aeródromos amostrados, foi utilizada a ferramenta *gdal_translate* em ambiente Python para converter os arquivos de imagem (.tif) em vetores contendo a probabilidade de ocorrência. Os dados obtidos foram então agrupados por espécie em cada aeródromo, e exportados em tabelas para as etapas de validação do modelo através do *Generalized linear mixed model* (GLMM).

Durante a transformação do *output* utilizou-se as bibliotecas *raster*, *pandas* e *numpy* em ambiente *Python*, e teve como objetivo facilitar os testes estatísticos e a visualização dos resultados. O modelo, neste caso, visa trazer o componente espacial, inerente à ecologia das espécies da AA, como pilar da construção de uma matriz de risco que consiga demonstrar tanto *quais* espécies ocorrem quanto *onde* tais espécies possuem maior probabilidade de ocorrer e qual o risco associado a cada espécie em caso de colisão.

3.5.2 Validação de modelos de ocorrência predita de espécies através do *Generalized linear mixed model* (GLMM)

Para a validação do modelo obtido (Figura 7 E) utilizou-se o modelo GLMM, sendo que tal escolha partiu da necessidade de lidar com as características específicas dos dados de colisão entre aves e aeronaves, com a probabilidade de ocorrência predita através do MOPEIA para cada espécie e a presença de efeitos aleatórios relacionados aos diferentes aeroportos (BOLKER *et al.* 2009).

Neste caso, a principal vantagem do GLMM para o estudo de colisões entre aves e aeronaves reside no fato dos padrões de ocorrência desses eventos podem variar de acordo com as características ambientais e operacionais de cada um dos 29 aeroportos analisados, sendo que o modelo passa a ser ajustado com parâmetros locais, de maneira que se possa investigar os fatores que influenciam os riscos de colisão (BAKKESTUEN *et al.*, 2009)

Para aplicação desta importante ferramenta para validação do modelo, foi utilizada a rotina apresentada na Figura 10 no *software* R através da biblioteca *lme4* (BATES *et*

al 2015), desenvolvida especificamente para modelos linear mistos. Neste caso a função *glmer* tem como variáveis as colunas do banco de dados referente as colisões e a média de ocorrência das espécies além de uma coluna contendo os 29 aeródromos amostrados, previamente agrupados para as espécies.

Figura 10 - Rotina de programação em pseudódigo para validação de modelo

```
Inicialize o modelo generalizado linear de efeitos mistos:  
  
-Variável resposta: Total de colisões por espécie  
  
-Variável preditora: Média da ocorrência das espécies  
  
-Efeito aleatório: Aeródromos amostrados  
  
-Família: Poisson  
  
Ajuste o modelo aos dados obtidos  
  
Gere um resumo dos resultados do modelo
```

Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo. 2023.

A partir desta rotina foram então gerados os resumos das análises (*summary*) para aferirmos se há relação entre total de colisões amostradas e a média de ocorrência predita (Figura 7 E).

A escolha da distribuição de Poisson para a modelagem das colisões entre aves e aeronaves é apropriada devido à natureza discreta e ao baixo número de ocorrências desses eventos. A distribuição de Poisson é também foi escolhida pois é adequada para lidar com dados de contagem, como o número de colisões, onde os eventos ocorrem independentemente uns dos outros e em uma taxa média constante proporcionando uma abordagem estatística robusta para a análise em questão (ZUUR, 2009).

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

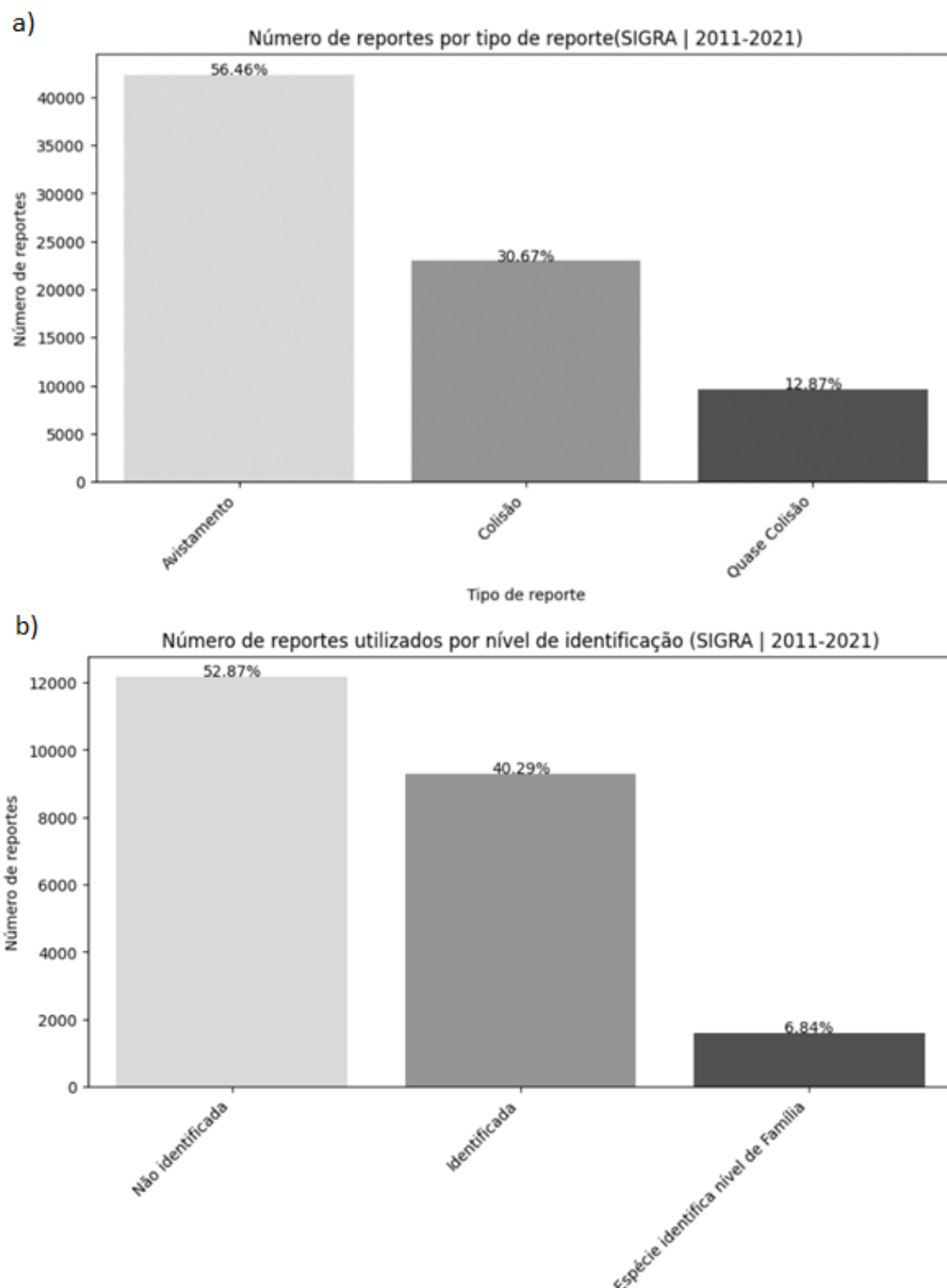
4.1. Resultados Risco Espécie Específico (REE)

Primeiramente será caracterizado o banco de dados obtido, quais foram as etapas e resultados do tratamento destas informações e o ranqueamento das espécies a partir de dados obtidos através do SIGRA e do *eBird Observation dataset*.

4.1.1 Caracterizando o banco de dados obtido e análise de frequência de colisão

Através do *eBird Observation dataset* foram adquiridos **1.048.576** pontos de ocorrência de 89 das 114 espécies amostradas segundo o SIGRA (Figura 7 A). Os dados obtidos através do SIGRA totalizaram 75.006 reportes de ocorrências dentre, sendo deste total, amostradas 23.001 (30.65%) correspondentes as colisões entre avifauna e aeronaves (Figura 11). No âmbito do SIGRA foram retiradas ocorrências em que as espécies não foram identificadas, ou foram identificadas à nível de espécie (n=13734, 59.64%). Desta forma, foram utilizados dados de 9.267 colisões e 42.352 avistamentos.

Figura 11 – (a) Gráfico em barra com proporção obtida de reportes de avistamento, colisão e quase colisão a partir de dados obtidos no Sistema de Gerenciamento de Risco Aviário (SIGRA). (b) Gráfico em barras indicando a proporção de dados segundo grau de identificação da espécie



Fonte: SIGRA (2011-2021). Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

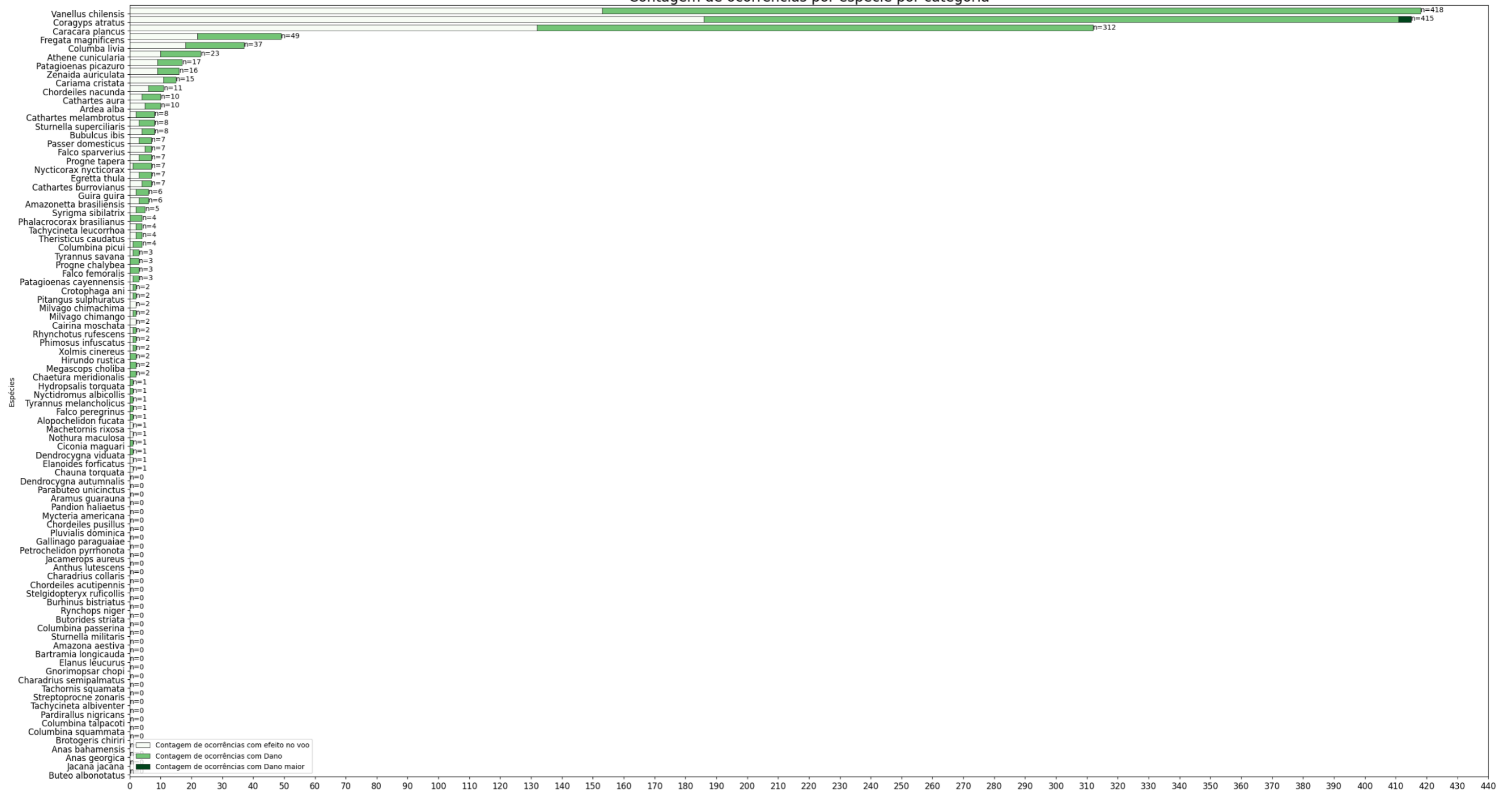
Das ocorrências em que o tipo de reporte foi preenchido como "colisão", 40.94% (n=3795) corresponderam ao Quero-quero (*Vanellus chilensis*) e 14.95% (n=1386) ao

Carcará (*Caracara plancus*). Essas duas espécies, juntas, compõem mais de 55.89% do banco de dados total de ocorrências. Em terceiro lugar, tem-se o Urubu-de-cabeça-preta (*Coragyps atratus*), que representou 3.00% (n=419) do total de colisões.

Foram então calculadas as porcentagens de colisões com efeito no voo, dano e dano maior, ou seja, a proporção de ocorrência em que houve alteração na operação. Ademais foi atribuída pontuação variando de 0 (menor risco) a 5 (risco altíssimo) a cada variável. Dos resultados da Frequência Relativa (FR) colisões, destacam-se algumas espécies pelas proporções próximas de ocorrências de efeitos no voo e dano, como Urubu-de-cabeça-preta, em que do total de 439 ocorrências com colisões reportadas, pelo menos 51.25% (n= 225) acarretaram dano, e ao menos 42% das ocorrências causaram efeito no voo (Figura 12), a mesma tendência foi observada na Fragata (*Fregata magnificiens*). O mesmo não ocorreu com o Quero-Quero (*Vanellus chilensis*), com uma alta proporção de ocorrências no banco de dados (n=3975) mas uma proporção de 10%(n=418) das ocasiões em que houve alguma alteração na operação (Figura 12). Fato contribuiu para que à sua severidade fosse diminuída.

Figura 12 - Contagem de ocorrências de colisões e suas categorias (Efeito no voo, Dano e Dano maior), componentes da Frequência Relativa, que contabiliza o Risco associado a colisões entre aves e aeronaves

Contagem de ocorrências por espécie por categoria



Fonte: SIGRA (2011-2021). Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

4.1.2 Estimando Risco espécie específico (REE)

A seguir foram somados à FR os demais componentes da análise, avistamento, tamanho e colisão Múltipla, respectivamente, resultando no ranking final apresentado na Tabela 4.

Neste caso, de 24 pontos possíveis para cada espécie, o urubu-de-cabeça-preta alcançou o maior REE com 13 pontos no total, seguido, com 10 pontos no total pela Fragata (*Fregata magnificens*) e pelo Urubu-da-mata (*Cathartes melambrotus*). Do total de 110 espécies inicialmente amostradas no banco de dados, para o cálculo de REE foram consideradas 89 EIA, escolhidas por também comporem bancos de dados de ocorrência de espécies *eBird Observation dataset*.

Neste contexto, a estimativa do REE foi utilizada como um fator na classificação do Risco Global das Espécies, contabilizando não somente a sua probabilidade de ocorrência, mas também características inatas as espécies que podem agravar ou diminuir os efeitos de uma colisão.

Tabela 4 - Resultados da classificação das espécies segundo dados do SIGRA. Os resultados dos fatores de risco reclassificados, Avistamento, Tamanho, Colisão Múltipla, Frequência relativa e REE, quantificada a partir da soma dos fatores de risco

Nome comum	Nome científico	Avistamento	Tamanho	Colisão múltipla	Frequência relativa	REE
Urubu-de-cabeça-preta	<i>Coragyps atratus</i>	0	4	0	9	13
Fragata	<i>Fregata magnificens</i>	0	4	0	6	10
Urubu-da-mata	<i>Cathartes melambrotus</i>	0	4	0	6	10
Carcará	<i>Caracara plancus</i>	0	3	3	3	9
Quero-quero	<i>Vanellus chilensis</i>	1	2	4	2	9
Maguari	<i>Ciconia maguari</i>	0	4	0	5	9
Tachã	<i>Chauna torquata</i>	0	4	0	5	9
Seriema	<i>Cariama cristata</i>	0	3	0	6	9
Garça-branca-grande	<i>Ardea alba</i>	0	3	0	4	7
Pato-do-mato	<i>Cairina moschata</i>	0	4	0	3	7
Pomba-galega	<i>Patagioenas cayennensis</i>	0	2	0	5	7
Perdiz	<i>Rhynchotus rufescens</i>	0	3	0	4	7
Biguá	<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	0	3	0	3	6

Nome comum	Nome científico	Avistamento	Tamanho	Colisão múltipla	Frequência relativa	REE
Curicaca-comum	<i>Theristicus caudatus</i>	0	4	0	2	6
Garça-cinzenta	<i>Nycticorax nycticorax</i>	0	3	0	3	6
Tapicuru-de-cara-pelada	<i>Phimosus infuscatus</i>	0	2	0	4	6
Suiriri-cavaleiro	<i>Machetornis rixosa</i>	0	1	0	5	6
Urubu-de-cabeça-vermelha	<i>Cathartes aura</i>	0	3	0	3	6
Garça-branca-pequena	<i>Egretta thula</i>	0	2	0	3	5
Pombo-doméstico	<i>Columba livia</i>	0	2	1	2	5
Anu preto	<i>Crotophaga ani</i>	0	1	0	4	5
Urubu-de-cabeça-amarela	<i>Cathartes burrovianus</i>	0	3	0	2	5
Garça-vaqueira	<i>Bubulcus ibis</i>	0	2	0	2	4
Gavião-tesoura	<i>Elanoides forficatus</i>	0	2	0	2	4
Coruja-buraqueira	<i>Athene cunicularia</i>	0	1	1	2	4
Ilera	<i>Dendrocygna viduata</i>	0	2	0	2	4
Marreca-ananai	<i>Amazonetta brasiliensis</i>	0	2	0	2	4
Pomba-de-bando	<i>Zenaida auriculata</i>	0	1	1	2	4
Pombão	<i>Patagioenas picazuro</i>	0	2	0	2	4
Cabeça-seca	<i>Mycteria americana</i>	0	4	0	0	4
Falcão-peregrino	<i>Falco peregrinus</i>	0	3	0	1	4
Carrapateiro	<i>Milvago chimachima</i>	0	2	0	2	4
Chimango	<i>Milvago chimango</i>	0	2	0	2	4
Maria-faceira	<i>Syrigma sibilatrix</i>	0	2	0	2	4
Falcão-de-coleira	<i>Falco femoralis</i>	0	2	0	1	3
Anu-branco	<i>Guira guira</i>	0	1	0	2	3
Bem-te-vi	<i>Pitangus sulphuratus</i>	0	1	0	2	3
Corucão	<i>Chordeiles nacunda</i>	0	1	0	2	3
Falcão-quiriquiri	<i>Falco sparverius</i>	0	1	0	2	3
Primavera	<i>Xolmis cinereus</i>	0	1	0	2	3
Rolinha-picui	<i>Columbina picui</i>	0	0	0	3	3
Pardal	<i>Passer domesticus</i>	0	0	0	3	3

Nome comum	Nome científico	Avistamento	Tamanho	Colisão múltipla	Frequência relativa	REE
Águia-pescadora	<i>Pandion haliaetus</i>	0	3	0	0	3
Asa-branca	<i>Dendrocygna autumnalis</i>	0	3	0	0	3
Carão	<i>Aramus guarauna</i>	0	3	0	0	3
Gavião-asa-de-telha	<i>Parabuteo unicinctus</i>	0	3	0	0	3
Codorna-amarela	<i>Nothura maculosa</i>	0	2	0	1	3
Bacurau	<i>Nyctidromus albicollis</i>	0	1	0	2	3
Corujinha-domato	<i>Megascops choliba</i>	0	1	0	2	3
Andorinha-de-sobre-branco	<i>Tachycineta leucorroha</i>	0	0	0	2	2
Andorinha-do-campo	<i>Progne tapera</i>	0	0	0	2	2
Polícia-inglesa-do-sul	<i>Sturnella superciliaris</i>	0	0	0	2	2
Tesourinha	<i>Tyrannus savana</i>	0	0	0	2	2
Gavião-de-rabo-barrado	<i>Buteo albonotatus</i>	0	2	0	0	2
Gavião-peneira	<i>Elanus leucurus</i>	0	2	0	0	2
Marreca-parda	<i>Anas georgica</i>	0	2	0	0	2
Marreca-toicinho	<i>Anas bahamensis</i>	0	2	0	0	2
Saracura-sana	<i>Pardirallus nigricans</i>	0	2	0	0	2
Papagaio-verdadeiro	<i>Amazona aestiva</i>	0	2	0	0	2
Talha-mar	<i>Rynchops niger</i>	0	2	0	0	2
Téu-téu-da-savana	<i>Burhinus bistriatus</i>	0	2	0	0	2
Bacurau-tesoura	<i>Hydropsalis torquata</i>	0	1	0	1	2
Andorinha-morena	<i>Alopochelidon fucata</i>	0	0	0	2	2
Batuiruçu	<i>Pluvialis dominica</i>	0	1	0	0	1
Jaçanã	<i>Jacana jacana</i>	0	1	0	0	1
Periquito-de-encontro-amarelo	<i>Brotogeris chiriri</i>	0	1	0	0	1
Pombinha-escamada	<i>Columbina squammata</i>	0	1	0	0	1
Rolinha-roxa	<i>Columbina talpacoti</i>	0	1	0	0	1
Andorinha-de-bando	<i>Hirundo rustica</i>	0	0	0	1	1
Andorinha-doméstica-grande	<i>Progne chalybea</i>	0	0	0	1	1
Andorinhão-do-temporal	<i>Chaetura meridionalis</i>	0	0	0	1	1

Nome comum	Nome científico	Avistamento	Tamanho	Colisão múltipla	Frequência relativa	REE
Andorinhão-de-coleira	<i>Streptoprocne zonaris</i>	0	1	0	0	1
Batuíra-de-bando	<i>Charadrius semipalmatus</i>	0	1	0	0	1
Graúna	<i>Gnorimopsar chopi</i>	0	1	0	0	1
Maçarico-do-campo	<i>Bartramia longicauda</i>	0	1	0	0	1
Narceja	<i>Gallinago paraguaiæ</i>	0	1	0	0	1
Socozinho	<i>Butorides striata</i>	0	1	0	0	1
Suiriri	<i>Tyrannus melancholicus</i>	0	0	0	1	1
Jacamarazu	<i>Jacamerops aureus</i>	0	1	0	0	1
Andorinha-do-rio	<i>Tachycineta albiventer</i>	0	0	0	0	0
Andorinhão-do-buriti	<i>Tachornis squamata</i>	0	0	0	0	0
Polícia-inglesa-do-norte	<i>Sturnella militaris</i>	0	0	0	0	0
Rolinha-cinzenta	<i>Columbina passerina</i>	0	0	0	0	0
Andorinha-serradora	<i>Stelgidopteryx ruficollis</i>	0	0	0	0	0
Bacurau-de-asa-fina	<i>Chordeiles acutipennis</i>	0	0	0	0	0
Batuíra-de-coleira	<i>Charadrius collaris</i>	0	0	0	0	0
Caminheiro-zumbidor	<i>Anthus lutescens</i>	0	0	0	0	0
Andorinha-de-dorso-acanelado	<i>Petrochelidon pyrrhonota</i>	0	0	0	0	0
Bacurauzinho	<i>Chordeiles pusillus</i>	0	0	0	0	0

Fonte: SIGRA (2011 e 2021). Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

4.2 Resultados do Modelo de Ocorrência Predita das Espécies de Interesse Aeroportuário (MOPEIA) em 29 aeródromos brasileiros

Nesta etapa do trabalho desenvolvido foram abordados os resultados da modelagem. Inicialmente será apresentada a performance do modelo para as 89 espécies estudadas, obtidos após a calibragem do modelo MaxEnt (Figura 7 D através de Mapas de calor, que auxiliaram na construção de uma ideia generalizada dos resultados obtidos. Logo em seguida foi abordada a análise de correlação entre o aumento da probabilidade da ocorrência das espécies, bem como a probabilidade desta estar correlacionada com o aumento das colisões das espécies amostradas nos

aeródromos (Figura 7 E) através do modelo *Generalized linear mixed model* (GLMM). Ao final serão analisados os resultados do Risco Global das espécies.

4.2.1 Performance dos modelos obtidos

Foram gerados um modelo para cada uma das 89 espécies analisadas, sendo realizada posteriormente a análise a partir da *Area Under the Curve* (AUC), ou Área Sob a Curva (ASC). Os valores de AUC variaram de 0,95 (alto desempenho do modelo) a 0,69 (baixo desempenho do modelo), indicando diferentes níveis de performance dos modelos de Maxent as espécies amostradas (Tabela 5).

Espécies com valores mais altos, como *Fregata* (*Fregata magnificiens*), indicam maior capacidade do modelo em discriminar presenças e ausências, sugerindo que o Modelo de Máxima entropia é capaz de prever a ocorrência destas espécies no ambiente aeroportuário, e para toda a América do Sul. Por outro lado, algumas espécies como Urubu-de-cabeça-vermelha (*Cathartes aura*), tiveram valores ASC em torno de 0.69, indicam um aproveitamento inferior em termos de discriminação e previsão da ocorrência.

Tabela 5 - Resultados modelagem das 89 espécies de interesse aeroviário brasileiro, o número de amostras utilizadas no treino e no teste de cada modelo. AUC e desvio padrão

Nome científico	Amostras de treino	Amostras de teste	AUC e Desvio padrão
<i>Fregata magnificiens</i>	858	286	0.95 +/- 0.0026
<i>Burhinus bistriatus</i>	943	314	0.94 +/- 0.0029
<i>Charadrius semipalmatus</i>	511	170	0.91 +/- 0.0113
<i>Jacamerops aureus</i>	762	254	0.89 +/- 0.0062
<i>Chordeiles acutipennis</i>	1028	342	0.88 +/- 0.0079
<i>Pardirallus nigricans</i>	2114	704	0.87 +/- 0.0044
<i>Pluvialis dominica</i>	881	293	0.87 +/- 0.0095
<i>Bartramia longicauda</i>	955	318	0.87 +/- 0.0086
<i>Alopochelidon fucata</i>	1872	624	0.87 +/- 0.0053
<i>Chordeiles pusillus</i>	490	163	0.86 +/- 0.0122
<i>Anas bahamensis</i>	2121	706	0.86 +/- 0.0052
<i>Parabuteo unicinctus</i>	3167	1055	0.84 +/- 0.0046
<i>Anas georgica</i>	3079	1026	0.84 +/- 0.0043
<i>Buteo albonotatus</i>	1455	485	0.84 +/- 0.0075
<i>Columbina passerina</i>	3141	1047	0.83 +/- 0.0044

Nome científico	Amostras de treino	Amostras de teste	AUC e Desvio padrão
<i>Chaetura meridionalis</i>	3145	1048	0.83 +/- 0.0045
<i>Sturnella militaris</i>	3115	1038	0.83 +/- 0.0045
<i>Xolmis cinereus</i>	3092	1030	0.82 +/- 0.0047
<i>Gallinago paraguaiiae</i>	2739	913	0.82 +/- 0.0053
<i>Chauna torquata</i>	3867	1288	0.82 +/- 0.0039
<i>Chordeiles nacunda</i>	1969	656	0.82 +/- 0.0068
<i>Cathartes melambrotus</i>	3195	1065	0.82 +/- 0.0048
<i>Rynchops niger</i>	1887	629	0.82 +/- 0.0076
<i>Hydropsalis torquata</i>	2033	677	0.82 +/- 0.0066
<i>Petrochelidon pyrrhonota</i>	1314	437	0.82 +/- 0.0089
<i>Brotogeris chiriri</i>	3840	1279	0.81 +/- 0.0044
<i>Milvago chimango</i>	4608	1536	0.81 +/- 0.004
<i>Amazona aestiva</i>	3383	1127	0.81 +/- 0.0049
<i>Ciconia maguari</i>	4370	1456	0.80 +/- 0.0044
<i>Tachycineta leucorrhoa</i>	4300	1433	0.80 +/- 0.0043
<i>Anthus lutescens</i>	3297	1099	0.80 +/- 0.0052
<i>Charadrius collaris</i>	2439	813	0.80 +/- 0.0067
<i>Pandion haliaetus</i>	3447	1149	0.79 +/- 0.0058
<i>Tachornis squamata</i>	3802	1267	0.78 +/- 0.0054
<i>Rhynchotus rufescens</i>	3653	1217	0.78 +/- 0.005
<i>Columbina squammata</i>	4593	1530	0.78 +/- 0.0048
<i>Columba livia</i>	4644	1547	0.78 +/- 0.0051
<i>Streptoprocne zonaris</i>	5053	1684	0.78 +/- 0.0046
<i>Amazonetta brasiliensis</i>	5155	1718	0.77 +/- 0.0046
<i>Falco peregrinus</i>	3688	1229	0.77 +/- 0.0059
<i>Elanoides forficatus</i>	4272	1424	0.77 +/- 0.0055
<i>Passer domesticus</i>	4674	1558	0.77 +/- 0.0051
<i>Nothura maculosa</i>	5499	1832	0.77 +/- 0.0043
<i>Aramus guarauna</i>	4530	1509	0.77 +/- 0.0051
<i>Gnorimopsar chopi</i>	4887	1628	0.77 +/- 0.0046
<i>Phimosus infuscatus</i>	5313	1770	0.77 +/- 0.0047
<i>Tachycineta albiventer</i>	4320	1440	0.76 +/- 0.0055
<i>Sturnella supercilialis</i>	5151	1716	0.76 +/- 0.0046

Nome científico	Amostras de treino	Amostras de teste	AUC e Desvio padrão
<i>Elanus leucurus</i>	5084	1694	0.76 +/- 0.0049
<i>Cariama cristata</i>	5304	1767	0.76 +/- 0.0046
<i>Dendrocygna autumnalis</i>	4441	1480	0.76 +/- 0.0053
<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	4224	1407	0.75 +/- 0.0061
<i>Patagioenas picazuro</i>	6057	2018	0.75 +/- 0.0045
<i>Patagioenas cayennensis</i>	5356	1785	0.75 +/- 0.0049
<i>Dendrocygna viduata</i>	4958	1652	0.75 +/- 0.005
<i>Mycteria americana</i>	4648	1549	0.75 +/- 0.0054
<i>Nycticorax nycticorax</i>	3769	1256	0.75 +/- 0.0063
<i>Columbina picui</i>	6396	2131	0.74 +/- 0.0045
<i>Syrigma sibilatrix</i>	5942	1980	0.74 +/- 0.0046
<i>Zenaida auriculata</i>	6411	2136	0.74 +/- 0.0046
<i>Theristicus caudatus</i>	5667	1888	0.74 +/- 0.0046
<i>Columbina talpacoti</i>	6506	2168	0.74 +/- 0.0047
<i>Hirundo rustica</i>	4489	1496	0.74 +/- 0.0061
<i>Milvago chimachima</i>	6800	2266	0.74 +/- 0.0046
<i>Guira guira</i>	6905	2301	0.73 +/- 0.0044
<i>Cairina moschata</i>	4449	1483	0.73 +/- 0.0057
<i>Machetornis rixosa</i>	6284	2094	0.73 +/- 0.0047
<i>Progne chalybea</i>	5125	1708	0.73 +/- 0.0054
<i>Egretta thula</i>	4869	1623	0.73 +/- 0.0058
<i>Stelgidopteryx ruficollis</i>	6064	2021	0.73 +/- 0.005
<i>Nyctidromus albicollis</i>	4932	1644	0.73 +/- 0.0055
<i>Cathartes burrovianus</i>	5430	1809	0.73 +/- 0.0052
<i>Bubulcus ibis</i>	6495	2165	0.72 +/- 0.0051
<i>Butorides striata</i>	5112	1703	0.72 +/- 0.0058
<i>Jacana jacana</i>	5589	1862	0.72 +/- 0.0052
<i>Megascops choliba</i>	5286	1762	0.72 +/- 0.0057
<i>Ardea alba</i>	5892	1963	0.72 +/- 0.0055
<i>Progne tapera</i>	6264	2087	0.71 +/- 0.0052
<i>Athene cunicularia</i>	6093	2031	0.71 +/- 0.0052
<i>Coragyps atratus</i>	7047	2349	0.71 +/- 0.0049
<i>Vanellus chilensis</i>	6849	2282	0.71 +/- 0.0049
<i>Caracara plancus</i>	7391	2463	0.71 +/- 0.0048
<i>Pitangus sulphuratus</i>	7113	2371	0.71 +/- 0.005

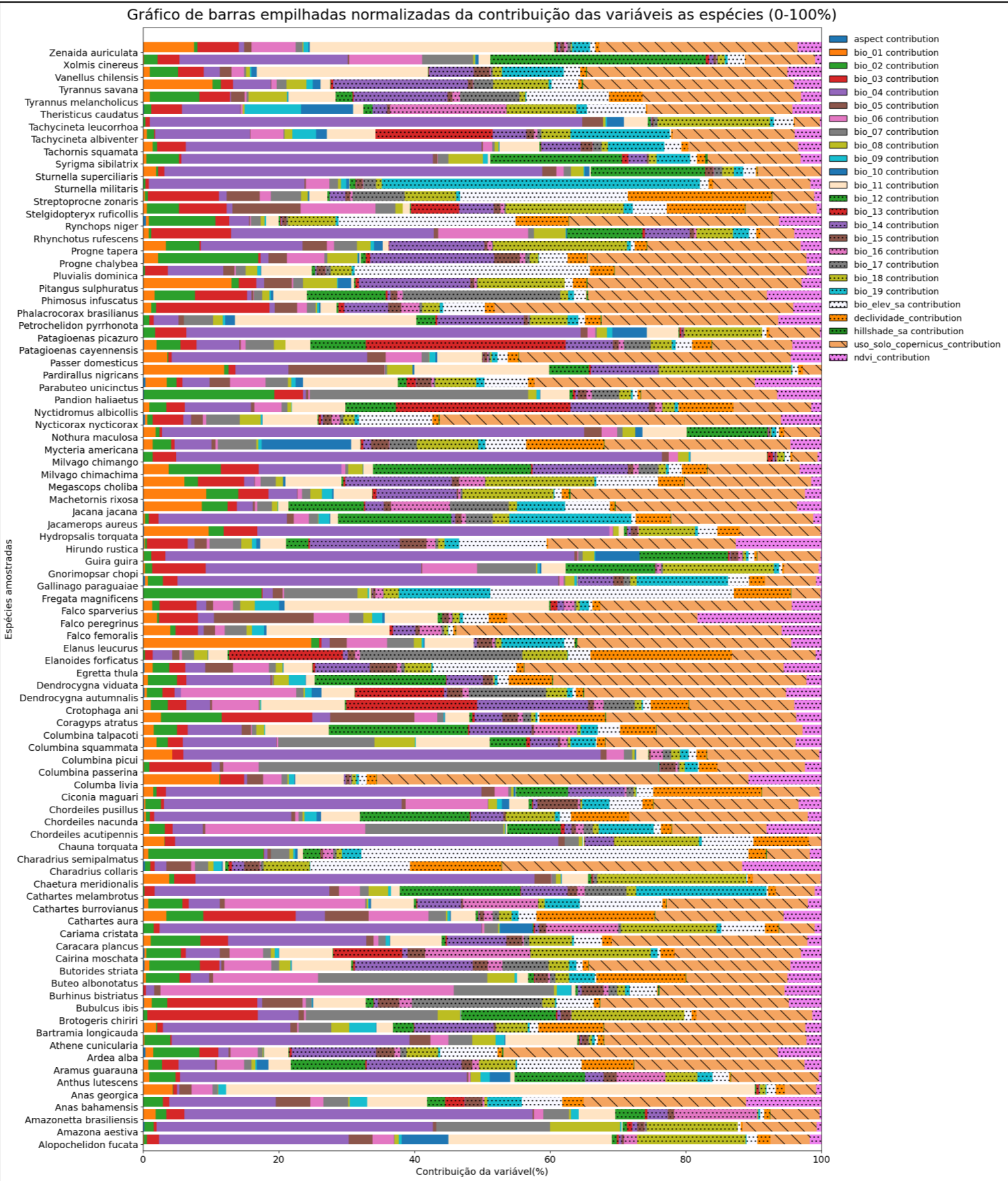
Nome científico	Amostras de treino	Amostras de teste	AUC e Desvio padrão
<i>Tyrannus savana</i>	7436	2478	0.70 +/- 0.0047
<i>Crotophaga ani</i>	7332	2443	0.70 +/- 0.0048
<i>Tyrannus melancholicus</i>	7227	2409	0.70 +/- 0.005
<i>Falco femoralis</i>	6384	2127	0.70 +/- 0.0053
<i>Falco sparverius</i>	7618	2539	0.70 +/- 0.0048
<i>Cathartes aura</i>	6713	2237	0.69 +/- 0.0054

Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Para cada espécie também foi realizado o levantamento da contribuição das 25 variáveis levantadas e recortadas para a América do Sul. Tal análise é importante para a identificação de quais variáveis possuem maior influência na previsão do modelo, neste caso, valores maiores indicam maior influência em seu resultado.

A contribuição das variáveis se encontra na Figura 13. Nenhuma variável ambiental teve contribuição significativa na explicação dos modelos de todas as espécies amostradas.

Figura 13 - Gráficos em barras empilhadas e normalizadas das variáveis e sua contribuição ao modelo em cada espécie de interesse amostrada



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

4.2.2 Avaliação da distribuição das probabilidades segundo MOPEIA em 29 aeródromos brasileiros

A ocorrência predita das espécies foi resumida através de uma média para cada aeroporto amostrado, de maneira que seja possível compreender qual o coeficiente de adequabilidade apresentado por cada uma das EIA ao longo dos 29 aeródromos analisados, apresentada no Mapa de calor (Figura 14) através do qual podemos observar padrões com relação a probabilidade de ocorrência das espécies. Quanto maior a probabilidade (mais próximo de 1), mais escuros se tornam os tons de verde, enquanto cores mais claras (mais próximas de 0) indicam menor probabilidade de MOPEIA.

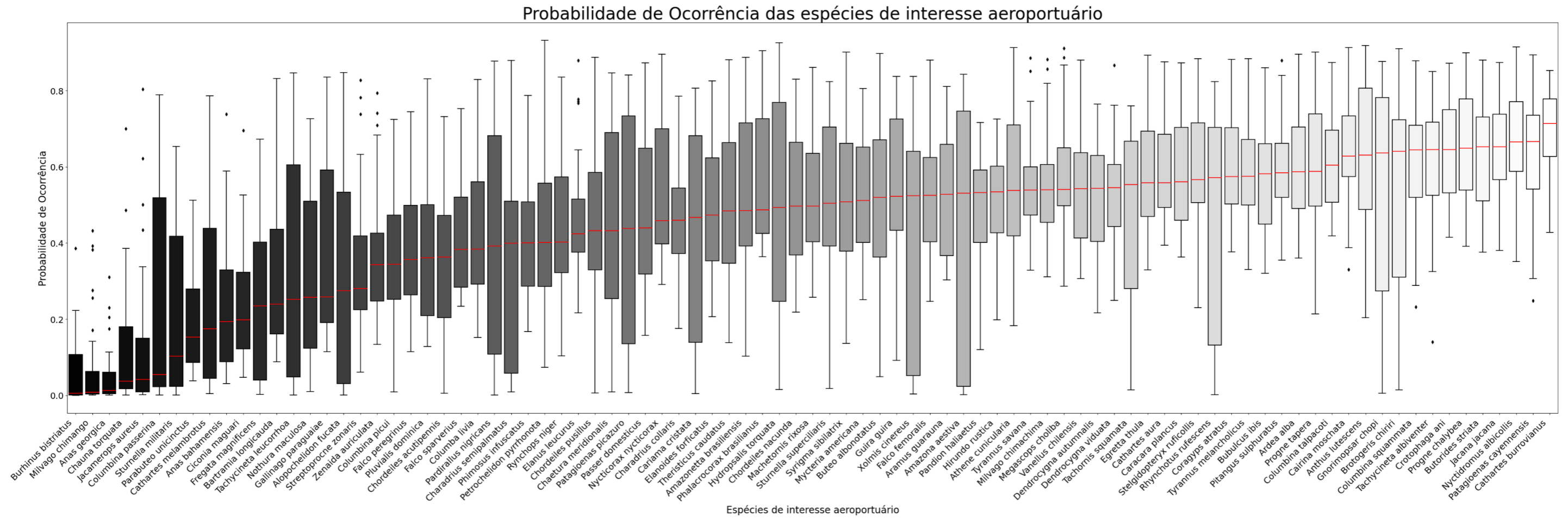
Neste contexto, dentre os aeroportos estudados, os aeroportos SBSP (Aeroporto de Congonhas) e SBCT (Aeroporto Internacional Afonso Pena) apresentaram uma presença das espécies analisadas significativamente maior em comparação aos demais aeródromos com valores em média superiores à 0.80. Contudo, alguns aeródromos como SBCF (Aeroporto Internacional de Confins - Tancredo Neves) (Figura 14) apresentaram valores médios de probabilidade > 0.40 representados em tonalidades mais claras no mapa de calor, indicando menor probabilidade de ocorrência das espécies de interesse.

Também, através do gráfico de calor, é possível obter visão geral sobre como as diferentes espécies possuem probabilidades heterogêneas de ocorrência ao longo dos aeródromos amostrados, destacando-se espécies como Chimango (*Milvago chimango*) e Têu-têu-da-savana (*Burhinus bistriatus*) pela sua baixa probabilidade de ocorrência, quando comparadas a espécies como o Urubu-de-cabeça-amarela (*Cathartes burrovianus*) e Urubu-de-cabeça-vermelha (*Cathartes aura*).

Para maior detalhamento, o gráfico *Boxplot* apresenta as probabilidades de ocorrência das EIA (Figura 15), sendo possível destacar algumas espécies específicas e observar sua variância. Seguindo a tendência do Mapa de calor, espécies como Urubu-de-cabeça-amarela (*Cathartes burrovianus*) se mostram consistentemente prevista como altamente provável de ocorrer nos aeroportos estudados, apresentando a maior mediana de probabilidade de ocorrência, 0.85. Todavia, espécies como *Anas geórgica*, *Milvago chimango* e *Burhinus bistriatus* apresentam uma mediana próxima de zero (>0.01), indicando baixíssima probabilidade de ocorrência segundo o modelo.

Do total das espécies analisadas, ao menos 15%(n=14) obtiveram mediana da probabilidade de ocorrência entre os aeródromos acima de 0.60. Outro importante fator de risco foi constatado quando analisados os valores máximos para cada espécie, sendo que em 74%(n=66) das espécies foram amostrados valores acima de 0.80, ou seja, são espécie com alta probabilidade de ocorrerem em aeródromos específicos, ressaltando a necessidade de estudos que consigam abordar as especificidades de cada aeródromo. Dentre estas, destacamos *Anthus lutescens*, *Nyctidromus albigollis*, *Cairina moschata* e *Brotogeris chiriri* por possuírem valores de adequabilidade acima de 0.90 (APÊNDICE A).

Figura 15 - Boxplot das EIA, ordenadas pela mediana da probabilidade de ocorrência, quanto mais escuras, menores probabilidades de ocorrências, quanto mais claras, maiores as medianas da ocorrência predita da espécie. O gráfico também representa em pontos os valores outliers (pontos fora da curva), além dos limites superiores e inferiores das amostras



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

4.2.3 Validação do Modelo de Ocorrência Preditada das Espécies de Interesse Aeroportuário (MOPEIA) através de *Generalized Linear Mixed Model* (GLMM).

Como etapa de validação do modelo foi utilizado um modelo *Generalized Linear Mixed Model* (GLMM) como forma de testar se há correlação entre o aumento das médias do coeficiente de adequabilidades das espécies de avifauna e o número de colisões amostrados para àquela espécie naquele aeródromo amostrado (Figura 16).

Ressalta-se que a utilização da modelagem GLMM parte da premissa que nesta amostra há diversos aeroportos e diversas espécies amostradas, cada qual com sua variação em seu grau de adequabilidade (ou probabilidade de ocorrência) das espécies, fruto das diferentes características ambientais encontradas ao longo do campo de estudo, neste caso, a América do Sul, tornando a distribuição dos dados não normal para cada recorte realizado nos 29 aeródromos amostrados.

A partir dos resultados obtidos do GLMM há relação entre os resultados a ocorrência predita das espécies e o número de colisões quando observamos um baixo p-valor $<2e-16$ e um z-valor alto (12.49 ± 0.1) (Tabela 6).

Tabela 6 - Resultados do *Generalized Linear Mixed Model* (Modelo linear generalizado misto) efeitos fixos para aferir a correlação entre a média de ocorrência predita de espécies da avifauna aeroportuária através do modelo MaxEnt e o número de colisões amostradas

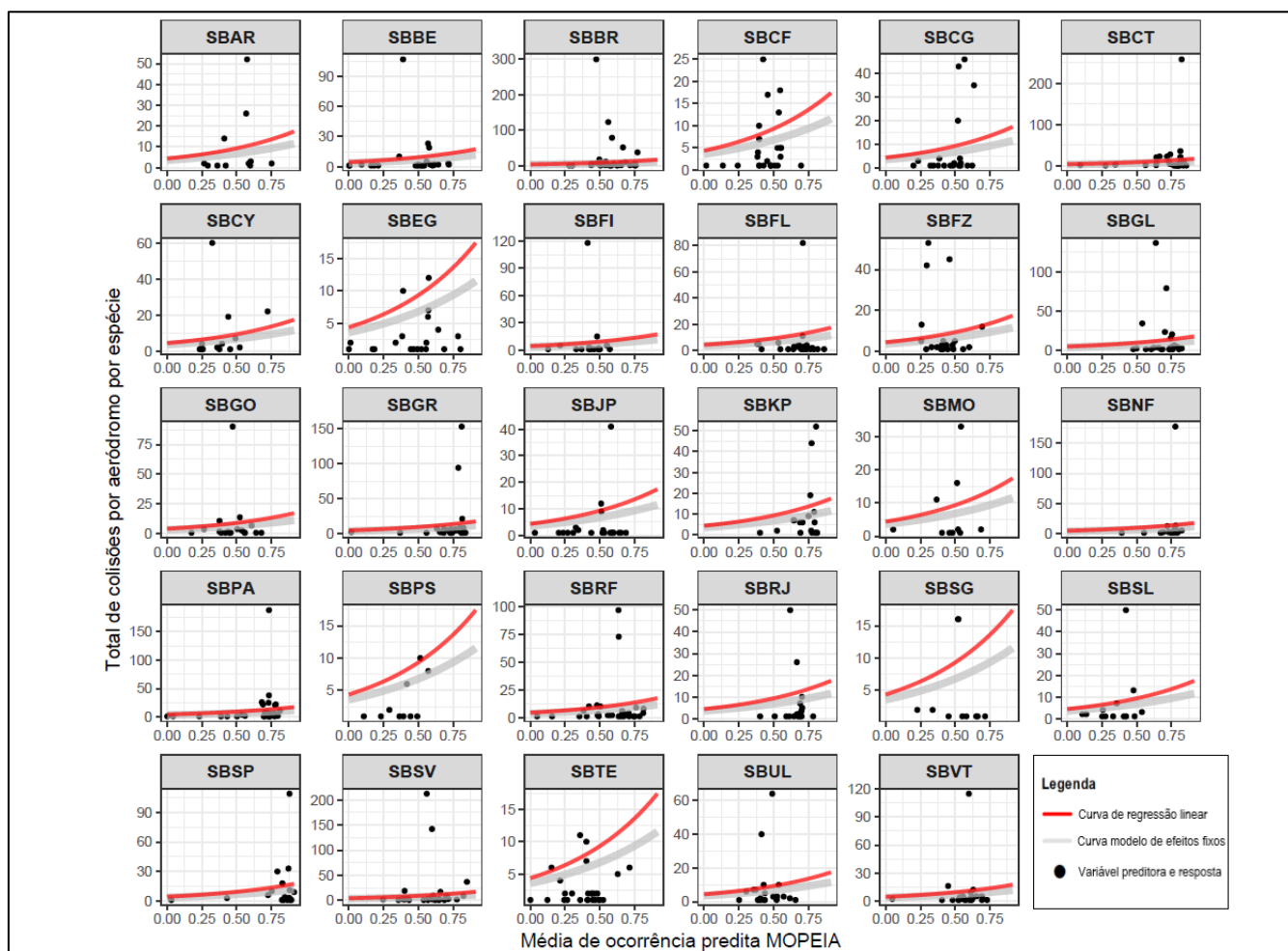
	<u>Estimativa</u>	<u>Erro padrão</u>	<u>z-valor</u>	<u>Pr(> z)</u>
Intercepto	1.276	0.102	12.49	<2e-16
Média de ocorrência predita espécie específico	1.510	0.100	15.05	<2e-16

Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 17, na qual é possível notar que alguns resultados:

- (1) As retas do efeito aleatório (em vermelho) e a reta média dos efeitos fixos (em cinza) representam a relação estimada entre a ocorrência predita das espécies segundo o MOPEIA e o TCSPP a cada nível, neste caso, em cada aeródromo amostrado;
- (2) As retas do efeito aleatório e a reta média dos efeitos fixos, possuem, em certa parte, uma inclinação positiva, indicando uma relação positiva entre as variáveis preditoras e resposta;
- (3) Cada ponto representa os valores observados das médias de ocorrência segundo o MOPEIA e TCSPP em cada nível amostrado, neste caso, cada aeródromo e estão em proximidade, na maior parte dos casos, com as retas de regressão linear, apontando uma forte relação entre as variáveis e um ajuste significativo do modelo obtido;
- (4) É possível notar uma variação significativa entre os aeródromos com relação a escala, o espaçamento entre os pontos amostrais em relação a si mesmos, a reta de regressão linear e a reta que representa o modelo de efeitos fixos.

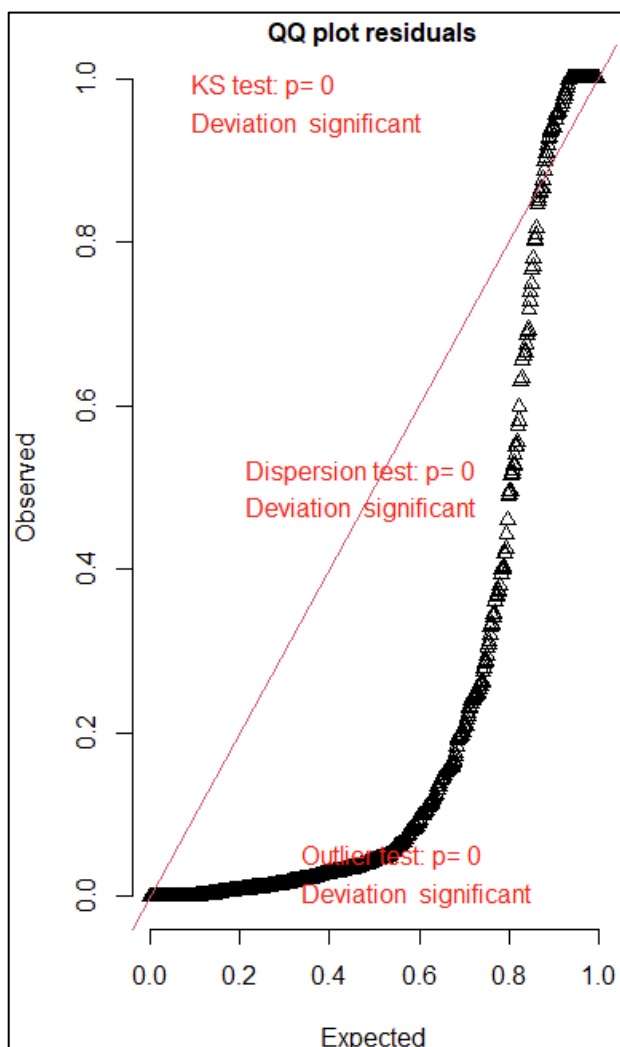
Figura 17 - Conjunto de gráficos de dispersão para os 29 aeródromos amostrados. Em cada gráfico foi inserida a reta do efeito aleatório (em vermelho) e a reta média dos efeitos fixos (em cinza), no eixo y foram utilizados os valores do total de colisões amostradas e no eixo x a média de ocorrência predita nas espécies de interesse



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Para o banco de dados obtido, também foi realizada a análise de resíduos (Figura 18), visualizado no gráfico QQ(Quartil-quartil), através do qual foi aferida a não-normalidade dos dados, pois os pontos amostrados estão distantes da linha vermelha (linha teórica da distribuição normal), sendo que neste caso aponta para dados que possuem desvio significativo, tornando necessário o uso de modelos “flexíveis” como GLMM, que podem lidar com uma ampla variação das amostras em cada aeródromo (Figura 17), incluindo também distribuições uma distribuição assimétrica dos dados (mais concentrado nas caudas), também chamada de distribuição não normal.

Figura 18 - Gráfico QQ (Quartil-Quartil) dos resíduos para aferir a distribuição dos dados obtidos, neste caso os pontos dos dados não acompanham a linha vermelha (mensura tendência à normalidade dos dados)



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Neste caso, conclui-se que o modelo possui significância, ou seja, pode-se afirmar, apesar da não normalidade dos dados, que há correlação significativa entre a probabilidade predita das espécies de interesse aeroportuário e o número de colisões, sendo possível, extrapolar os resultados obtidos para variáveis como o Risco espécie específico (REE) das espécies (Figura 7 F).

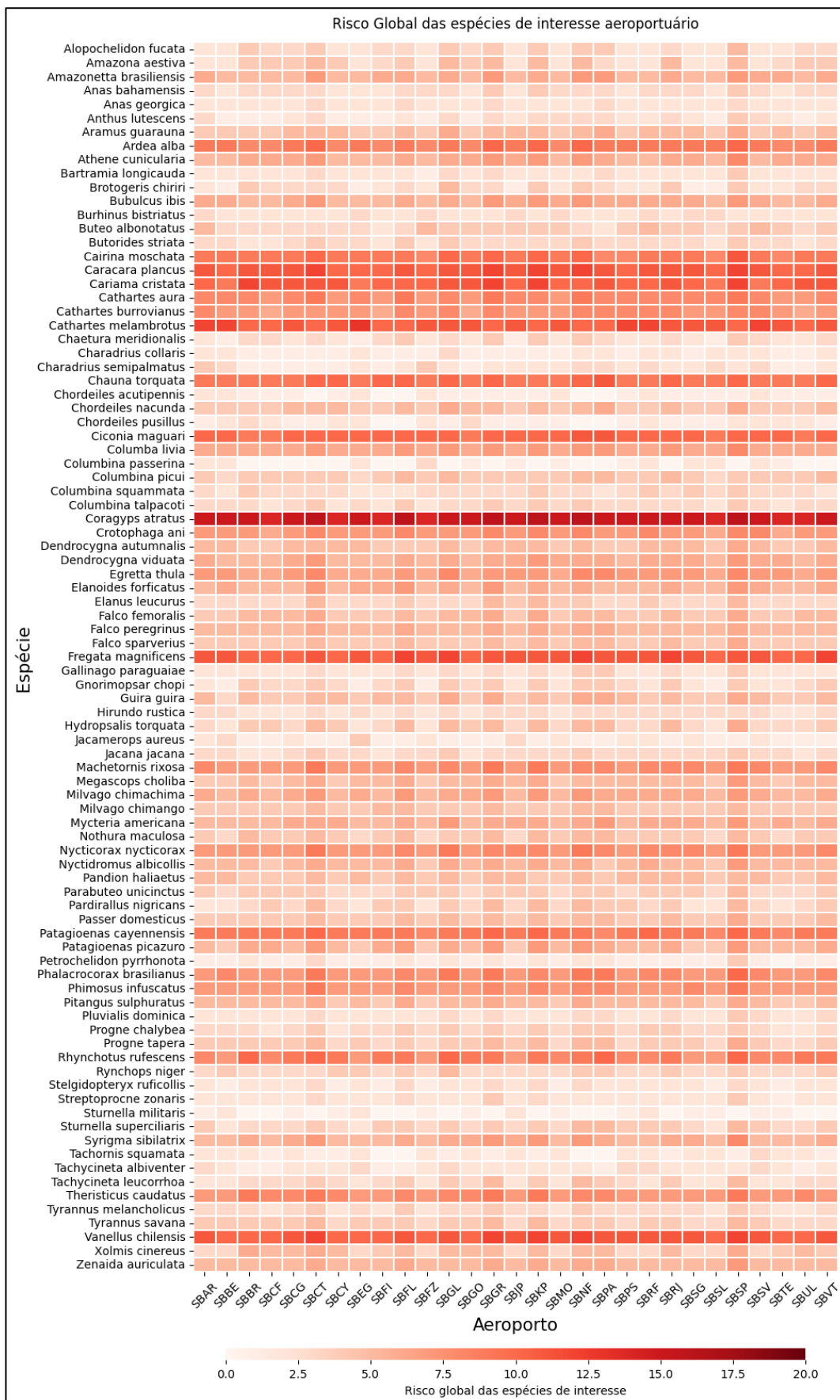
4.2.4 Modelo de Risco Global das Espécies de Interesse Aeroportuário (MRGEIA)

Sendo significativa a relação entre ocorrência predita das espécies segundo o MOPEIA e as colisões segundo TCSP, propõe-se um Modelo de ranqueamento das espécies que seja composto pela predição das espécies segundo o modelo desenvolvido (MOPEIA) associados ao REE.

Para tal, a gradiente de adequabilidade das espécies, ou seja, o risco de ocorrências das espécies foi reclassificado em uma escala que varia de 1 (menor risco) à 5 (alto risco), tal como no REE e os valores foram combinados à nível de espécie.

O modelo de Risco Global, como apresentado na Figura 19, aponta para um quadro de priorização similar ao REE. Espécies como o Urubu-de-cabeça-preta (*Coragyps atratus*), Carcará (*Caracara plancus*), Urubu-da-mata (*Cathartes melambrotus*), Fragata (*Fregata magnificens*) e Quero-Quero (*Vanellus chilensis*), mantiveram-se nas 5 primeiras posições do ranqueamento de REE quanto do MRGEIA com Medianas de Risco Global igual ou acima de 15 pontos, consistentemente presentes em diferentes aeródromos (ANEXO B). Analisando-se os valores máximos amostrados pelas espécies em cada aeródromo, temos que em 33% (n=30) os valores foram superiores a 10 pontos, indicando uma porcentagem significativa de espécies que oferecem risco significativo a aviação. Neste caso, destacam-se Urubu-de-cabeça-preta e Urubu-da-mata pelos altos valores amostrados, acima de 16 pontos, oferecendo riscos seja por características de sua morfologia como seu peso (>10kg), ou por comportamentos detritívoros, onde há consumo de matéria orgânica em decomposição, sendo este fator comum a ambientes urbanizados como subproduto de atividades humanas na forma de vazadouros de lixo, matadouros, dentre outros (NOVAES, 2013). Tal comportamento é predominante, mas não restrito aos membros da família Cathartidae, como o Urubu-de-cabeça-preta e Urubu-da-mata, sendo também comum a espécies da família dos Falconiformes, tendo destaque espécies como o Carcará (VARGAS, 2003).

Figura 19 - Mapa de calor do Risco Global das espécies de interesse aeroportuário



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

CAPÍTULO 5 - DISCUSSÃO

Os resultados obtidos trouxeram *insights* relevantes ao estudo do fenômeno de colisões entre aves e aeronaves através da modelagem aplicada a 89 aves que compõem a fauna de 29 aeródromos brasileiros onde visa-se primeiramente, através de pontos de ocorrência das espécies, estimar a localização das espécies da fauna aeroportuária e avaliar se a maior probabilidade de ocorrências espécies segundo o modelo MaxEnt está correlacionado a maior quantidade de colisões nos aeródromos amostrados. Posteriormente a validação desta hipótese, utiliza-se, somados a estimativa de ocorrência, o risco específico a cada espécie amostrada, para que então seja possível estimar o risco global de cada espécie.

A discussão visa trazer à tona a importância da espacialidade no gerenciamento da fauna aeroportuária, ou seja, para além de determinar qual o risco associado a cada espécie, procura-se criar uma ferramenta para quantificar de maneira escalável onde está o risco predito.

5.1 Análise de Risco espécie específico (REE), potencialidades e limitações do ranqueamento de espécies

O gerenciamento de riscos de avifauna aeroportuária compõe atualmente a identificação de espécies-problema e o estudo dos fatores que possam atraí-las à ASA, o que é crucial para priorizar os esforços de controle do risco de fauna, focando nas espécies que apresentam maior potencial de colidir com aeronaves (DEVAULT *et al.*, 2011), visando afinal contribuir para a segurança das operações aéreas e reduzir os impactos causados pela presença de animais nas áreas próximas aos aeródromos.

Neste contexto, durante o processo de identificação das espécies problema e categorização do risco, foram utilizadas 89 Espécies de Interesse Aeroportuário (EIA), suas proporções em eventos de colisão e/ou avistamento, peso, gravidade das colisões e se estas espécies possuem comportamento gregário etc. Posteriormente, a partir de tais informações, foi criada o ranqueamento do REE que visa quantificar as possíveis consequências em caso de evento que alterem o funcionamento normal das operações aeroportuárias.

Dentre as variáveis amostradas para o cálculo de REE é possível notar que dentre as espécies listadas, o Urubu-de-cabeça-preta (*Coragyps atratus*), Fragata (*Fregata*

magnificens) e Urubu-da-mata (*Cathartes melambrotus*) ocupam as três primeiras posições, compartilhando em comum pontuações altas em diversas variáveis, como tamanho, tendo ao menos 1.5 quilogramas, e frequência relativa igual ou superior a 6, ou seja, 3,5 vezes maior que média de 1,65 da amostra analisada sendo maiores as proporções de colisões com dano e dano maior, apesar de possuírem poucos avistamentos e colisões múltiplas. Também se destacam na frequência relativa espécies como Maguari (*Ciconia Maguari*), Tachã (*Chauna torquata*) e Seriema (*Cariama cristata*), que ocupam a sétima, oitava e nona posições, respectivamente. Neste caso, trazemos a luz através destas três espécies a discussão acerca da necessidade de enfoque não somente nas espécies de maior pontuação em rankings de risco, mas de uma análise ampla, que aborde também ações de mitigação voltadas para espécies de menor risco geral. Neste caso, apesar da posição mais baixa no ranqueamento, estas espécies também apresentam tamanho grande (≥ 4), sendo o diferencial dentre estas e as espécies em maiores posicionamentos a presença de colisões múltiplas.

Dolbeer *et al* (2010 e 2000) aponta para a importância do peso do indivíduo e sua influência na severidade da colisão, sendo que quanto maior o peso da ave, maior o dano causado à aeronave. Neste contexto, este trabalho de Modelagem preditiva de espécies de interesse aeroportuário pode ser utilizado em conjunto com o REE de forma que seja possível priorizar ações manejo em espécies de acordo com a sua média probabilidade de ocorrência predita associada à severidade em caso de colisão. Sendo assim, adiciona-se uma nova dimensão a esta análise, podendo-se estimar a probabilidade das espécies que oferecem risco às operações aeroportuárias não somente por dados coletados por equipes de campo (acarretando em um alto custo de implantação e manutenção de ações de manejo), mas estimados para uma extensão geográfica maior, neste caso, a América do Sul (Figura 7 E e Figura 7 F).

Adicionalmente, espécies nas posições seguintes do ranqueamento como Carcará (*Caracara plancus*), Quero-quero (*Vanellus chilensis*) embora possam não ter a mesma frequência relativa que o Urubu-de-cabeça-preta (*Coragyps atratus*), Fragata (*Fregata magnificens*) e Urubu-da-mata (*Cathartes melambrotus*), nem um peso médio menor que as espécies supracitadas, possuem uma proporção de colisões múltiplas quatro vezes maior que estas espécies o que as coloca em maior grau de risco e portanto, em uma posição maior em nosso ranqueamento por REE.

No contexto amostrado, espécies como Pato-do-mato (*Cairinia moschata*), destacam-se pela mudança de posições quando analisamos o REE e a mediana do Risco Global, neste caso, saindo da décima posição para a sétima posição, o que indica que o MOPEIA tem influência significativa na pontuação obtida pela espécie e, portanto, na sua posição no ranqueamento, indicando espécies de maior risco pela sua probabilidade de ocorrência. Nesta espécie, por exemplo, observa-se valores máximos maior que 0.90 de probabilidade de ocorrência em alguns aeródromos, fato que sustenta a necessidade tanto de análises global das espécies, quanto locais para melhor coordenação dos esforços de mitigação em diferentes esferas de tomada de decisão. Este fato também indica a importância da análise de espécies com probabilidades intermediárias e não somente as de maior ocorrência nos bancos de dados.

Dolbeer & Eschenfelder (2003, 2002) contribuem para a discussão acerca da relação do aumento de risco e o comportamento gregário em espécies de aves nos Estados Unidos, Caribe e Canadá, uma vez que apontam que a maior presença de espécies gregárias é diretamente associada à maiores riscos em relação às colisões.

Nota-se também que as espécies que ocupam as 10 primeiras posições do ranqueamento possuem em comum o tamanho, tendo ao menos 1.5 quilogramas de massa total, fator que influenciou positivamente em seu posicionamento. Dentre estas espécies, destacam-se Maguari (*Ciconia maguari*), Seriema (*Cariama cristata*) e Garça-branca-grande (*Ardea alba*) que ocupam as 10 primeiras posições tanto no quesito Risco predito da espécie através do MOPEIA (APENDICE A) quanto no Risco Global (MRGEIA) (APENDICE B) das espécies. Através do MOPEIA podemos observar que a mediana de ocorrência destas espécies permanece acima de 0.70, e através do risco global podemos aferir que estas possuem ao menos 14 pontos. Estas aves evidenciam a necessidade de análise não somente de aves com maior presença no número total de colisões, sendo que possuem um coeficiente de adequabilidade significativo. No caso destas espécies notamos o grande risco tanto pela proporção de colisões com dano, quanto pelo seu peso maiores que 1.5 quilogramas, sendo o risco, nestes casos, muito maior (WEBER, 2014. DOLBEER & ESCHENFELDER 2002).

Um aspecto relevante a este método são as limitações quanto à identificação das espécies, tal fato decorre principalmente da deterioração de estruturas relevantes a identificação da espécie através de sua morfologia. Ressalta-se que a implementação de programas efetivos de Identificação de Perigo de Fauna (IPF) dependem da acurácia dos dados fornecidos para então suplantarem ações efetivas do manejo das espécies em questão.

Neste cenário, ao menos 50% das identificações da avifauna colidida podem alcançar o nível de espécie apenas através da análise comparativa de estruturas da morfologia das penas das aves (DOVE *et al.* 2017). Outras pesquisas apontam para um cenário em que ao menos 93% das espécies colididas podem ser identificadas utilizando-se sequenciamento genético (GAIKWAD, 2016).

Por fim, a precisão com a qual estes espécimes são identificados é essencial para a criação e manutenção de programas que consigam aplicar o Manejo das espécies de risco de maneira efetiva, aliadas a criação e ampliação da coleta perene de informações para que possamos promover a segurança aeroviária de maneira eficaz, tanto no contexto de ranqueamento e priorização, quanto na utilização de tais informações para criação de Modelos de Distribuição de Espécies (MDEs) eficazes em prever quais espécimes compõem o risco a aviação civil.

5.2 Modelagem preditiva de espécies de interesse aeroportuário (MOPEIA)

A construção da MOPEIA visou a estimativa do coeficiente de adequabilidade, ou seja, a probabilidade de ocorrência de 89 espécies de interesse aeroportuário ao longo da América do sul. Foram realizados recortes das superfícies de probabilidade de ocorrência nos 29 aeródromos amostrados a partir de um raio de 20 quilômetros, referente a Área de Segurança Aeroportuária (ASA) (Figura 20 a Figura 27), onde foram retirados alguns exemplos do *output* gerado através do modelo MaxEnt, que utilizou informações dos pontos de ocorrências das espécies através do *eBirds observation dataset* (SULLIVAN, 2009).

Ressalta-se que os resultados demonstram uma relação estatisticamente significativa entre o número de colisões e a probabilidade de ocorrência das espécies dado o baixo p-valor $<2e-16$ (Tabela 6), tal estatística nos indica a rejeição da hipótese nula (ausência de associação entre a variável preditora e a variável resposta). Outro

indicador da performance do modelo é o z-valor, que é uma estimada através da razão entre o coeficiente pelo erro padrão da amostra fornecendo uma indicação de quanta incerteza "envolve" a estimativa pontual do coeficiente. Em outras palavras, quanto maior o valor de "z", menos incerteza existe, indicando que o erro padrão fica cada vez menor em relação ao valor do coeficiente

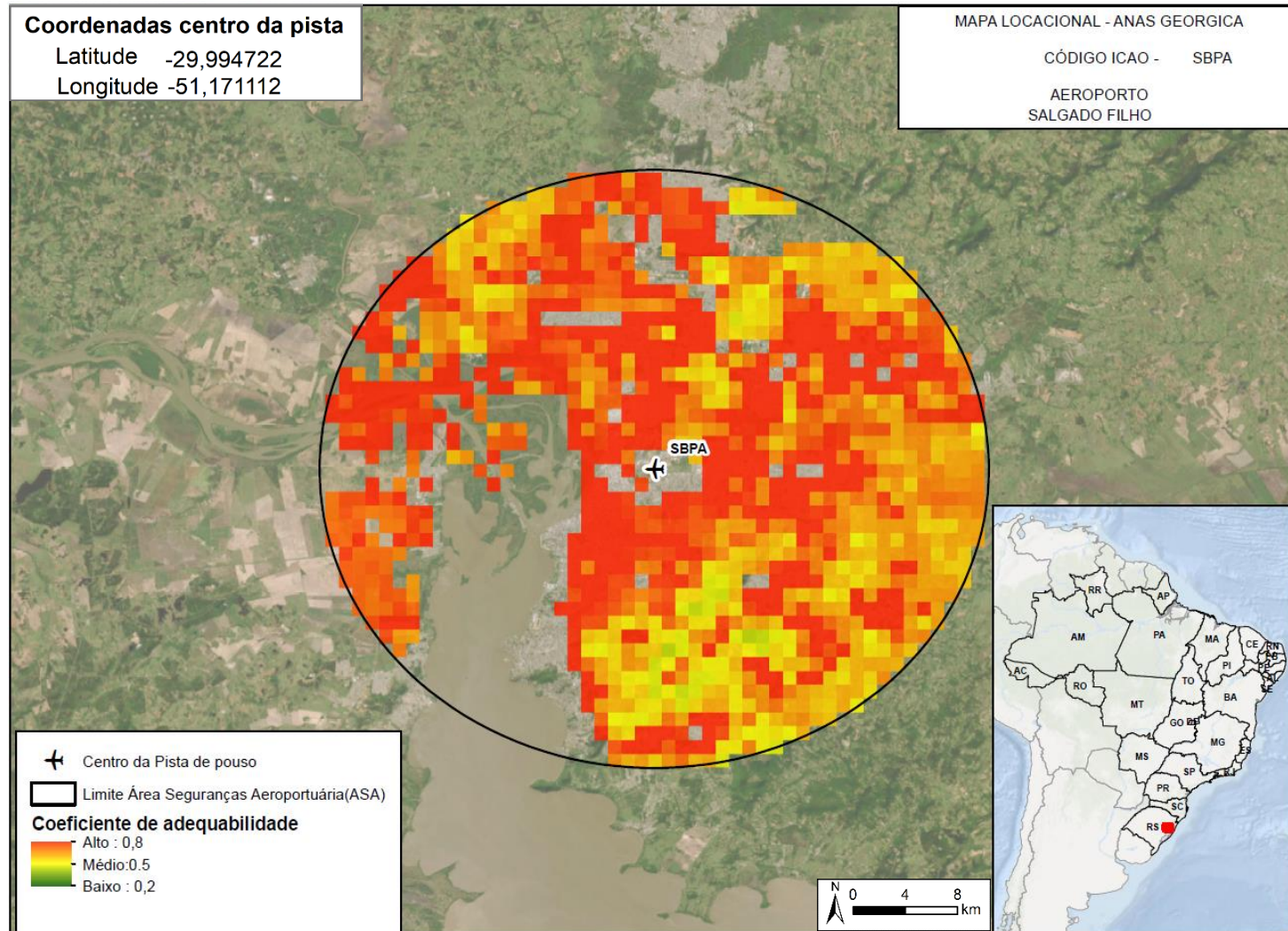
O valor de "z" de 15,09 obtido, com um erro padrão de 0,1 indica que a estimativa do coeficiente é 15,05 vezes maior do que o erro padrão. Sugerindo que modelo é altamente significativo.

Em suma, é possível aferir-se que o aumento na média de ocorrência predita da espécie segundo o MOPEIA está diretamente associado a um aumento nos valores do Total de Colisões Amostradas em cada Espécie (TCSPP). Em termos práticos a estimativa do modelo (1.510 ± 0.1) (Tabela 6), aponta que se aumentar-se a média de ocorrência predita em uma unidade, é esperado que o total de colisões aumente 1.510 vezes.

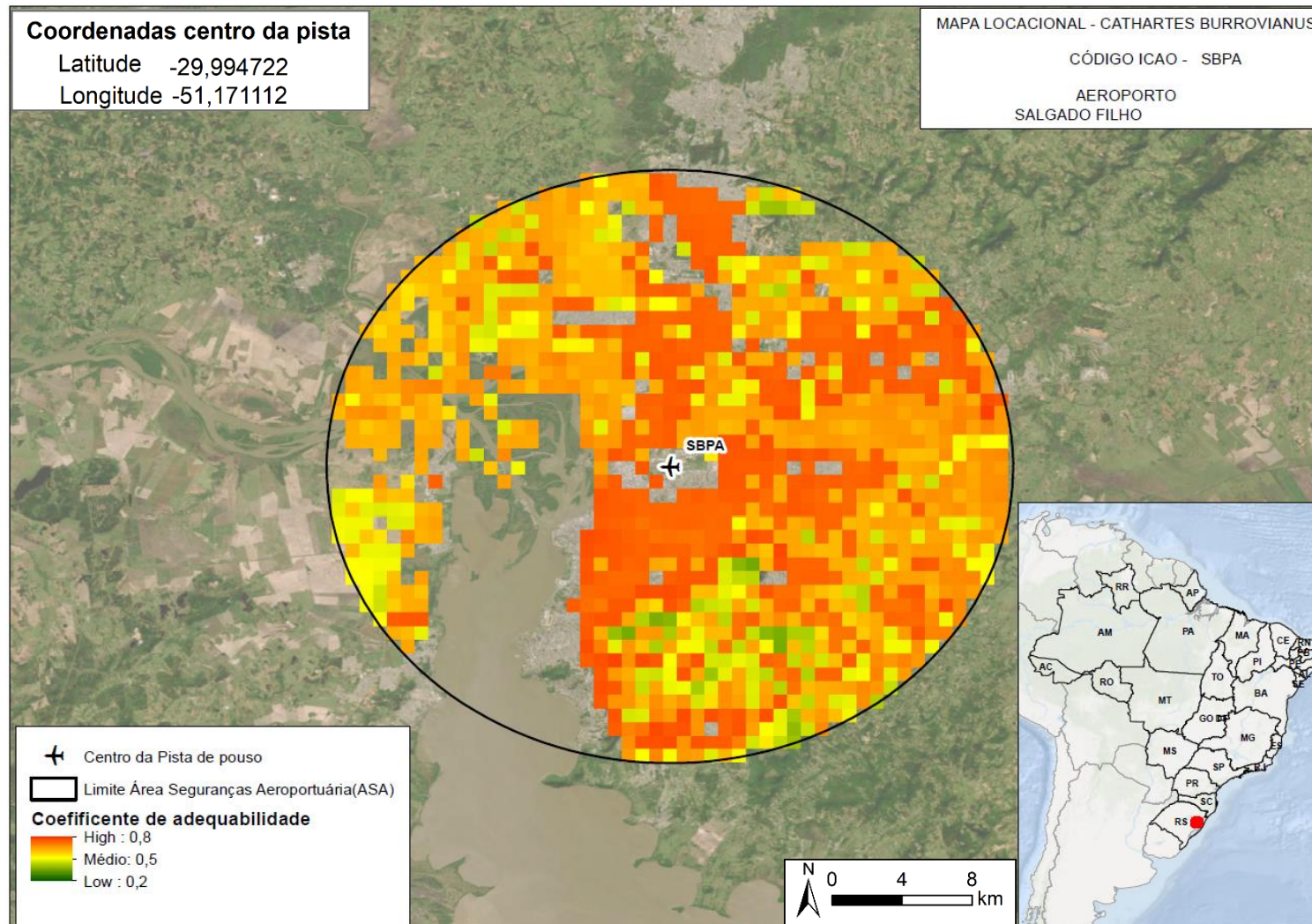
Apesar do alto grau de significância entre a probabilidade de ocorrência das espécies e o número de colisões amostradas para as espécies analisadas, tem-se neste modelo uma probabilidade de ocorrência e não a probabilidade de colisões. Desta forma, tem-se a causalidade deste evento fruto da contribuição de diversos fatores, estimando a probabilidade de se encontrar estas espécies nestas regiões, não o número de colisões decorrentes desta probabilidade de ocorrência.

Através das espacializações pode-se discutir acerca dos resultados obtidos e resumidos nas probabilidades de Ocorrência por Espécie por Aeroportos (Figura 14). Será dado maior enfoque as potencialidades e possíveis limitações da utilização de MDEs na segurança das operações aeroportuárias nos tópicos seguintes.

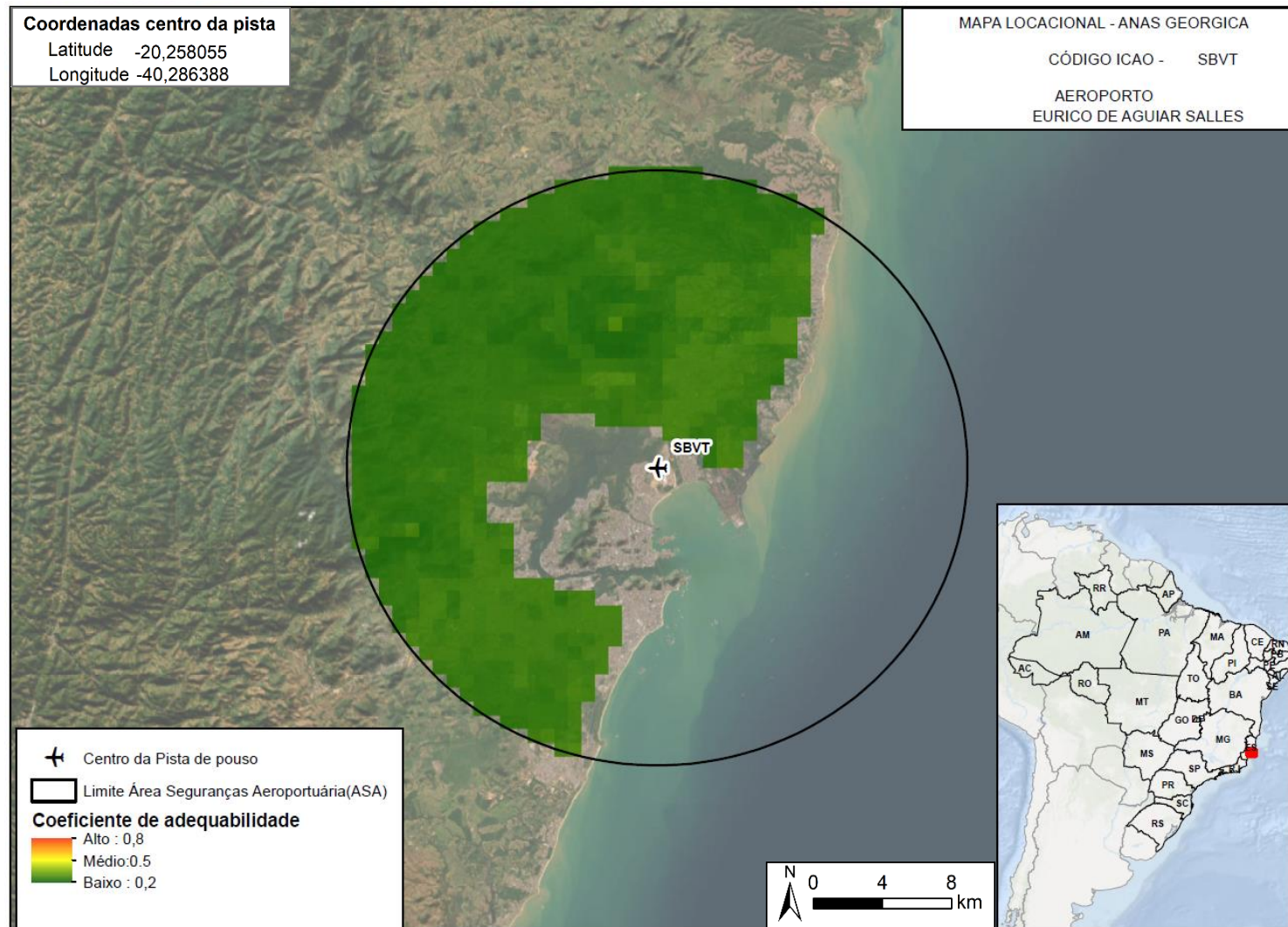
Figura 20 – Mapa de ocorrência predita da Marreca-parda (*Anas georgica*) no aeroporto Salgado Filho (RS)



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

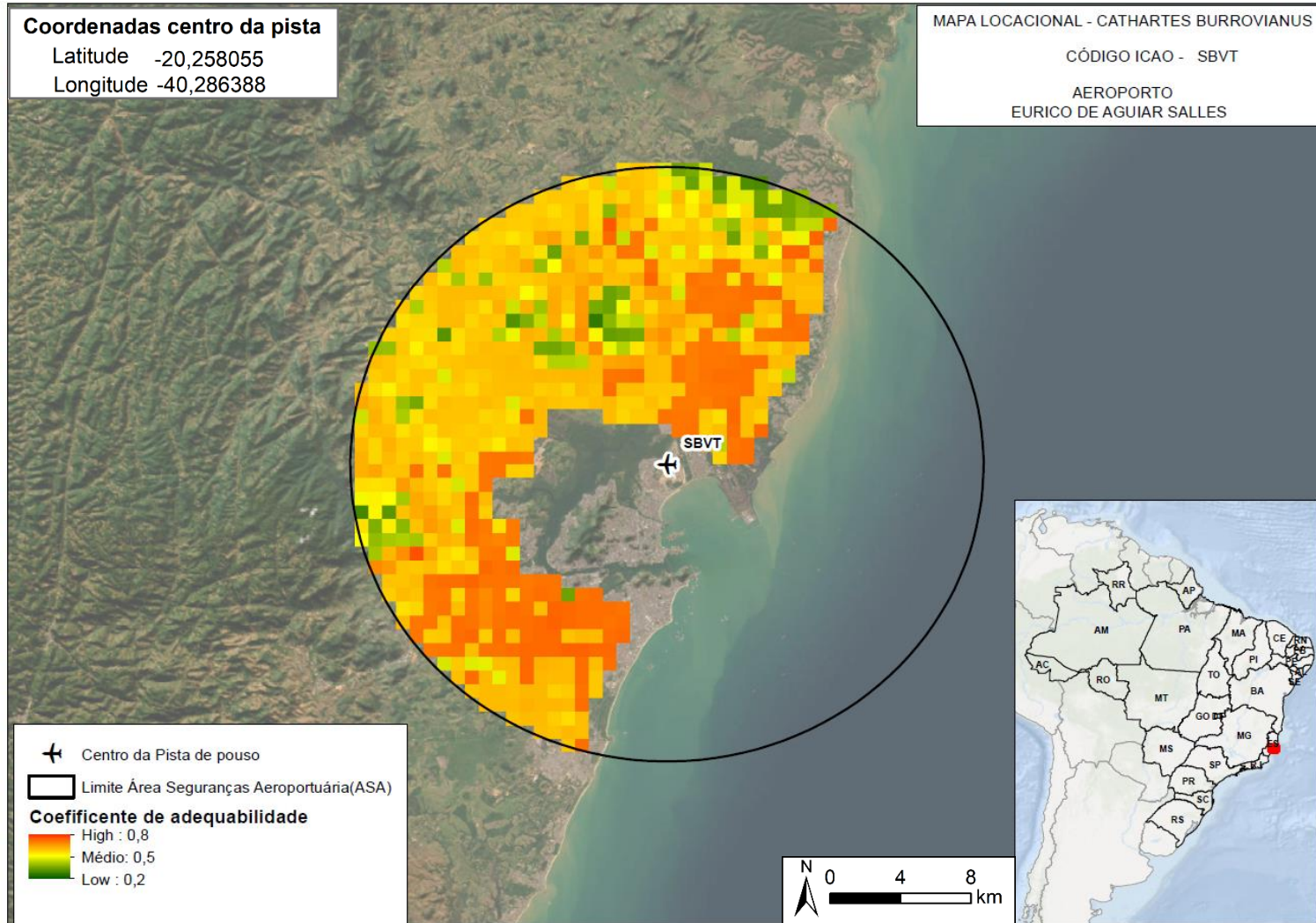
Figura 21 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça amarela (*Cathartes burrovianus*) no aeroporto Salgado filho (RS)

Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 22 - Mapa de ocorrência predita da Marreca-parda (*Anas georgica*) no aeroporto Eurico de Aguiar Salles (ES)

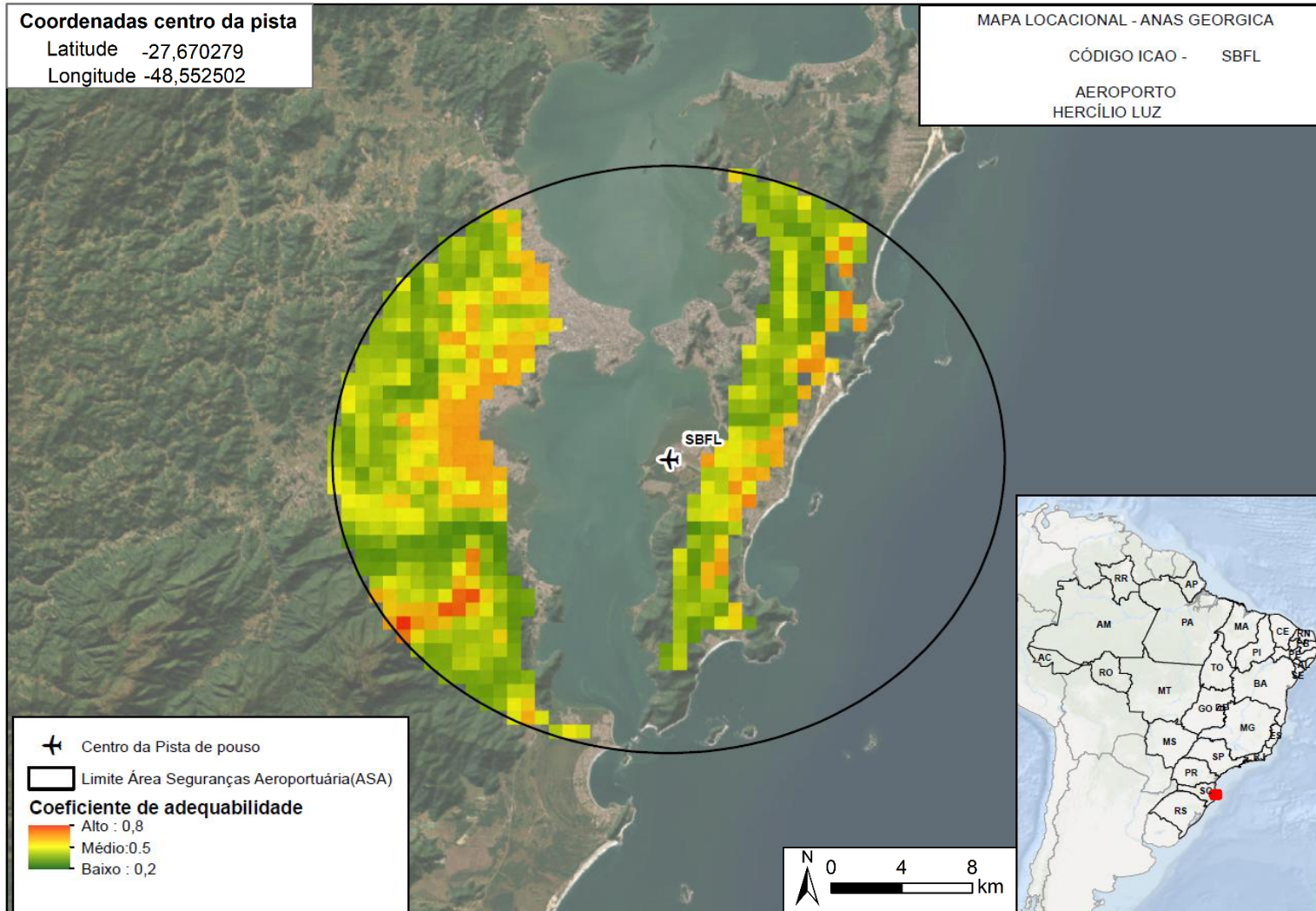
Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 23 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça amarela (*Cathartes burrovianus*) no aeroporto Eurico de Aguiar Salles (ES)



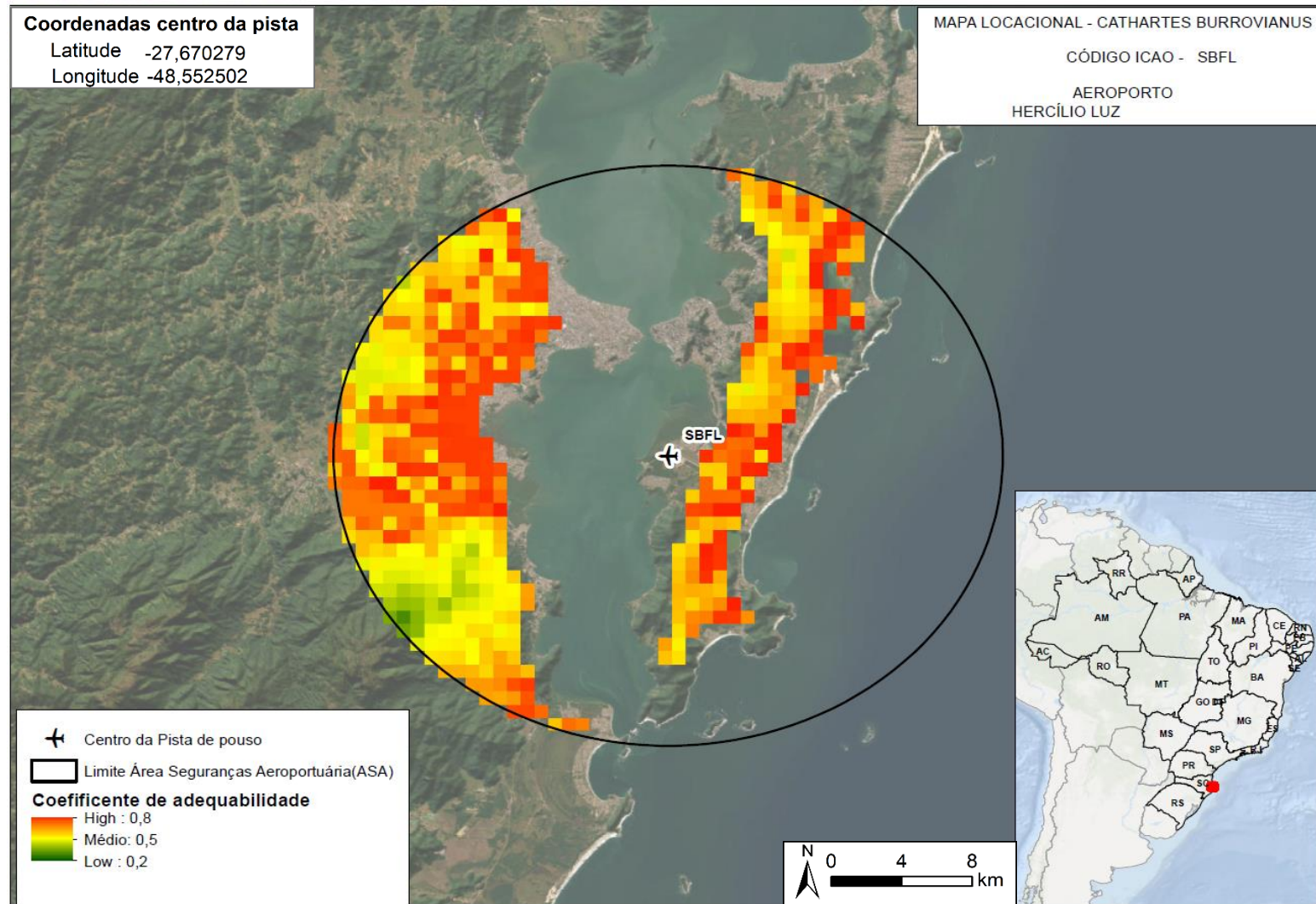
Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 24 - Mapa de ocorrência predita da Marreca-parda (*Anas georgica*) no aeroporto Hercílio Luz (SC)



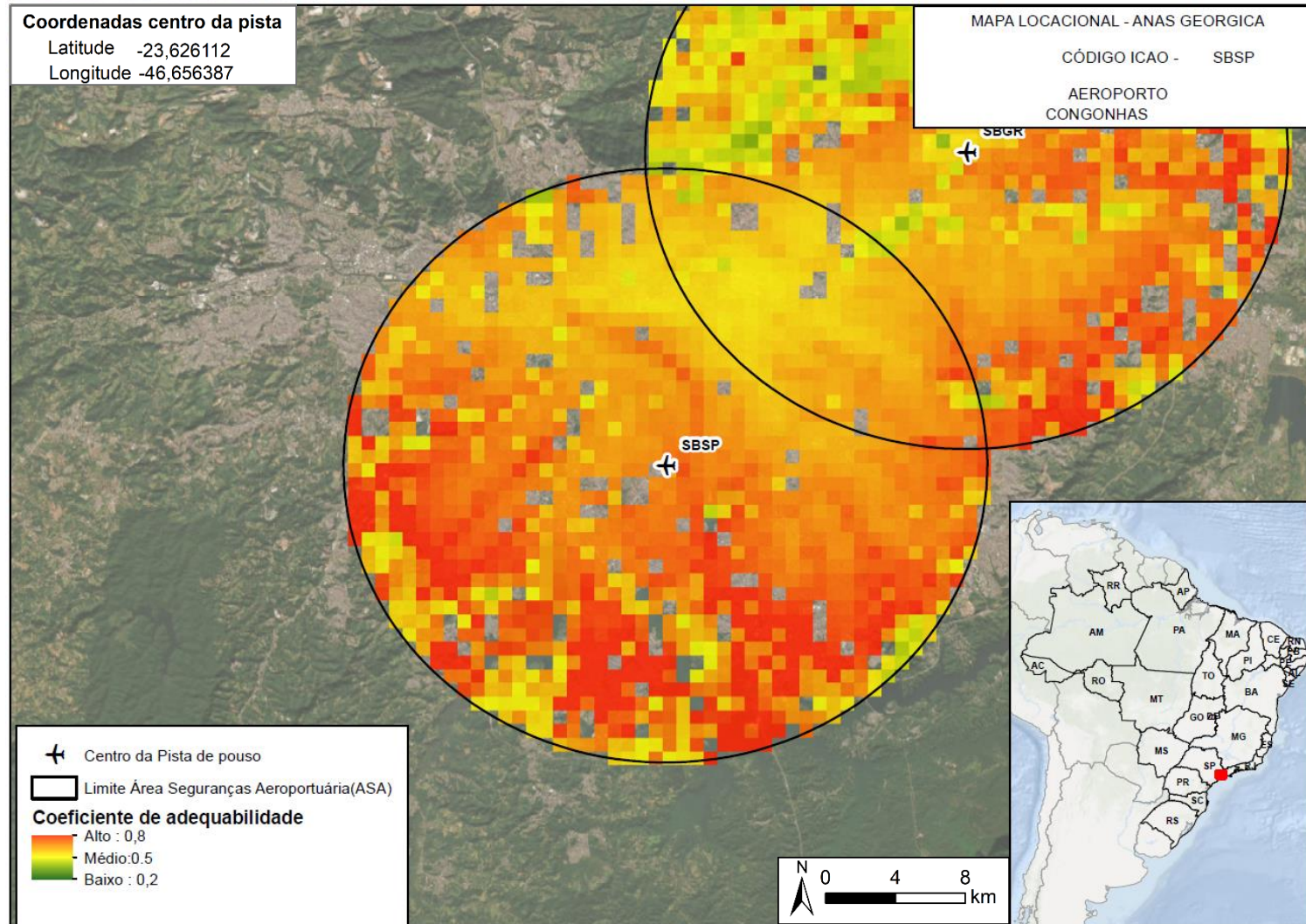
Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 25 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça amarela (*Cathartes burrovianus*) no aeroporto Hercílio Luz (SC)



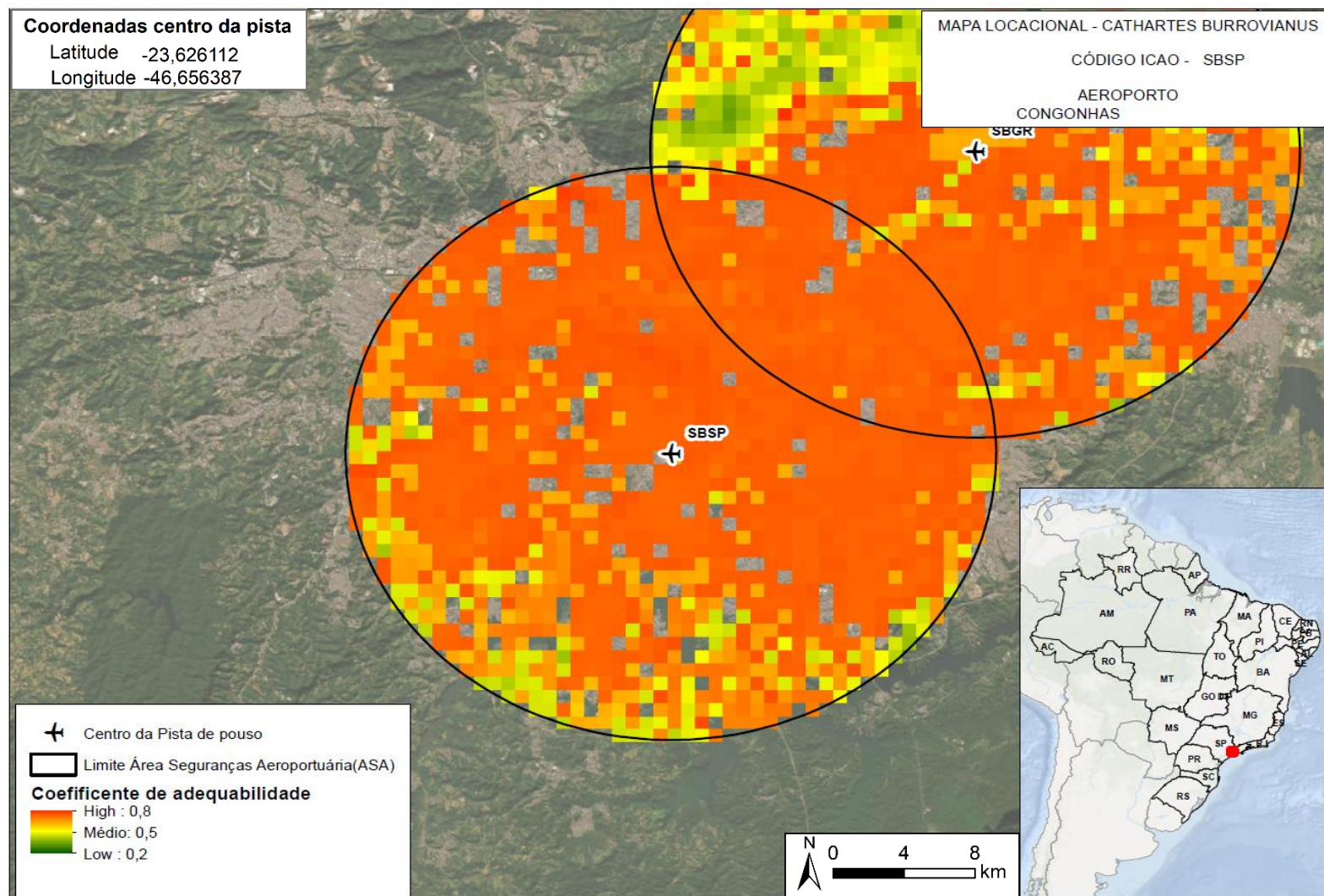
Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 26 - Mapa de ocorrência predita da Marreca-parda (*Anas georgica*) no aeroporto de Congonhas (SP)



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.-.

Figura 27 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça amarela (*Cathartes burrovianus*) no aeroporto de Congonhas (SP)



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Nestes exemplos, foram abordadas duas espécies com ecologias e distribuições geográficas distintas ao longo da área de estudo, Marreca-parda (*Anas georgica*) que possui uma distribuição localizada na região Sul/Sudeste na área de estudo, habitando os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, com menos frequência, já foi observada nos estados mais ao norte, em São Paulo e Rio de Janeiro (NASCIMENTO *et al*, 2006) enquanto o Urubu-de-cabeça-amarela (*Cathartes burrovianus*) possui ampla distribuição geográfica, percorrendo desde o Sul da Argentina até a América Central (COLOMBO & SEGURA, 2018; FERGUSON-LEES AND CHRISTIE 2001).

No contexto de segurança aeroviária, os aeroportos na Figura 22 e Figura 23, demonstram através das cores avermelhadas, que indicam maior probabilidade de ocorrência até as cores verdes que indicam menor probabilidade, a variabilidade observada na amostragem. Na Figura 17 nota-se que espécies como a Marreca-parda apresentaram baixa probabilidade de ocorrência quando comparada ao urubu-de-cabeça-amarela para o mesmo aeródromo, tal fato advém de características particulares a ecologia de cada espécie, ou seja, como estas interagem com o ecossistema ao seu redor, com o ambiente físico que as cercam.

Como demonstrado na Figura 13, não há uma variável que explique a gama diversa de interações que cada espécie possui com o meio abiótico em seu entorno, possuindo hábitos alimentares distintos, impactando diretamente na sua adequação ao habitat e conseqüentemente, alterando como cada variável explica a sua presença/ausência ao longo da escala espacial. Ao mesmo tempo que reflete justamente a unicidade de cada espécime e contribuem para a capacidade do modelo de generalizar seus resultados.

Neste contexto, ressalta-se a versatilidade do modelo, ou seja, sua capacidade de estimar a probabilidade de ocorrência de diferentes espécies em diferentes contextos geoecológicos, restringindo a ocorrência em alguns cenários, como da *Anas georgica* e expandindo em casos de espécies de ampla distribuição, como *Cathartes burrovianus*, fato que resulta do equilíbrio entre especificidade e generalização do modelo.

Nestes exemplos, analisa-se o habitat e como este podem favorecer ou limitar a presença algumas espécies de aves, podendo a distribuição estimada de ocorrência das espécies ser influenciada por subprodutos de atividades antrópicas como vazadouros de lixo, culturas agrícolas e matadouros, que podem favorecer a ocorrência de espécies que se alimentam de matéria em decomposição (NOVAES, 2013), como os membros do gênero *Cathartes* (*C. aura*, *C. melambrotus* e *C. burrovianus*) que compõe as mais altas posições do REE (Tabela 4) assim como o Risco Global das espécies de interesse aeroportuário (APENDICE A, B) (Figura 19).

Tais descobertas sugerem também que Aeroportos como o Aeroporto de Congonhas (SBSP) (Figura 26, Figura 27,) e o Aeroporto Salgado Filho (SBPA) (Figura 20, Figura 21) podem oferecer condições favoráveis de habitat e recursos que atraem uma diversidade maior de espécies de aves (Figura 14). A maior probabilidade (>0.80) observada no Aeroporto SBSP e SBPA pode ser atribuída a fatores como cobertura vegetal adensada, rica em recursos naturais e proximidade de corpos d'água, tornando-os aeroportos de prioridade em ações de mitigação, por outro lado, aeroportos como SBVT apresentam probabilidades nulas (>0.10) de ocorrência de espécies com a Marreca-parda, indicando a importância do estudo da ecologia das espécies à assertividade da implantação de planos de manejo de espécies, na medida em que pode-se dar maior enfoque à espécies que tem maior probabilidade de ocorrência, e portanto, maior risco de colisão, direcionando ações específicas de controle do risco de ocorrência daquele espécime.

Neste trabalho, compreender tanto as áreas de probabilidade mais baixa quanto as de maior probabilidade mais alta podem auxiliar a identificar desafios potenciais para programas de Identificação de Perigo Fauna (IPF), tão quanto direcionar ações de mitigação de ameaças potenciais pelos operadores de aeródromos. A partir disso será possível indicar regiões de priorização de ações de Manejo da gestão da paisagem tão quanto no direcionamento com relação à potenciais focos atrativos de fauna de maneira assertiva promovendo um ambiente mais favorável a segurança aeroviária aliada a redução dos custos de implementação destas ações.

Tais resultados tornam-se relevantes ao entendimento do fenômeno das Colisões entre aves e aeronaves à medida em que a hipótese central desta pesquisa aponta que a maior probabilidade de ocorrência das espécies está significativamente

relacionada ao aumento de colisões, ao mesmo tempo que destacam a variabilidade espacial nas probabilidades de as espécies ocorrerem nos aeroportos estudados, enfatizando a importância de considerar fatores específicos de cada espécie.

5.2.1 Limitações e melhorias na aplicação do MOPEIA como ferramenta na manutenção da segurança aeroportuária

Tendo como objetivo a criação de um modelo que pudesse estimar a presença de espécies de interesse aeroportuário no qual os resultados dos modelos correspondem a espécies de maior ou menor representatividade nos bancos de dados públicos consultados, temos por exemplo espécies como o Urubu-de-cabeça-preta (*Coragyps atratus*), uma espécie com ampla distribuição geográfica e que, portanto, podem ocorrer em uma ampla variedade de condições ambientais. Sua distribuição pode ser influenciada por uma combinação complexa de fatores bióticos e abióticos (ELITH *et al.*, 2010; BARBET-MASSIN *et al.*, 2011, 2012).

Neste caso, para uma modelagem apresentar precisão, a distribuição de espécies generalistas pode-se exigir um conjunto mais complexo de variáveis preditoras, não sendo o enfoque deste estudo, uma vez que a adição de tais variáveis poderia afetar negativamente a performance do modelo para as demais espécies analisadas (WISZ *et al.*, 2008).

Ressalta-se que tal variabilidade na capacidade do modelo em estimar a adequabilidade das espécies é prerrogativa do estudo, que visa descrever e compreender o fenômeno da colisão entre aves e aeronaves de maneira holística, ou seja, aplicável a maior gama de contextos abordados. Perde-se, no entanto, a especificidade do modelo para espécies generalistas, que possuem distribuição potencial menos restrita por fatores específicos do ambiente.

Uma possível alternativa para atenuação dos efeitos das especificidades de algumas espécies amostradas reside na criação de nichos em que se agrupam as espécies de acordo variáveis comportamentais (ex: separar os nichos de acordo hábitos alimentares) criando um *Stacked-Species Distribution Model* (S-SDM) que consiga estimar regiões prioritárias para ações de manejo e mitigação de riscos reduzindo efeitos da variabilidade do grau de adequabilidade amostrado para as espécies (SCHMITT *et al.* 2017;. PINTO-LEDEZMA & BARES, 2021; COCCON, 2015).

Parte do processo de predição das espécies de importância depende da listagem das espécies de ocorrência em aeródromos brasileiros, neste caso foram utilizados os dados de aeródromos que possuem maior volume de movimentações, ao menos 1 milhão de passageiros anualmente (CENIPA, 2023), sendo que estes aeródromos são responsáveis 90% do total de voos nacionais e neles residem 75% da totalidade dos *reportes* de colisão de aves e aeronaves. Sendo assim, o enfoque da amostragem de espécies colididas atualmente tem dois aspectos relevantes a criação de modelos capazes de melhor estimar a probabilidade de ocorrência:

- 1) Identificação correta das espécies e a distinção entre espécies semelhantes são aspectos essenciais para fornecer informações precisas sobre a composição da avifauna local.
- 2) A coleta de dados deve ser realizada de forma sistemática e deve considerar o monitoramento como uma ferramenta perene

Porém, durante o processo de tratamento de dados oriundos do SIGRA algumas ocorrências das espécies registradas nos *reportes* apresentaram alto grau de autocorrelação espacial, ou seja, os pontos amostrados possuem a mesma latitude e longitude, trazendo potenciais vieses caso estas informações sejam utilizadas no contexto de modelagem. Desta forma é recomendada a utilização de sistemas que consigam com maior grau de exatidão geográfica determinar o local da colisão e/ou avistamento da espécie na região da ASA. Uma possibilidade de utilização destes dados pode ser aplicada através da utilização de um modelo GLM (*Generalized linear model*) tal como aplicado por Coccon *et al*, 2015, em que as ocorrências das espécies foram utilizadas sob um *grid* de 1km e um modelo GLM foi utilizado para estimar a probabilidade de presença das espécies frente aos diferentes usos do solo amostrados.

Sob outra perspectiva, a de que dados são coletados com alto grau de precisão, pode-se também aplicar modelos GWR (*Geographically Weighted Regression*), tal como Shao *et al* 2020, para que seja possível analisar a relação da densidade de colisões através da densidade de Kernel, com os diferentes usos do solo, sendo que tanto utilizando GLM quanto GWR, parte-se da premissa de que a especificidade do modelo é alta e perde-se a generalização do modelo à diferentes espaços aeroportuários, em outras palavras, tal grau de especificidade pode tornar a aplicação de modelo restritas àquela realidade somente.

Em suma, a utilização e proposição de modelos para predição de risco de fauna em aeródromos depende do objetivo pretendido assim como da disponibilidade de dados, neste caso, pretendia-se construir um modelo que pudesse ser estatisticamente significativo em prever colisões em 29 aeródromos através de dados secundários, e que tal ferramenta possa ser utilizada no planejamento em contextos como:

- 1) Norteador de ações de mitigação em aeródromos operacionais
- 2) Ferramenta de planejamento e implantação de novos aeroportos

No caso de aeródromos de classe 1 e 2, vale ressaltar que a não há obrigatoriedade em reportar, o que pode resultar em uma lacuna significativa na modelagem das espécies de aves, havendo uma sub-amostragem que pode limitar a compreensão dos riscos específicos enfrentados por esses aeródromos de menor porte e dificultar a elaboração de estratégias de gerenciamento adequadas. Sendo este o cenário atual em um quadro de aumento no número de colisões, a utilização da modelagem pode se apresentar como uma ferramenta acessível de análise do risco de fauna (ANDREWS *et al*, 2022).

Outra possível limitação de MDEs neste contexto parte do viés de coleta de amostras no caso do banco de dados *eBirds dataset*, sendo as coletas mais recorrentes em grandes centros urbanos. Neste sentido, pode-se afirmar que o modelo proposto é apropriado para modelagem em aeródromos em regiões urbanizadas, mas que melhores estimativas de abundância das espécies, como propostas por Fink *et al*, 2020, podem trazer melhorias à qualidade dos resultados gerados em contextos.

5.2.2 Aplicabilidade do Modelo de Ocorrência Predita das Espécies de Interesse Aeroportuário (MOPEIA)

Uma das aplicabilidades da MOPEIA decorre de sua capacidade de estimar a presença das espécies da avifauna aeroportuária ao longo de uma escala abrangente, neste caso, a América do Sul. Portanto, podemos prever a partir de dados secundários a probabilidade de ocorrência de espécies em aeródromos que possuam restrições ao estabelecimento de um sistema perene de coleta e manipulação de dados relativos à avifauna em suas Áreas de Segurança Aeroportuária. Também neste contexto, o modelo pode ser utilizado em aeródromos de recente construção, ou seja, com poucos dados coletados para espécies de avifauna ou até mesmo em aeródromos em planejamento, podendo compor o processo de tomada de decisão.

Assim sendo, serão extrapolados os resultados obtidos através do MOPEIA a dois aeródromos com características e localizações distintas (Tabela 7), tendo em comum o fato de serem aeródromos de classe 1, que atendem ao menos de 200 mil passageiros anualmente (ANAC, 2023).

Tabela 7 - Aeroportos contemplados para análise através de aplicação do MOPEIA

Código OACI	CIAD	Nome	Município	UF	Latitude	Longitude	Altitude	Classe do aeródromo (Portaria nº 1540/2020)
SBJH	SP1176	São Paulo Catarina aeroporto executivo	São Roque	SP	23° 25' 37" S	47° 9' 57" W	777 m	Classe I
SNUI	MG0045	Araçuaí	Araçuaí	MG	16° 51' 7" S	42° 2' 46" W	360 m	Classe I

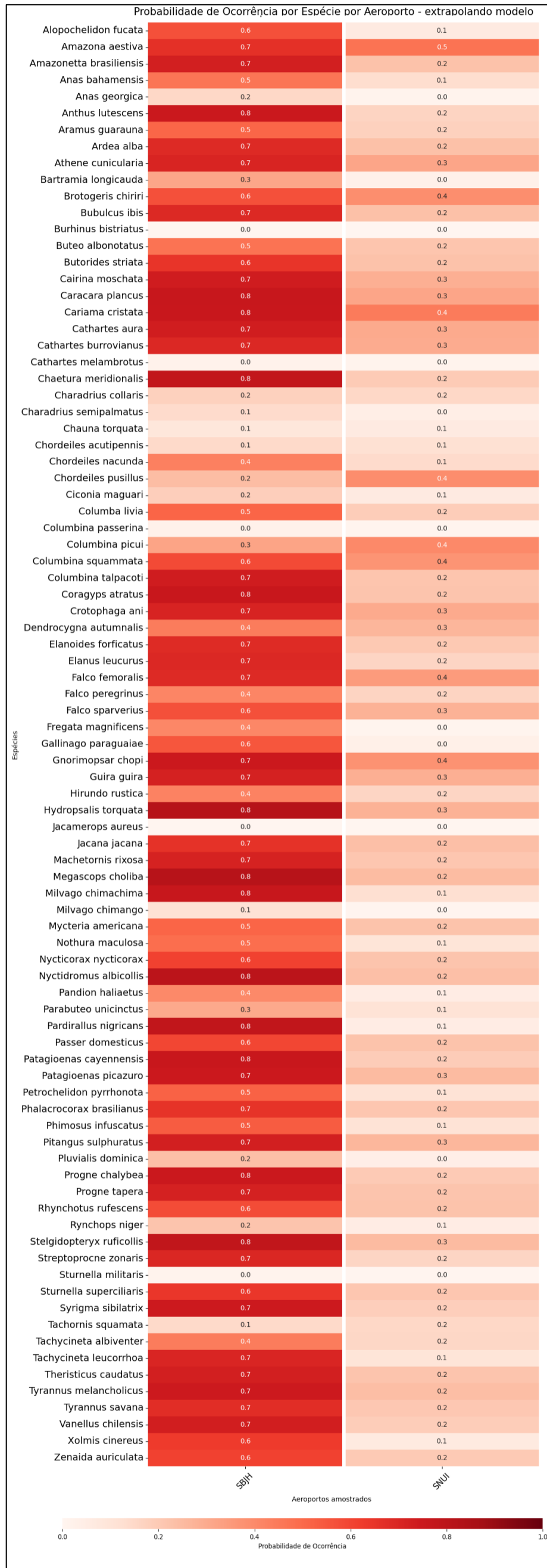
Fonte: ANAC, 2022. Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Em ambos os aeródromos foram calculadas as probabilidades de ocorrência dentre 87 espécies de aves amostradas. O primeiro exemplo amostrado foi o aeroporto São Paulo Catarina (SBJH) localizado em São Roque, no estado de São Paulo. Um aeródromo de construção recente, inaugurado em 2019, localizado em uma região de Mata Atlântica adensada. O segundo exemplo para aplicação do modelo foi o aeródromo Araçuaí localizado no município de mesmo nome, no estado de Minas Gerais em uma região de Cerrado com fragmentos florestais esparsos. Neste aeródromo, em vista da recente abertura de diversas lavras de Lítio, metal de importância a indústria de eletroeletrônicos e na confecção de baterias. Contudo, uma das consequências desta rápida expansão econômica foi o recente aumento no número de operações de voo realizadas nos últimos 3 anos, sendo também enfoque desta pesquisa analisar os possíveis riscos associados a este aeródromo.

A partir do mapa de calor na Figura 28 notamos que a probabilidade média (0,52) das espécies ocorrerem no aeródromo São Paulo Catarina é 2.8 vezes maior quando comparado a média do aeroporto Araçuaí (0,18). Neste primeiro aeródromo, 42% (n= 41) das espécies possuem ao menos 70% de probabilidade de ocorrência enquanto no segundo aeroporto analisado, a espécie de maior probabilidade de ocorrência é o Papagaio-verdadeiro (*Amazona aestiva*), espécie de ampla distribuição geográfica.

Neste caso, a dedução do *output* gerado pela modelagem traz consigo *insights* que podem ser explicados a partir da interpretação das variáveis amostradas. Neste contexto, a maior probabilidade predita pode ser explicada por uma série de fatores ambientais que integram a composição de sua ASA, dentre as quais iremos analisar e interpretar em seguida.

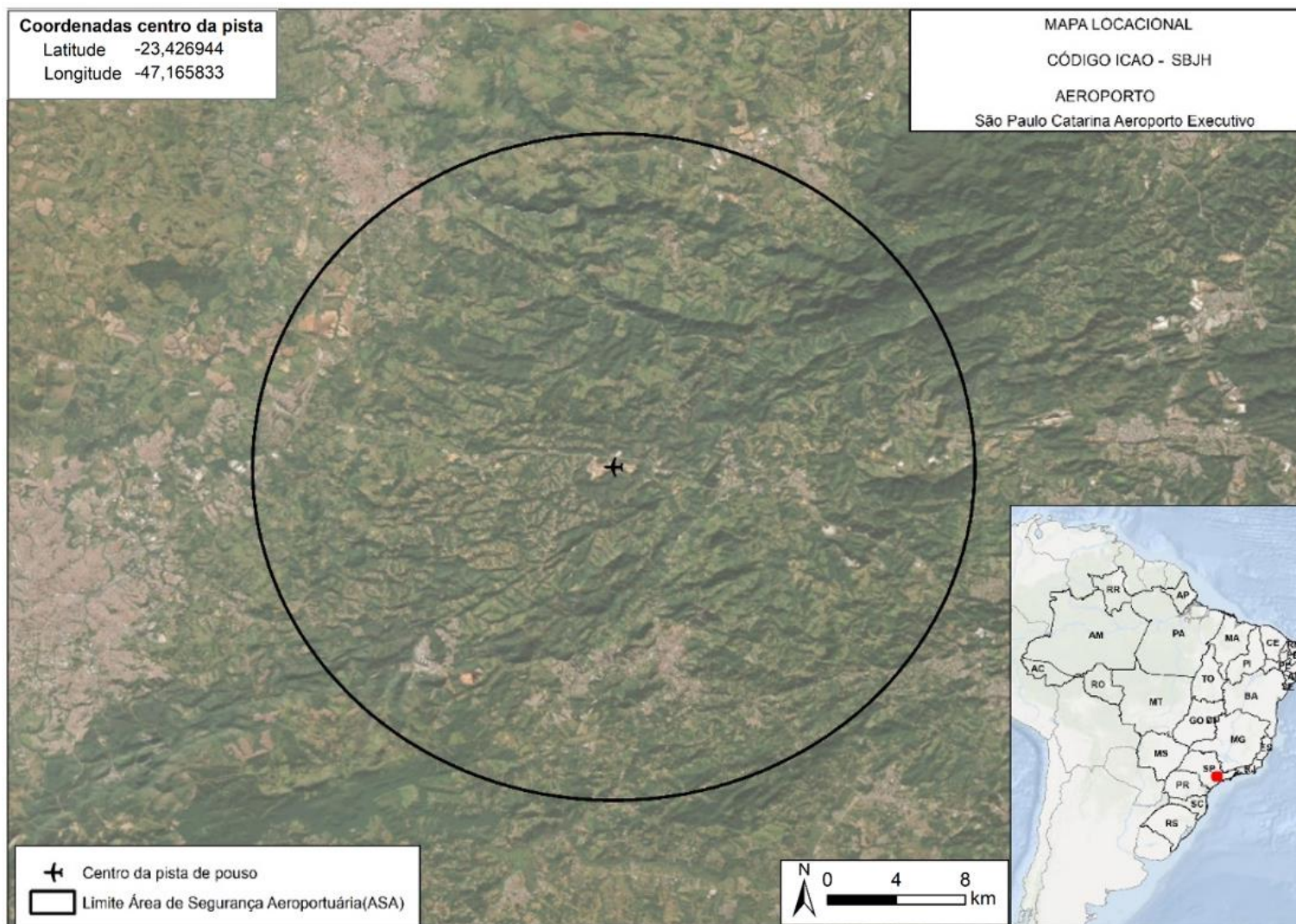
Figura 28 - Mapa de calor das ocorrências nos aeródromos em que foram analisados a probabilidade de ocorrência das espécies segundo o MOPEIA



Fonte: Elaborado pelo Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

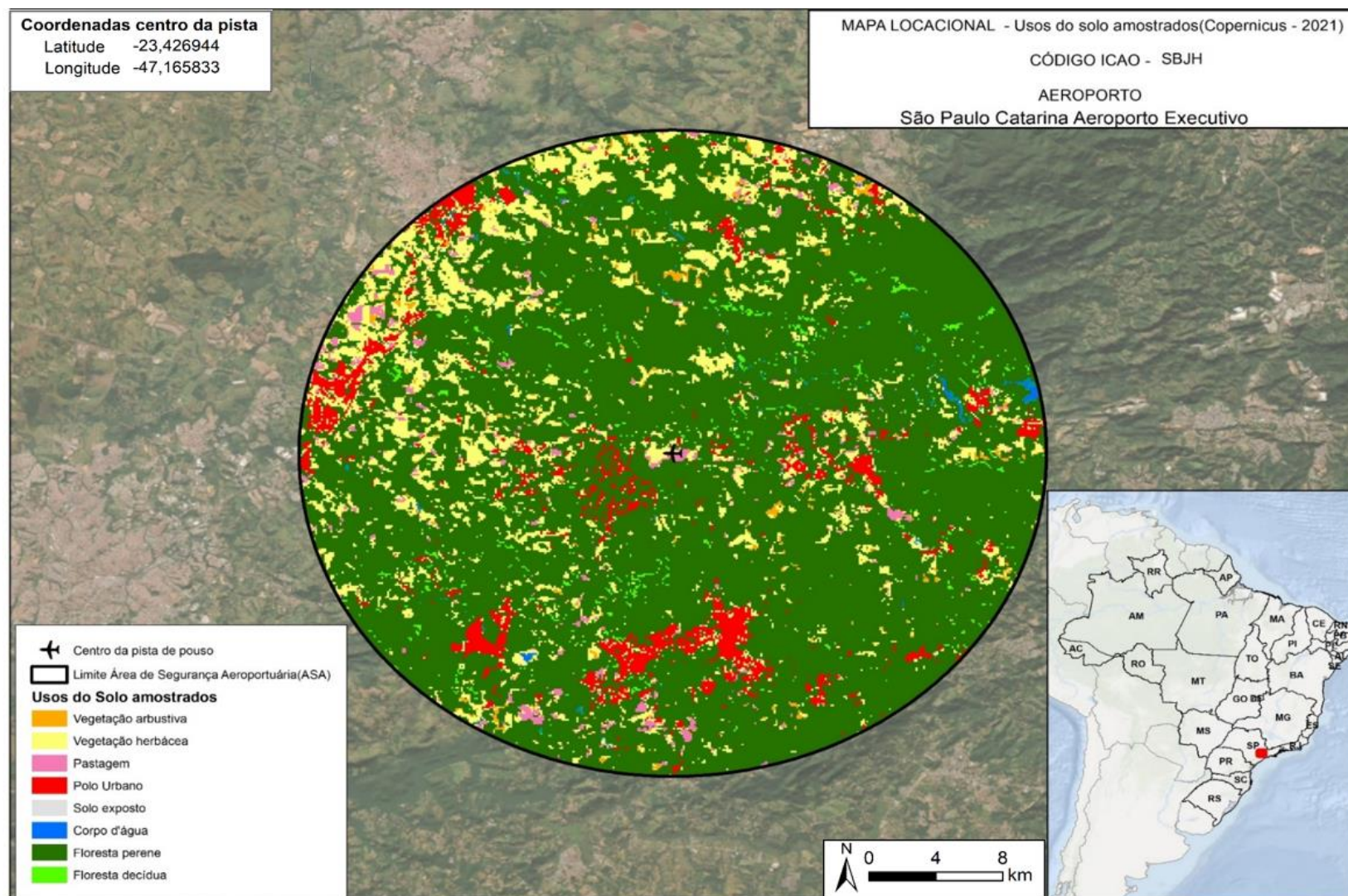
Parte da avaliação da probabilidade de ocorrência incorre na análise visual da distribuição das variáveis em longo da escala espacial amostrada, neste caso a Área de Segurança Aeroportuária (ASA). Nota-se através da análise dos mapas contendo a composição natural em sentinel-2 (Figura 19), uso do solo classificado (Figura 30) e NDVI (Figura 31) que o aeroporto São Paulo Catarina possui diversos fatores que promovem um habitat favorável à ocorrência da avifauna, possuindo faixas contíguas de mata atlântica desenvolvida que fornecem abrigos e recursos abundantes às espécies de avifauna. Também podemos notar a proximidade com corpos d'água, comumente associados ao aumento da incidência de algumas espécies de aves.

Figura 29 - Imagem Sentinel-2 do São Paulo Catarina Aeroporto Executivo (SP). Neste caso podemos notar uma paisagem com extensa vegetação, preenchida pontualmente por usos do solo antropizados



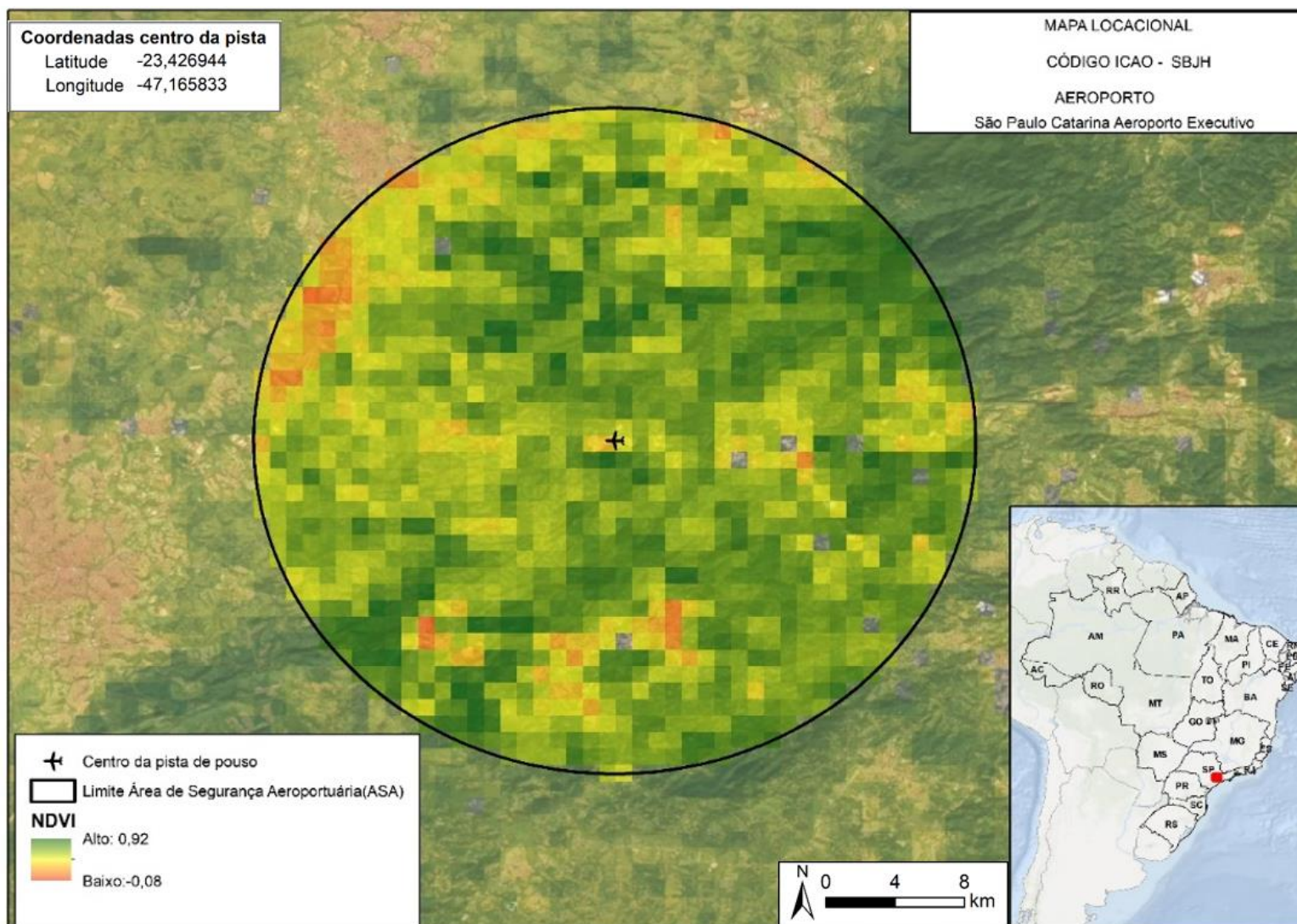
Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 30 - Recorte do uso e cobertura do solo (Copernicus, 2021) para a ASA no São Paulo Catarina Aeroporto Executivo (SP). Neste caso, podemos observar a variabilidade dos tipos de uso do solo ao longo da Área de Estudo, tão quanto a predominância da vegetação perene



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 31 - Imagem NDVI do São Paulo Catarina Aeroporto Executivo (SP)

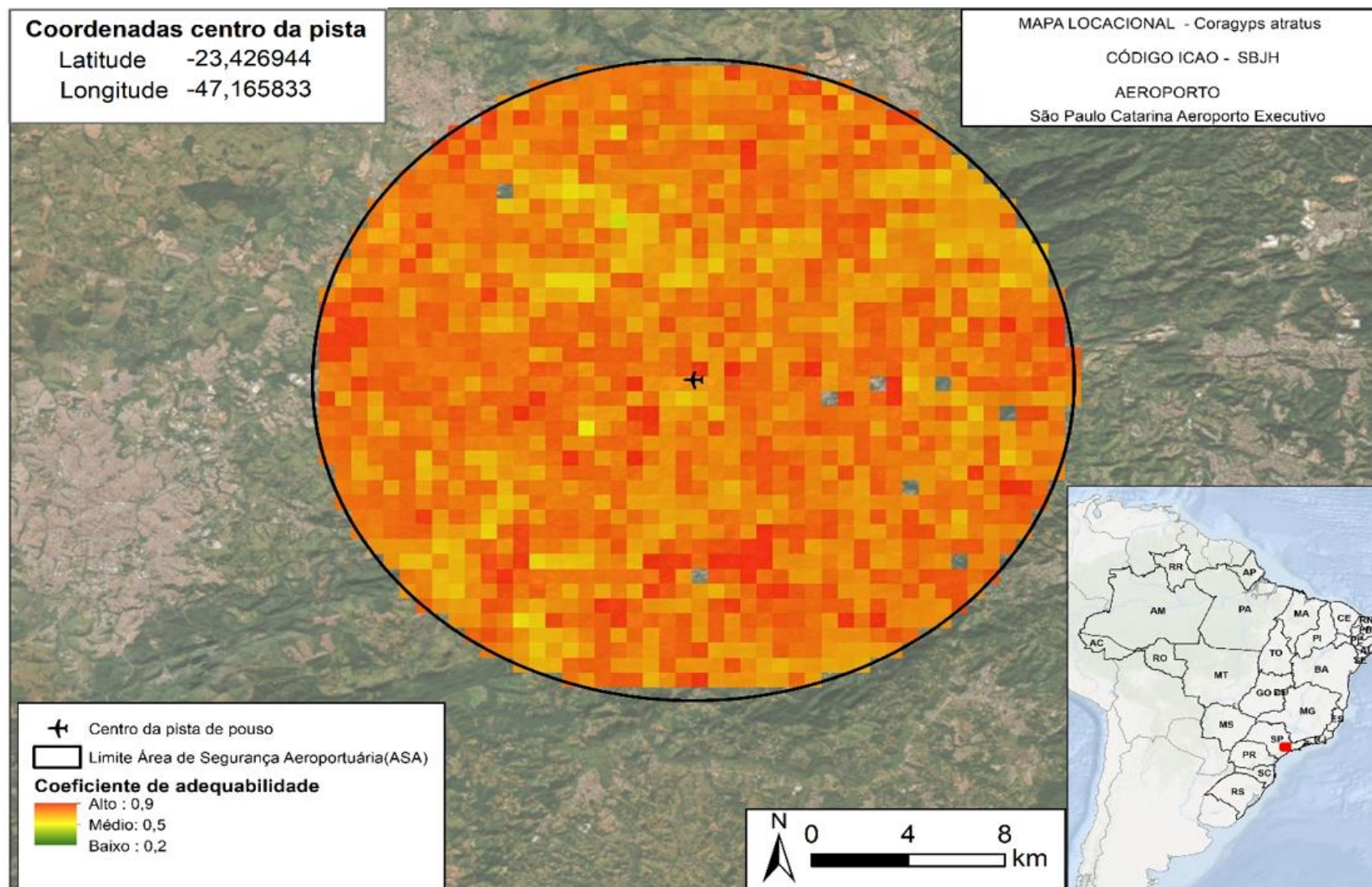


Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

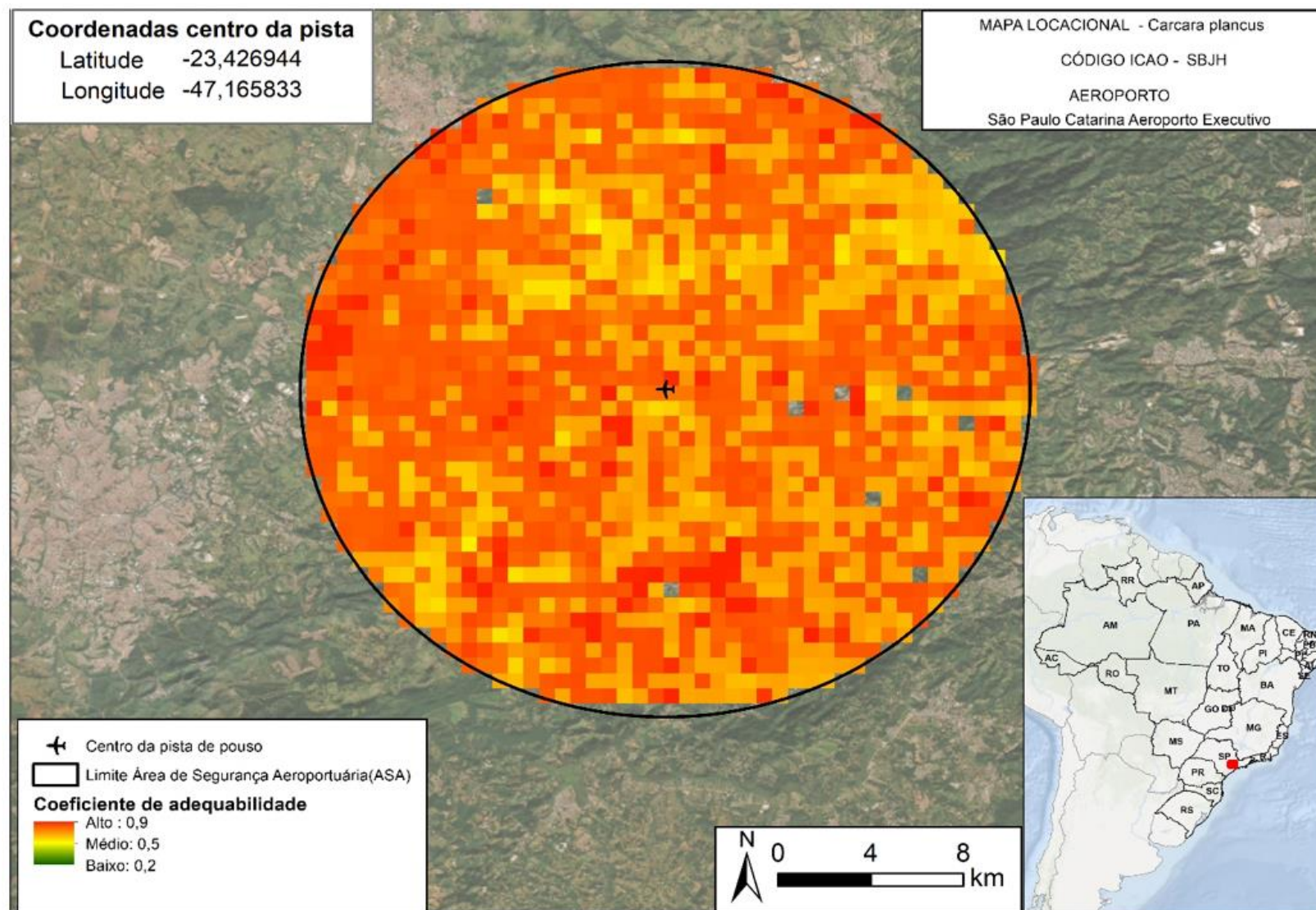
Desta forma, pode-se visualizar como tais variáveis possibilitam a alimentação e reprodução de espécimes da avifauna ao longo da escala amostrada, algo que pode contribuir para um aumento nas colisões amostradas (COCCON *et al*, 2015). Nesse âmbito destacam-se espécies com alta probabilidade (>0.8) de ocorrência como Carcará (*Carcara plancus*) (Figura 33) e Urubu-da-cabeça-preta (*Coragyps atratus*) (Figura 32) que como analisadas previamente, são espécies que em caso de colisão podem acarretar em maiores impactos ao funcionamento normal das operações aeroviárias.

Neste recorte é possível observar que grandes faixas contínuas de floresta perene preenchem a ASA em porções homogêneas, com alto NDVI, ou seja, são vegetações saudáveis e com grande volume, fornecendo locais de abrigo e alimentação aos espécimes. Neste caso, a interpretação visual confirma a importância de análises tanto do *output* da modelagem, quanto do *input* fornecido, de maneira a complementar a elaboração de planos de mitigação de fauna nestes espaços.

O reflexo da abundância de recursos é notado na Figura 32 e Figura 33 onde para estas espécies há alta probabilidade de ocorrência ao longo de toda a ASA, sendo possível notar a importância de modelos alimentados com dados locais, que possam refinar os resultados obtidos, trazendo maior riqueza de detalhes e consequentemente, maior assertividade ao processo de mitigação das espécies de risco as operações aeroportuárias. Neste caso, a resolução final pode ofuscar efeitos locais importantes ao entendimento do fenômeno de colisão entre aeronaves e aves, mas ressalta-se que a presente modelagem preza por aplicar o Modelo MaxEnt como ferramenta na identificação de potenciais riscos de colisão em aeródromos em escala nacional.

Figura 32 - Mapa de ocorrência prevista do Urubu de cabeça preta (*Coragyps atratus*) no São Paulo Catarina Aeroporto Executivo(SP)

Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

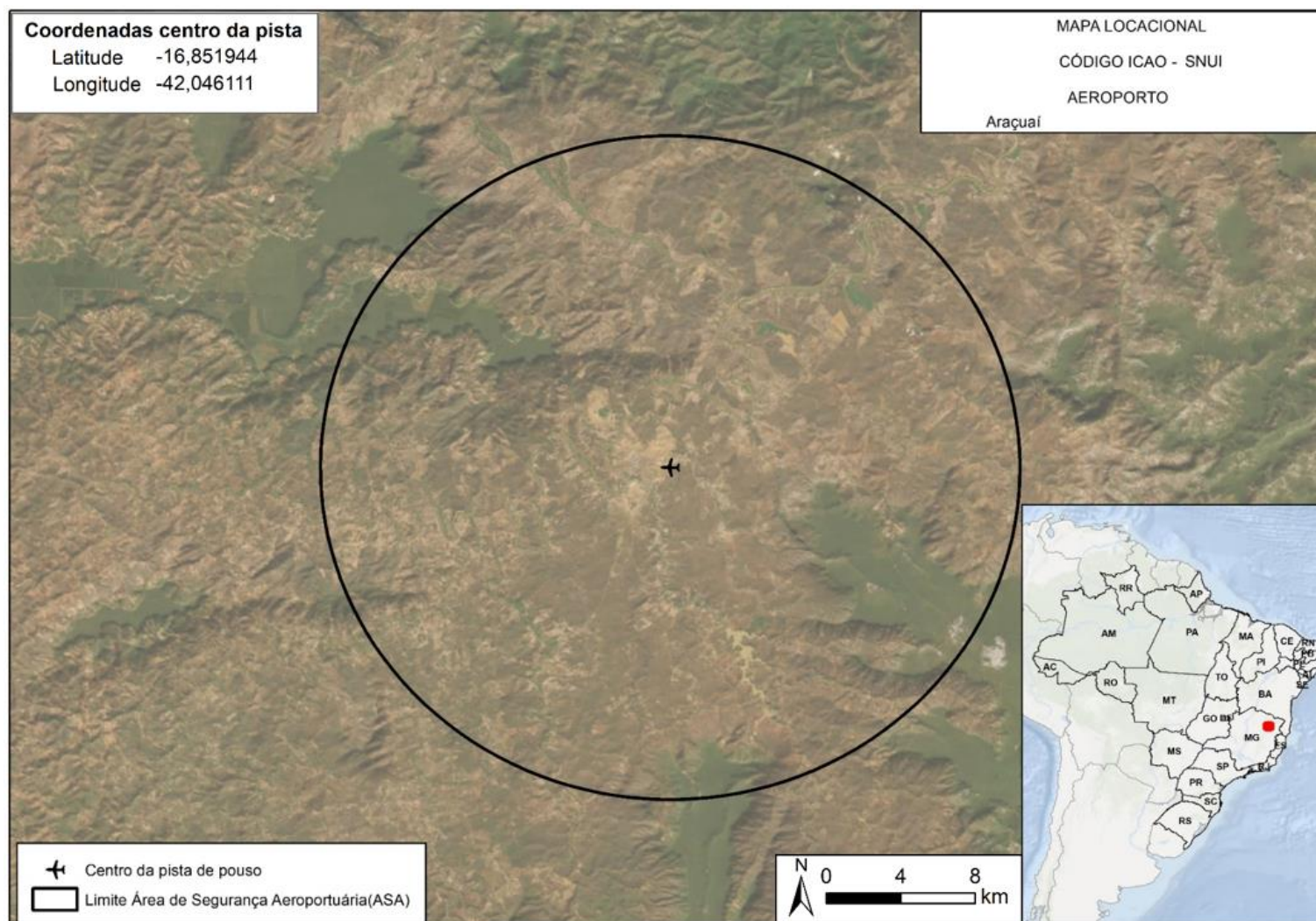
Figura 33 - Mapa de ocorrência predita do Quero-quero (*Carcara plancus*) no São Paulo Catarina Aeroporto Executivo (SP)

Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Nas análises seguintes, destacam-se a menor probabilidade média amostrada dentre as espécies analisadas no aeródromo de Araçuaí (0,13). Há neste caso, um evidente contraste em relação ao aeroporto São Paulo Catarina na composição da paisagem (Figura 34). Os tipos florestais amostrados se diferem pelo menor porte, em grande parte herbáceas e composições de florestas decíduas (Figura 36), onde possuem caráter acentuadamente xerófilo. Neste contexto, os valores de NDVI foram menores ao longo do campo de estudo (Figura 35) quando comparados ao Catarina São Paulo aeroporto executivo. Tais fatores, dentre as demais variáveis amostradas, podem explicar a atenuação da probabilidade de ocorrência das espécies da avifauna, dentre as quais destaca-se o Urubu-de-cabeça-preta (*Coragyps atratus*) (Figura 38) pelo baixo coeficiente de adequabilidade amostrado, diferentemente do amostrado no aeroporto São Paulo Catarina. Destaca-se neste contexto, a espécie Papagaio-verdadeiro (*Amazona aestiva*) com a maior probabilidade de ocorrência dentre as espécies amostradas para a extrapolação (0,5). Neste caso, valor superior ao de outras espécies generalistas como o Urubu-de-cabeça-preta.

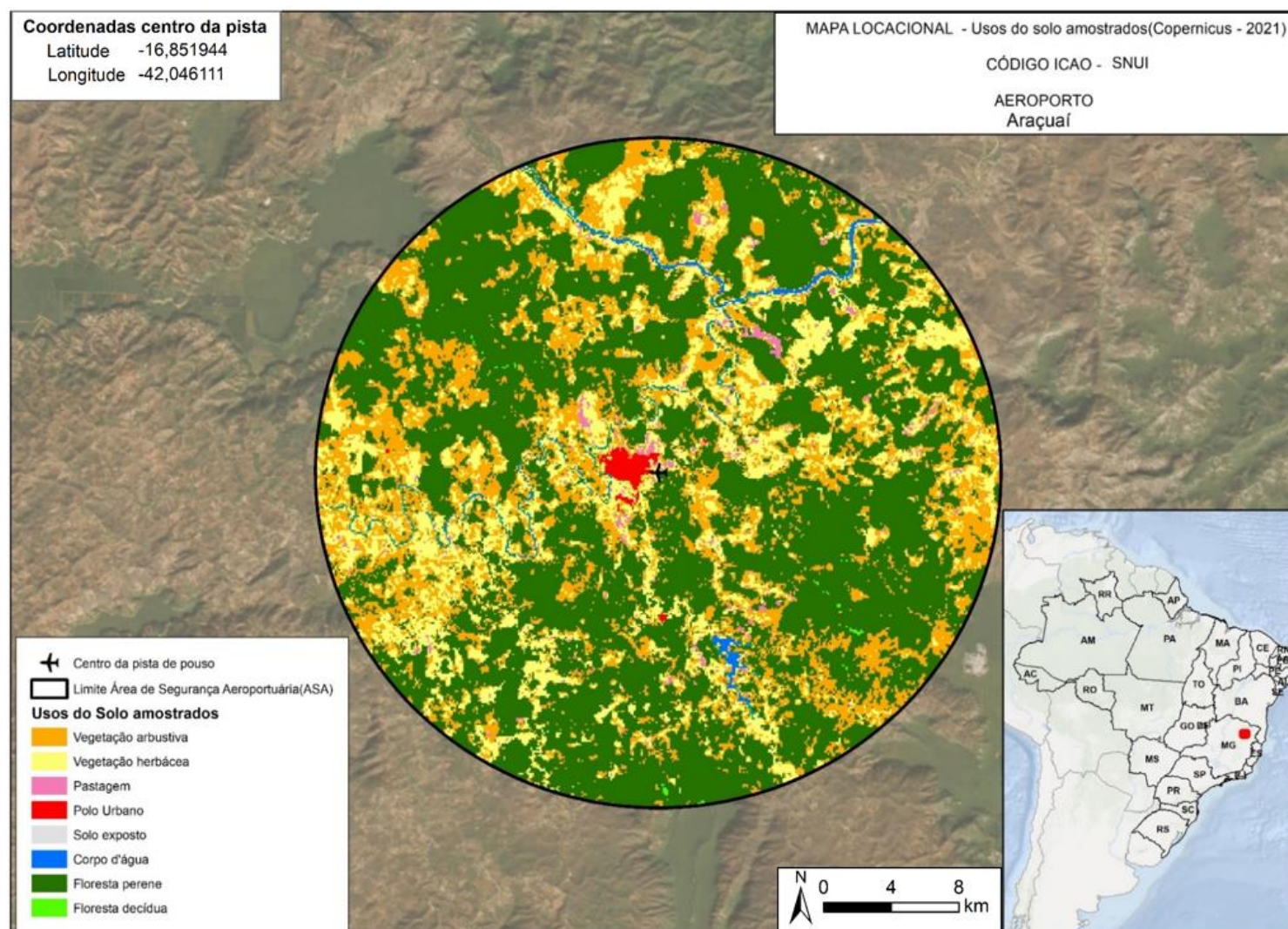
Neste contexto nota-se a importância do estudo dos ecossistemas, de como neste caso, os tipos vegetacionais podem influir na probabilidade de ocorrência de espécies. Neste caso, tais informações podem acarretar na diminuição dos custos de aplicação de planos de mitigação, dado que tais modelos podem indicar *a priori* quais regiões podem apresentar maior ou menor grau de risco para ocorrência da avifauna, e, portanto, maior risco as operações aeroviárias.

Figura 34 - Composição natural a partir de Imagens Sentinel-2 do Aeroporto Araçuaí (MG). Neste caso podemos notar a mudança nos tipos vegetacionais amostrados, agora muito mais arbustivos, preenchidos também contínuos florestais que preenchem uma proporção menor da paisagem



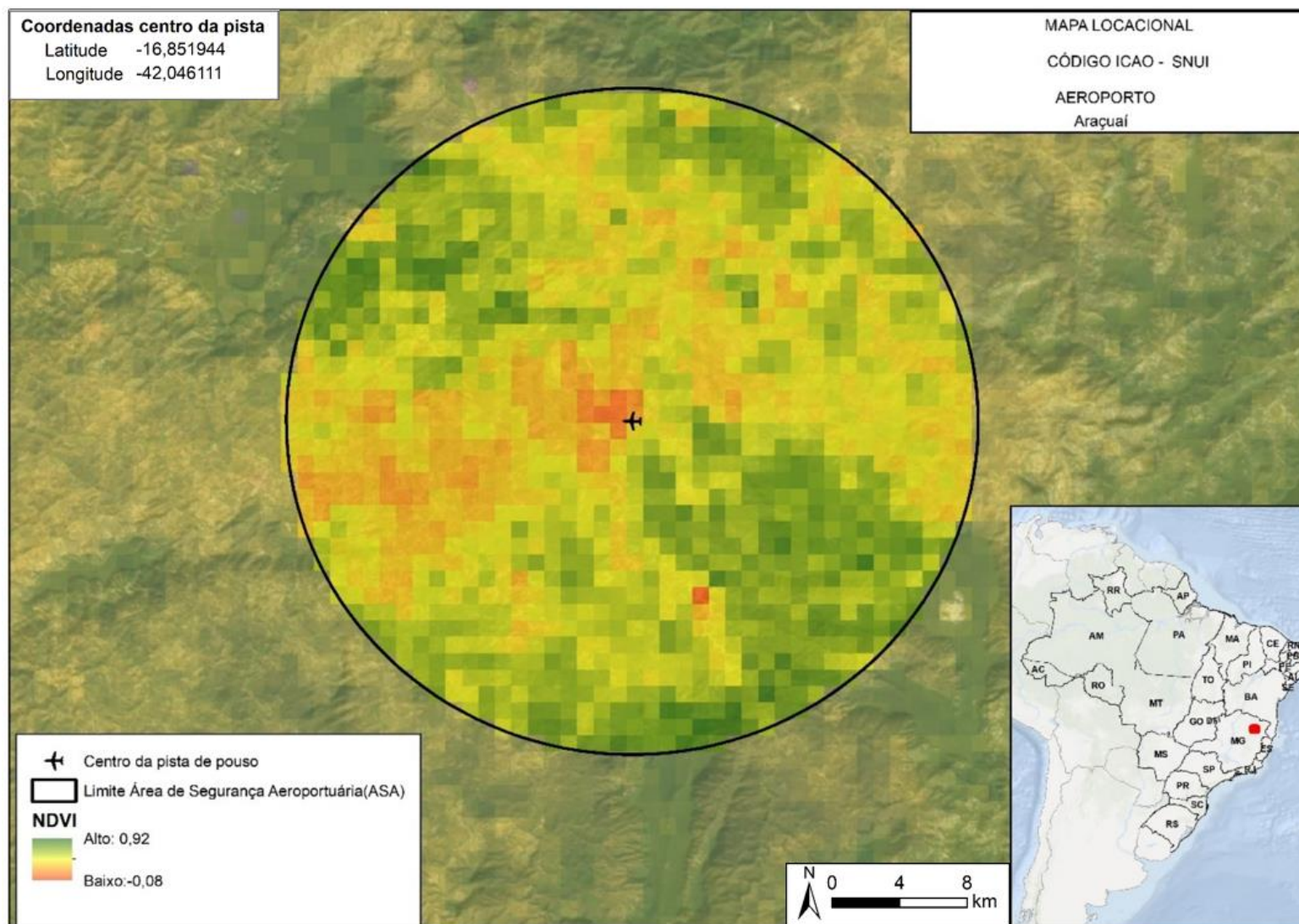
Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 35 - Recorte do uso e cobertura do solo (Copernicus, 2021) para a ASA no Aeroporto Araçuaí (MG). Neste caso, podemos observar uma paisagem heterogênea com maior variedade de tipos de uso do solo ao longo da Área de Estudo



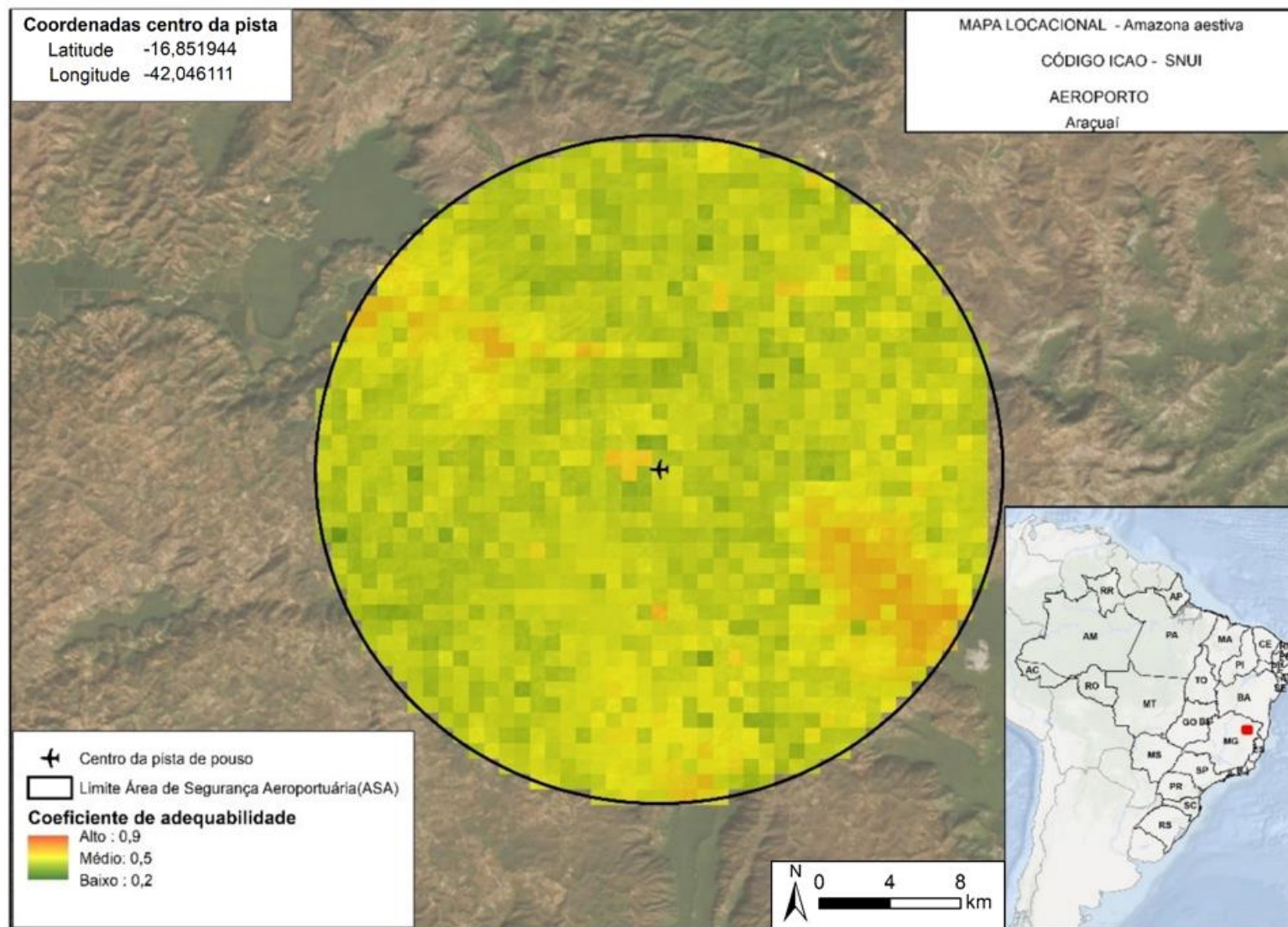
Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 36 - Imagem NDVI do Aeroporto Araçuaí (MG)



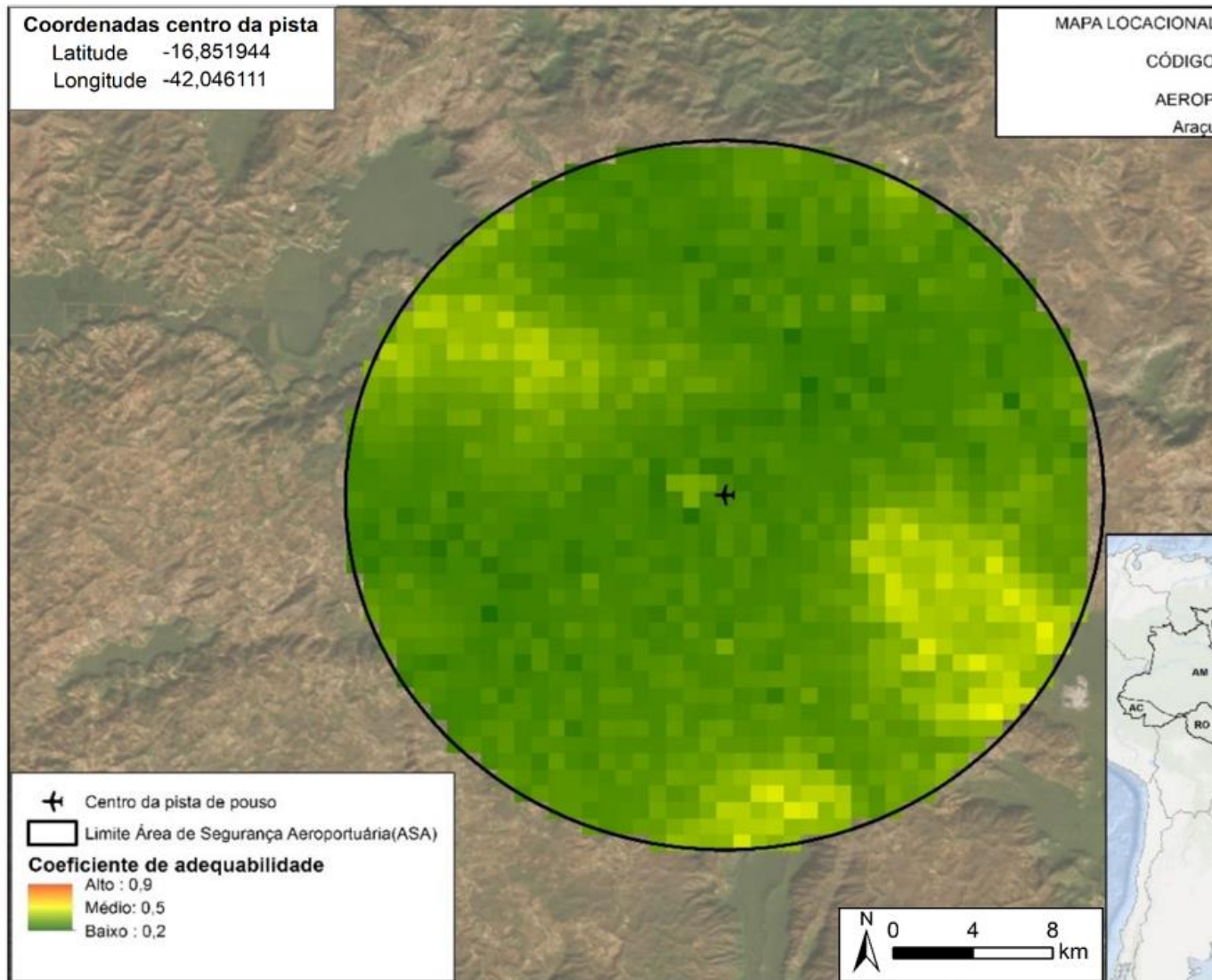
Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 38 - Mapa de ocorrência predita do Papagaio-verdadeiro (*Amazona aestiva*) no Aeroporto Araçuaí (MG)



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Figura 39 - Mapa de ocorrência predita do Urubu de cabeça preta (*Coragyps atratus*) no Aeroporto Araçuaí (MG)



Fonte: Elaborado por Luis Felipe dos Santos Melo, 2023.

Ressalta-se a importância de modelagens como MOPEIA no planejamento de aeródromos, que estimou um risco de ocorrência significativo no aeródromo São Paulo Catarina aeroporto executivo (SBJH). Tal fato reforça o fato de análise de riscos de ocorrência de espécies *a priori* ser campo de estudos incipiente e segue o histórico da construção dos aeródromos de modo geral (ROBINSON *et al*, 2021; JEFFREY & BUSCHKE, 2018), tendo por característica a escolha baseada em fatores sociais, econômicos etc. em detrimento da ecologia local e de sua interação com meio em que se insere sendo importante o uso de ferramentas da modelagem para que possamos diminuir a ocorrência de colisões nos próximos anos.

Por outro lado, salienta-se a adaptabilidade do modelo a diferentes contextos geoecológicos, como demonstrado no aeroporto Araçuaí (SNUI), em que foram estimados menores probabilidades de avifauna, fruto de meio ao qual está inserido. Contudo, outras variáveis podem atuar nesta região aumentando o número de colisões em períodos específicos do ano, sendo necessário o estudo de como o comportamento das espécies durante em período migratório, por exemplo, pode influenciar o risco das espécies.

Por fim, evidencia-se a necessidade do aprofundamento dos reportes para que possam ser utilizados os dados de colisões e das espécies envolvidas na criação de modelos mais precisos em prever a probabilidade de ocorrência de espécies, e, portanto, o risco que posam à aviação brasileira.

CONCLUSÕES

Os resultados do estudo destacam a capacidade de modelos como MaxEnt em identificar as variações ambientais que podem acarretar mais riscos a operações nos aeródromos brasileiros. A importância da modelagem para a previsão de riscos de ocorrência de espécies da avifauna em ambientes aeroportuários, neste caso parte da:

[...] dificuldade para implantar o gerenciamento de risco de fauna de modo perene, integrado e eficiente. Isto decorre da complexidade do assunto, que não tem uma solução mágica. As aves que representam mais risco em cada aeródromo, bem como a distribuição de seus atrativos em toda a Área de Segurança Aeroportuária (ASA), customizam este problema impedindo o uso de ação mitigadora única. Regulação aeronáutica incipiente e restrições de pessoal capacitado também dificultam a evolução do gerenciamento de risco de fauna no Brasil (CENIPA, 2017)

Em vista das dificuldades apontadas neste trabalho, foi desenvolvido modelo que permite a previsão do risco de colisão tendo como prerrogativas as seguintes questões:

- (1) Ser capaz de aumentar assertividade na implantação de ações mitigatórias e de monitoramento, indicando a probabilidade de ocorrência das espécies ao longo das áreas de segurança aeroportuária (e além delas) com baixo custo de implantação
- (2) Ser uma ferramenta flexível, com capacidade de prever a probabilidade com alto grau de significância a ocorrência das espécies de interesse em diferentes contextos ambientais, assim personalizando a ações mitigatórias de manejo da avifauna aeroportuária

Tendo estas prerrogativas consolidadas e um modelo que capaz de identificar os locais de maior risco de ocorrência de fauna, pode-se então integrar este modelo ao cotidiano de operadores de aeródromos, de maneira a auxiliar na tomada de decisões com relação ao manejo da paisagem aeroportuária e de sua fauna.

Sendo assim, o modelo proposto aponta uma correlação significativa entre a probabilidade de ocorrência das espécies predita e o número de colisões amostradas, demonstrando eficácia em prever possíveis riscos as operações aeroportuárias a escala da América do Sul. Neste sentido, a aplicabilidade deste modelo pode compor os planos de mitigação das espécies em aeródromos já operacionais, assim como pode compor o planejamento aeroportos antes mesmo de sua implementação, trazendo de maneira visual e explícita os potenciais riscos, reduzindo os custos associados à colisões entre aves e aeronaves.

Adicionalmente, o ranqueamento das espécies demonstrou-se uma ferramenta útil a essa abordagem na medida em que permite aos operadores de aeródromos identificarem e priorizarem as espécies que possuem maior potencial de causar danos ou efeitos nos voos. Neste caso, é importante observar com atenção as espécies que não possuem um grau de severidade relativa muito elevado, mas que são frequentes nos ambientes aeroportuários, uma vez que embora o dano causado em caso de impacto seja menor, a repetitividade das colisões com essas espécies aumenta a probabilidade de ocorrência de colisões que possam alterar de maneira significativa a normalidade das operações aeroportuárias.

Parte essencial deste processo modelagem se inicia na coleta dos dados, sendo crucial ressaltar a importância da coleta e disponibilização constantes de dados precisos com relação a localização e a identificação a nível de espécie da fauna presente nas Áreas de Segurança Aeroportuária. Esta nova 'cultura de dados', ou seja, o *input* constante de dados precisos é fundamental para uma modelagem que melhor se aproxime da realidade, bem como para a implementação de medidas de mitigação eficazes.

Em retrospectiva ao estudo desenvolvido é possível construirmos passos para o refinamento do modelo através da:

- 1) Utilização métodos para balancear os bancos de dados, de maneira a atenuar o efeito do viés de coleta de dados de fauna em centros urbanos e suas proximidades.
- 2) Testes envolvendo variáveis ambientais que possam melhorar a performance do modelo para espécies mais generalistas como Urubu-de-cabeça-preta (*Coragyps atratus*).

- 3) Dado que o número de colisões varia de acordo com temporadas em vista da migração de diversas espécies da avifauna, sugere-se que as análises do fenômeno de colisões associados considere esta variável temporal em futuras proposições de modelos de distribuição de espécies.
- 4) Além disso, propõe-se a utilização de agrupamentos das espécies de maneira a atenuar os efeitos da variância, caso sejam realizadas análises de múltiplas espécies.

REFERÊNCIAS

- ALLAN, J & OROSZ, A. (2001). The costs of bird strikes to commercial aviation. **Proceedings of Bird Strike**. 2001.
- ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. **Lista de aeródromos públicos V2**. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/aceso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/aerodromos/lista-de-aerodromos-publicos-v2>. Acesso em: 6 de março de 2023.
- Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC) 153: **Aeródromos – Operação, Manutenção e Resposta à Emergência**. Brasília, 2021. Disponível em <<https://pergamum.anac.gov.br/arquivos/RBAC153EMD06.PDF>>. Acesso em: 1 março 2022.
- ANDREWS, R.; BEVRANI, B.; COLIN, B.; WYNN, M.T.; TER HOFSTEDE, A.H.M.; RING, J. Three Novel Bird Strike Likelihood Modelling Techniques: The Case of Brisbane Airport, Australia. **PLoS ONE** 2022, 17, e0277794, doi:10.1371/journal.pone.0277794.
- AUER, T. et al. EOD – eBird Observation Dataset Cornell **Lab of Ornithology** .2023. Accessed via GBIF.org.
- BAKKESTUEN, V.; HALVORSEN, R.; HEEGAARD, E. Disentangling complex fine-scale ecological patterns by path modelling using GLMM and GIS. **Journal of Vegetation Science**, v. 20, n. 5, p. 779–790, out. 2009.
- BARBET-MASSIN, M. et al. Selecting pseudo-absences for species distribution models: how, where and how many?: *How to use pseudo-absences in niche modelling?* **Methods in Ecology and Evolution**, v. 3, n. 2, p. 327–338, abr. 2012.
- BARBET-MASSIN, M.; THUILLER, W.; JIGUET, F. The fate of European breeding birds under climate, land-use and dispersal scenarios. **Global Change Biology**, v. 18, n. 3, p. 881–890, mar. 2011.
- BATES, D. et al. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, 2015.
- BLACKWELL, B F.; DEVAULT, T. L.; FERNÁNDEZ-JURICIC, E; et al. Wildlife collisions with aircraft: A missing component of land-use planning for airports. **Landscape and Urban Planning**, v. 93, n. 1, p. 1–9, 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016920460900142X>>. Acesso em: 3 maio 2022.
- BOLKER, B. M. et al. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 24, n. 3, p. 127–135, mar. 2009.
- BROWN, J. L. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 5, n. 7, p. 694–700, jul. 2014.
- CARVALHO, C. E. A., FIGUEIREDO, L., FERNANDES, G. F., GRECCO, R. V., SOUZA, A. H. N. (2016). A comunidade de aves do aeroporto Carlos Drummond Andrade/MG e suas Implicações para a Segurança Aeroportuária. **Conexão Sipaer**, v.12, n.1, p.95-112, 2022. Disponível em: < <http://conexaosipaer.cenipa.gov.br/index.php/sipaer/article/view/387/330>>. Acesso em: 2 maio 2022.

CENIPA, **Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Anuário de Risco de Fauna 2011-2021**. Brasília, 2021. Disponível em <<https://www2.fab.mil.br/cenipa/index.php/estatisticas/risco-da-fauna>>. Acesso em 15 março 2022

COCCON, F.; ZUCCHETTA, M; BOSSI, G; et al. A Land-Use Perspective for Birdstrike Risk Assessment: The Attraction Risk Index. **PLOS ONE**, v. 10, n. 6, p. e0128363, 2015. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0128363>>. Acesso em: 3 maio 2022.

COLOMBO, M. A.; SEGURA, L. N. Southernmost record of Yellow-headed Vulture, *Cathartes burrovianus* Cassin, 1845 (Cathartiformes, Cathartidae), in Buenos Aires province, Argentina. **Check List**, v. 14, n. 4, p. 671–674, 17 ago. 2018

Document 1301 – Bird Strike Association of Canada – **Comité canadien sur le péril aviaire**. Disponível em: <<https://canadianbirdstrike.ca/fr/document-1301-2/>>. Acesso em: 5 maio 2022.

DEVAULT, T., BELANT, J., BLACKWELL, B., SEAMANS, T., 2011. Interspecific variation in wildlife hazards to aircraft: Implications for airport wildlife management. 2011 Bird Strike North America Conference, Niagara Falls.

DOLBEER, R. Trends in reporting of wildlife strikes with civil aircraft and in identification of species struck under a primarily voluntary reporting system, 1990-2013. 2015.

DOLBEER, R., A.; ESCHENFELDER, P. Amplified birdstrike risks related to population increases of large birds in North America. **Proceeding of the International Bird Strike Committee**. 26. 2003

DOLBEER, R., A.; ESCHENFELDER, P. Have population increases of large birds outpaced airworthiness standards for civil aircraft? **Proceedings of the Vertebrate Pest Conference**, v. 20, 2002.

DOLBEER, R.; S. E. WRIGHT; J. R. WELLER; et al. Wildlife strikes to civil aircraft in the United States, 1990-2014. 2015. Disponível em: <<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.2370.6649>>. Acesso em: 3 maio 2022.

DOLBEER, R.A. Height Distribution of Birds Recorded by Collisions with Civil Aircraft. **Journal of Wildlife Management**, v. 70, n. 5, p. 1345–1350, 2006. Disponível em: <<http://www.bioone.org/doi/abs/10.2193/0022-541X%282006%2970%5B1345%3AHDOBRB%5D2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 3 maio 2022.

DOVE, C. J.; HEACKER, M.; ROTZEL, N. The birdstrike identification program at the smithsonian institution and new recommendations for DNA sampling. 2017.

ELITH, J. et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists: Statistical explanation of MaxEnt. **Diversity and Distributions**, v. 17, n. 1, p. 43–57, jan. 2011.

ELITH, J.; KEARNEY, M.; PHILLIPS, S. The art of modelling range-shifting species: *The art of modelling range-shifting species*. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 1, n. 4, p. 330–342, dez. 2010.

FERGUSON-LEES, J.; CHRISTIE, D. A. **Raptors of the world**. Boston: Houghton Mifflin, 2001.p.75-79.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, out. 2017.

FINK, D.; AUER, T.; JOHNSTON, A.; RUIZ-GUTIERREZ, V.; Hochachka, W.M.; Kelling, S. Modeling Avian Full Annual Cycle Distribution and Population Trends with Citizen Science Data. **Ecological Applications** 2020, 30, doi:10.1002/eap.2056.

GAIKWAD, S.S.; MUNOT, H.; SHOUCHE, Y.S. Utility of DNA Barcoding for Identification of Bird-Strike Samples from India. **Current Science**. 2016, 110, 25–28.

HAIGH, M. J. Geography and general system theory, philosophical homologies and current practice. **Geoforum**, v. 16, n. 2, p. 191–203, jan. 1985.

HIJMANS, R. J. Cross-validation of species distribution models: removing spatial sorting bias and calibration with a null model. **Ecology**, v. 93, n. 3, p. 679–688, 2012. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1890/11-0826.1>>. Acesso em: 3 maio 2022.

HIJMANS, R. J. et al. **raster: Geographic Data Analysis and Modeling**. 6 mar. 2023. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/raster/index.html>>

HIJMANS, R.J.; CAMERON, S. E.; PARRA, Juan L.; et al. Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 15, p. 1965–1978, 2005. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1276>>. Acesso em: 3 maio 2022.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). (2013a). Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation, Aerodromes (6th ed.). Montreal, Canada: Author.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). (2013b). Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation, Aerodromes (5th ed.). Montreal, Canada: Author.

JEFFERY, R. F.; BUSCHKE, F.T. Urbanization Around an Airfield Alters Bird Community Composition, but not the Hazard of Bird–Aircraft Collision. **Environmental Conservation**, v. 46, n. 2, p. 124–131, 2019. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0376892918000231/type/journal_article>. Acesso em: 4 maio 2022.

JIMÉNEZ-VALVERDE, A.; LOBO, J. M.; HORTAL, J. Not as good as they seem: the importance of concepts in species distribution modelling. **Diversity and Distributions**, v. 14, n. 6, p. 885–890, nov. 2008.

KOH, Chao-Nien; LEE, Pei-Fen; LIN, Ruey-Shing. Bird species richness patterns of northern Taiwan: primary productivity, human population density, and habitat heterogeneity. **Diversity Distributions**, v. 12, n. 5, p. 546–554, 2006.

KONOWALIK, K.; NOSOL, A. Evaluation metrics and validation of presence-only species distribution models based on distributional maps with varying coverage. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1482, 15 jan. 2021.

MCKEE, Jeffrey; SHAW, Phillip; DEKKER, Arie; et al. Approaches to Wildlife Management in Aviation. In: ANGELICI, Francesco M. (Org.). Problematic Wildlife: A Cross-Disciplinary Approach. **Cham: Springer International Publishing**, 2016, p. 465–488.

MCKEE, Jeffrey; SHAW, Phillip; DEKKER, Arie; et al. Approaches to Wildlife Management in Aviation. In: ANGELICI, Francesco M. (Org.). Problematic Wildlife. **Cham: Springer International Publishing**, 2016, p. 465–488.

- MENDONÇA, Flavio; HUANG, Chenyu; CARNEY, Thomas; et al. Assessing the risks: An analysis of wildlife-strike data at the three busiest Brazilian airports (2011-2016). *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, v. 5, n. 5, 2018.
- MEROW, C. et al. What do we gain from simplicity versus complexity in species distribution models? *Ecography*, v. 37, n. 12, p. 1267–1281, dez. 2014.
- METZ, I. C.; ELLERBROEK, Joost; MÜHLHAUSEN, Thorsten; et al. The Bird Strike Challenge. *Aerospace*, v. 7, n. 3, p. 26, 2020.
- MOHER, D., LIBERATI, A., TETZLAFF, J., ALTMAN, D.G., The PRISMA Group, 2009. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med* 6, e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- NASCIMENTO. J.L.X. ET AL.,.Monitoramento da marreca parda, *Anas geórgica*(Gmelin, 1781) (Anseriformes, Anatidae) no Rio Grande do Sul. *Ornithologia* 1(2):115-120.2006
- NILSSON, C. et al. Bird strikes at commercial airports explained by citizen science and weather radar data. *Journal of Applied Ecology*, v. 58, n. 10, p. 2029–2039, out. 2021.
- NOVAES, W. G. Uso do habitat por urubus (Família Cathartidae Lafresnaye, 1839) em áreas urbanas e naturais em Manaus, Amazonas. 18 set. 2013.
- NOVAES, Weber G.; CINTRA, Renato. Anthropogenic features influencing occurrence of Black Vultures (*Coragyps atratus*) and Turkey Vultures (*Cathartes aura*) in an urban area in central Amazonian Brazil. *The Condor*, v. 117, n. 4, p. 650–659, 2015.
- Odum, E.P., 1969. The Strategy of Ecosystem Development. *Science* 164, 262–270.
- OWENS, Hannah L.; CAMPBELL, Lindsay P.; DORNAK, L. Lynnette; et al. Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, v. 263, p. 10–18, 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304380013002159>>. Acesso em: 1 maio 2022.
- PFEIFFER, M. B.; KOUGH, J. D.; DEVAULT, T. L. Civil airports from a landscape perspective: A multi-scale approach with implications for reducing bird strikes. *Landscape and Urban Planning*, v. 179, p. 38–45, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204618305917>>. Acesso em: 1 maio 2022.
- PHILLIPS, S. J.; ANDERSON, R. P.; SCHAPIRE, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, v. 190, n. 3–4, p. 231–259, jan. 2006.
- PHILLIPS, S. J.; ANDERSON, Robert P.; SCHAPIRE, Robert E., Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, v. 190, n. 3–4, p. 231–259, 2006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030438000500267X>>. Acesso em: 1 maio 2022.
- PHILLIPS, S. J.; DUDÍK, M.; SCHAPIRE, R. E. **A maximum entropy approach to species distribution modeling**. Twenty-first international conference on Machine learning - ICML '04. *Anais...*Banff, Alberta, Canada: ACM Press, 2004. Disponível em:
- PHILLIPS, S.J.; DUDÍK, M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, v. 31, n. 2, p. 161–175, 2008. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>>. Acesso em: 2 maio 2022.

PINTO-LEDEZMA, J. N.; CAVENDER-BARES, J. Predicting species distributions and community composition using satellite remote sensing predictors. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 16448, 12 ago. 2021.

PRADHAN, P. Strengthening MaxEnt modelling through screening of redundant explanatory Bioclimatic Variables with Variance Inflation Factor analysis. **Researcher**, v. 8 n.5, p.29-34, 2016. Disponível em: <http://www.sciencepub.net/researcher/research080516/05_30682rsj080516_29_34.pdf> Acesso em: 1 maio 2022.

PRIETO-TORRES, David A.; LIRA-NORIEGA, Andrés; NAVARRO-SIGÜENZA, Adolfo G. Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forests. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 18, n. 1, p. 19–30, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S253006442030002X>>. Acesso em: 2 maio 2022.

ROBINSON, Lance; MEARNS, Kevin; MCKAY, Tracey. Oliver Tambo International Airport, South Africa: Land-Use Conflicts Between Airports and Wildlife Habitats. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 9, p. 715771, 2021. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2021.715771/full>>. Acesso em: 2 maio 2022.

SCHMITT, S.; POUTEAU, R.; JUSTEAU, D.; BOISSIEU, F.; BIRNBAUM, P. ssdm : An r Package to Predict Distribution of Species Richness and Composition Based on Stacked Species Distribution Models. **Methods Ecol Evol**. 2017, 8, 1795–1803, doi:10.1111/2041-210X.12841.

SHANNON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. **Bell System Technical Journal**, v. 27, n. 3, p. 379–423, jul. 1948.

SHAO, Quan; ZHOU, Yan; ZHU, Pei. Spatiotemporal Analysis of Environmental Factors on the Birdstrike Risk in High Plateau Airport with Multi-Scale Research. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9357, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/22/9357>>. Acesso em: 15 maio 2022.

SHAO, Quan; ZHOU, Yan; ZHU, Pei; et al. Key Factors Assessment on Bird Strike Density Distribution in Airport Habitats: Spatial Heterogeneity and Geographically Weighted Regression Model. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7235, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/18/7235>>. Acesso em: 3 maio 2022.

SOLDATINI, Cecilia; GEORGALAS, Vyron; TORRICELLI, Patrizia; et al. An ecological approach to birdstrike risk analysis. **European Journal of Wildlife Research**, v. 56, n. 4, p. 623–632, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10344-009-0359-z>>. Acesso em: 4 maio 2022.

SULLIVAN, B. L. et al. eBird: A citizen-based bird observation network in the biological sciences. **Biological Conservation**, v. 142, n. 10, p. 2282–2292, out. 2009.

THORPE J. 2005. Fatalities and destroyed aircraft due to bird strikes, 2002–2004 (with an appendix of animal strikes). International conference held in Athens, May 23–27, 2005, Athens, Greece: **International Bird Strike Committee**. 27:17–25. 346 A. T. Baxter & A. P. Robinson

VARGAS, R. J.; BÓ, M. S.; FAVERO, M. DIET OF THE SOUTHERN CARACARA (CARACARA PLANCUS) IN MAR CHIQUITA RESERVE, SOUTHERN ARGENTINA. **Journal of Raptor Research**, v. 41, n. 2, p. 113–121, jun. 2007.

VELOZ, Samuel D. Spatially autocorrelated sampling falsely inflates measures of accuracy for presence-only niche models. **Journal of Biogeography**, v. 36, n. 12, p. 2290–2299, 2009. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2699.2009.02174.x>>. Acesso em: 6 maio 2022.

WARREN, D. L.; SEIFERT, S. N. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. **Ecological Applications**, v. 21, n. 2, p. 335–342, mar. 2011.

WISZ, M. S. et al. Effects of sample size on the performance of species distribution models. **Diversity and Distributions**, v. 14, n. 5, p. 763–773, set. 2008.

ZUUR, A. F. (ED.). Mixed effects models and extensions in ecology with R. New York, NY: **Springer**, 2009.p.340-345.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Análise exploratória a partir dos dados do MOPEIA

NOME CIENTÍFICO	COUNT	MEAN	STD	MIN	25%	50%	75%	MAX	MEDIAN
<i>Alopochelidon fucata</i>	29	0,29	0,28	0,00	0,03	0,27	0,53	0,85	0,27
<i>Amazona aestiva</i>	29	0,42	0,33	0,00	0,02	0,53	0,75	0,84	0,53
<i>Amazonetta brasiliensis</i>	29	0,52	0,21	0,10	0,39	0,49	0,72	0,89	0,49
<i>Anas bahamensis</i>	29	0,24	0,18	0,03	0,09	0,19	0,33	0,74	0,19
<i>Anas georgica</i>	29	0,05	0,08	0,00	0,00	0,01	0,06	0,31	0,01
<i>Anthus lutescens</i>	29	0,62	0,20	0,20	0,49	0,63	0,81	0,92	0,63
<i>Aramus guarauna</i>	29	0,53	0,15	0,30	0,37	0,53	0,66	0,81	0,53
<i>Ardea alba</i>	29	0,60	0,14	0,36	0,49	0,59	0,70	0,90	0,59
<i>Athene cunicularia</i>	29	0,55	0,20	0,18	0,42	0,54	0,71	0,91	0,54
<i>Bartramia longicauda</i>	29	0,31	0,19	0,09	0,16	0,24	0,44	0,83	0,24
<i>Brotogeris chiriri</i>	29	0,50	0,28	0,01	0,31	0,64	0,72	0,91	0,64
<i>Bubulcus ibis</i>	29	0,57	0,14	0,32	0,45	0,58	0,66	0,86	0,58
<i>Burhinus bistriatus</i>	29	0,06	0,10	0,00	0,00	0,00	0,11	0,39	0,00

<i>Buteo albonotatus</i>	29	0,51	0,22	0,05	0,36	0,52	0,67	0,90	0,52
<i>Butorides striata</i>	29	0,63	0,14	0,38	0,51	0,65	0,73	0,88	0,65
<i>Cairina moschata</i>	29	0,64	0,15	0,33	0,57	0,63	0,73	0,91	0,63
<i>Caracara plancus</i>	29	0,58	0,15	0,36	0,46	0,56	0,70	0,87	0,56
<i>Cariama cristata</i>	29	0,43	0,28	0,00	0,14	0,47	0,68	0,81	0,47
<i>Cathartes aura</i>	29	0,59	0,13	0,39	0,49	0,56	0,69	0,88	0,56
<i>Cathartes burrovianus</i>	29	0,68	0,13	0,43	0,63	0,71	0,78	0,85	0,71
<i>Cathartes melambrotus</i>	29	0,25	0,24	0,00	0,04	0,17	0,44	0,79	0,17
<i>Chaetura meridionalis</i>	29	0,45	0,27	0,01	0,25	0,43	0,69	0,85	0,43
<i>Charadrius collaris</i>	29	0,46	0,15	0,18	0,37	0,46	0,54	0,79	0,46
<i>Charadrius semipalmatus</i>	29	0,35	0,26	0,01	0,06	0,40	0,51	0,88	0,40
<i>Chauna torquata</i>	29	0,13	0,18	0,00	0,02	0,04	0,18	0,70	0,04
<i>Chordeiles acutipennis</i>	29	0,34	0,21	0,01	0,20	0,36	0,47	0,73	0,36
<i>Chordeiles nacunda</i>	29	0,51	0,17	0,22	0,37	0,50	0,66	0,83	0,50
Nome científico	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max	median

<i>Chordeiles pusillus</i>	29	0,43	0,24	0,01	0,33	0,43	0,59	0,89	0,43
<i>Ciconia maguari</i>	29	0,24	0,15	0,05	0,12	0,20	0,32	0,70	0,20
<i>Columba livia</i>	29	0,42	0,17	0,15	0,29	0,38	0,56	0,83	0,38
<i>Columbina passerina</i>	29	0,24	0,28	0,00	0,02	0,05	0,52	0,79	0,05
<i>Columbina picui</i>	29	0,34	0,17	0,01	0,25	0,34	0,47	0,72	0,34
<i>Columbina squammata</i>	29	0,61	0,16	0,23	0,52	0,64	0,71	0,88	0,64
<i>Columbina talpacoti</i>	29	0,62	0,13	0,42	0,51	0,60	0,70	0,87	0,60
<i>Coragyps atratus</i>	29	0,60	0,14	0,38	0,50	0,57	0,70	0,88	0,57
<i>Crotophaga ani</i>	29	0,64	0,12	0,41	0,53	0,65	0,75	0,87	0,65
<i>Dendrocygna autumnalis</i>	29	0,52	0,14	0,22	0,40	0,54	0,63	0,76	0,54
<i>Dendrocygna viduata</i>	29	0,53	0,15	0,25	0,44	0,54	0,61	0,87	0,54
<i>Egretta thula</i>	29	0,58	0,15	0,33	0,47	0,56	0,69	0,89	0,56
<i>Elanoides forficatus</i>	29	0,50	0,18	0,21	0,35	0,47	0,62	0,83	0,47
<i>Elanus leucurus</i>	29	0,47	0,17	0,22	0,38	0,42	0,51	0,88	0,42
<i>Falco femoralis</i>	29	0,52	0,17	0,25	0,40	0,53	0,62	0,88	0,53

<i>Falco peregrinus</i>	29	0,38	0,16	0,11	0,26	0,36	0,50	0,74	0,36
<i>Falco sparverius</i>	29	0,42	0,16	0,23	0,28	0,38	0,52	0,75	0,38
<i>Fregata magnificens</i>	29	0,25	0,22	0,00	0,04	0,24	0,40	0,67	0,24
<i>Gallinago paraguaiiae</i>	29	0,38	0,23	0,11	0,19	0,26	0,59	0,84	0,26
<i>Gnorimopsar chopi</i>	29	0,53	0,30	0,00	0,27	0,64	0,78	0,88	0,64
<i>Guira guira</i>	29	0,53	0,21	0,09	0,43	0,52	0,73	0,84	0,52
<i>Hirundo rustica</i>	29	0,49	0,15	0,20	0,43	0,53	0,60	0,73	0,53
<i>Hydropsalis torquata</i>	29	0,48	0,29	0,02	0,25	0,49	0,77	0,93	0,49
<i>Jacamerops aureus</i>	29	0,14	0,21	0,00	0,01	0,04	0,15	0,80	0,04
<i>Jacana jacana</i>	29	0,63	0,13	0,38	0,57	0,65	0,74	0,87	0,65
<i>Machetornis rixosa</i>	29	0,53	0,17	0,26	0,40	0,50	0,64	0,86	0,50
<i>Megascops choliba</i>	29	0,58	0,16	0,29	0,50	0,54	0,65	0,91	0,54
<i>Milvago chimachima</i>	29	0,56	0,16	0,31	0,45	0,54	0,61	0,88	0,54
<i>Milvago chimango</i>	29	0,08	0,13	0,00	0,00	0,01	0,06	0,43	0,01
Nome científico	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max	median

<i>Mycteria americana</i>	29	0,53	0,15	0,25	0,40	0,51	0,65	0,81	0,51
<i>Nothura maculosa</i>	29	0,30	0,22	0,01	0,12	0,26	0,51	0,73	0,26
<i>Nycticorax nycticorax</i>	29	0,52	0,18	0,29	0,40	0,46	0,70	0,90	0,46
<i>Nyctidromus albicollis</i>	29	0,66	0,14	0,35	0,59	0,67	0,77	0,91	0,67
<i>Pandion haliaetus</i>	29	0,49	0,16	0,12	0,40	0,53	0,59	0,72	0,53
<i>Parabuteo unicinctus</i>	29	0,19	0,13	0,04	0,09	0,15	0,28	0,51	0,15
<i>Pardirallus nigricans</i>	29	0,42	0,31	0,00	0,11	0,39	0,68	0,88	0,39
<i>Passer domesticus</i>	29	0,47	0,20	0,16	0,32	0,44	0,65	0,87	0,44
<i>Patagioenas cayennensis</i>	29	0,63	0,16	0,25	0,54	0,67	0,74	0,89	0,67
<i>Patagioenas picazuro</i>	29	0,42	0,30	0,01	0,14	0,44	0,73	0,84	0,44
<i>Petrochelidon pyrrhonota</i>	29	0,43	0,21	0,07	0,29	0,40	0,56	0,93	0,40
<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	29	0,56	0,16	0,36	0,43	0,49	0,73	0,90	0,49
<i>Phimosus infuscatus</i>	29	0,42	0,19	0,17	0,29	0,40	0,51	0,79	0,40
<i>Pitangus sulphuratus</i>	29	0,60	0,14	0,36	0,52	0,58	0,66	0,88	0,58
<i>Pluvialis dominica</i>	29	0,37	0,19	0,13	0,21	0,36	0,50	0,83	0,36

<i>Progne chalybea</i>	29	0,66	0,15	0,39	0,54	0,65	0,78	0,90	0,65
<i>Progne tapera</i>	29	0,59	0,16	0,21	0,50	0,59	0,74	0,90	0,59
<i>Rhynchotus rufescens</i>	29	0,45	0,31	0,00	0,13	0,57	0,70	0,82	0,57
<i>Rynchops niger</i>	29	0,43	0,18	0,10	0,32	0,40	0,57	0,84	0,40
<i>Stelgidopteryx ruficollis</i>	29	0,59	0,17	0,23	0,51	0,57	0,72	0,88	0,57
<i>Streptoprocne zonaris</i>	29	0,35	0,20	0,06	0,22	0,28	0,42	0,83	0,28
<i>Sturnella militaris</i>	29	0,22	0,23	0,00	0,02	0,10	0,42	0,65	0,10
<i>Sturnella supercilialis</i>	29	0,51	0,23	0,02	0,39	0,50	0,70	0,82	0,50
<i>Syrigma sibilatrix</i>	29	0,50	0,22	0,14	0,38	0,51	0,66	0,90	0,51
<i>Tachornis squamata</i>	29	0,46	0,24	0,01	0,28	0,55	0,67	0,76	0,55
<i>Tachycineta albiventer</i>	29	0,61	0,16	0,14	0,52	0,65	0,72	0,85	0,65
<i>Tachycineta leucorrhoa</i>	29	0,32	0,30	0,00	0,05	0,25	0,61	0,85	0,25
<i>Theristicus caudatus</i>	29	0,50	0,21	0,14	0,35	0,48	0,66	0,88	0,48
<i>Tyrannus melancholicus</i>	29	0,59	0,14	0,33	0,50	0,58	0,67	0,88	0,58
<i>Tyrannus savana</i>	29	0,56	0,15	0,33	0,47	0,54	0,60	0,89	0,54

<i>Vanellus chilensis</i>	29	0,56	0,16	0,31	0,41	0,54	0,64	0,88	0,54
<i>Xolmis cinereus</i>	29	0,39	0,30	0,00	0,05	0,52	0,64	0,84	0,52
<i>Zenaida auriculata</i>	29	0,39	0,19	0,13	0,25	0,34	0,43	0,79	0,34

APÊNDICE B - Análise exploratória a partir dos dados do MRGEIA

NOME CIENTÍFICO	COUNT	MEAN	STD	MIN	25%	50%	75%	MAX	MEDIAN
<i>Alopochelidon fucata</i>	29	4,86	0,92	4	4	5	6	7	5
<i>Amazona aestiva</i>	29	5,38	1,24	4	4	6	6	7	6
<i>Amazonetta brasiliensis</i>	29	9,66	0,77	9	9	9	10	11	9
<i>Anas bahamensis</i>	29	5,79	0,62	5	5	6	6	7	6
<i>Anas georgica</i>	29	5,17	0,38	5	5	5	5	6	5
<i>Anthus lutescens</i>	29	5,07	0,92	4	4	5	6	7	5
<i>Aramus guarauna</i>	29	7,66	0,67	7	7	8	8	9	8
<i>Ardea alba</i>	29	12,86	0,69	12	12	13	13	14	13
<i>Athene cunicularia</i>	29	9,83	0,80	9	9	10	10	12	10
<i>Bartramia longicauda</i>	29	5,17	0,54	4	5	5	5	7	5
<i>Brotogeris chiriri</i>	29	6,62	1,08	5	6	7	7	9	7
<i>Bubulcus ibis</i>	29	9,83	0,71	9	9	10	10	11	10
<i>Burhinus bistriatus</i>	29	4,28	0,45	4	4	4	5	5	4
<i>Buteo albonotatus</i>	29	6,62	0,82	5	6	7	7	8	7
<i>Butorides striata</i>	29	5,97	0,63	5	6	6	6	7	6
<i>Cairina moschata</i>	29	13,07	0,70	12	13	13	13	15	13
<i>Caracara plancus</i>	29	14,86	0,69	14	14	15	15	16	15

<i>Cariama cristata</i>	29	13,48	0,91	12	13	13	14	15	13
<i>Cathartes aura</i>	29	10,90	0,67	10	10	11	11	12	11
<i>Cathartes burrovianus</i>	29	10,24	0,69	9	10	10	11	11	10
<i>Cathartes melambrotus</i>	29	14,86	0,83	14	14	15	15	17	15
<i>Chaetura meridionalis</i>	29	6,52	0,95	5	6	6	7	8	6
<i>Charadrius collaris</i>	29	4,45	0,57	4	4	4	5	6	4
<i>Charadrius semipalmatus</i>	29	5,03	0,91	4	4	5	6	7	5
<i>Chauna torquata</i>	29	12,41	0,57	12	12	12	13	14	12
<i>Chordeiles acutipennis</i>	29	4,07	0,65	3	4	4	4	5	4
<i>Chordeiles nacunda</i>	29	8,55	0,69	8	8	8	9	10	8
Nome científico	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max	median
<i>Chordeiles pusillus</i>	29	3,34	0,81	2	3	3	4	5	3
<i>Ciconia maguari</i>	29	12,90	0,49	12	13	13	13	14	13
<i>Columba livia</i>	29	10,34	0,55	10	10	10	11	12	10
<i>Columbina passerina</i>	29	4,76	0,95	4	4	4	6	7	4
<i>Columbina picui</i>	29	8,10	0,56	7	8	8	8	9	8
<i>Columbina squammata</i>	29	6,97	0,63	6	7	7	7	8	7
<i>Columbina talpacoti</i>	29	7,00	0,65	6	7	7	7	8	7
<i>Coragyps atratus</i>	29	18,97	0,68	18	19	19	19	20	19

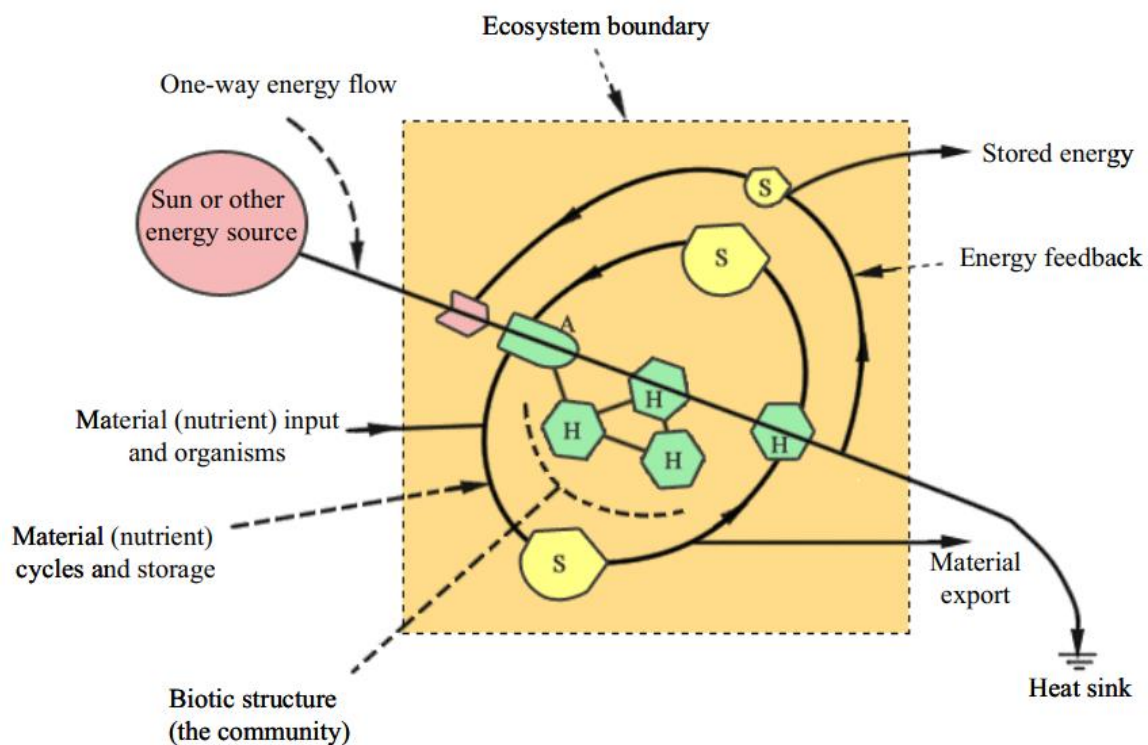
<i>Crotophaga ani</i>	29	11,17	0,60	10	11	11	12	12	11
<i>Dendrocygna autumnalis</i>	29	7,62	0,56	7	7	8	8	9	8
<i>Dendrocygna viduata</i>	29	9,72	0,65	9	9	10	10	11	10
<i>Egretta thula</i>	29	10,83	0,71	10	10	11	11	12	11
<i>Elanoides forficatus</i>	29	9,59	0,73	9	9	9	10	11	9
<i>Elanus leucurus</i>	29	6,45	0,74	6	6	6	7	8	6
<i>Falco femoralis</i>	29	8,66	0,72	8	8	9	9	10	9
<i>Falco peregrinus</i>	29	8,24	0,44	8	8	8	8	9	8
<i>Falco sparverius</i>	29	8,31	0,54	8	8	8	9	10	8
<i>Fregata magnificens</i>	29	14,86	0,69	14	14	15	15	16	15
<i>Gallinago paraguaiiae</i>	29	5,41	0,68	5	5	5	6	7	5
<i>Gnorimopsar chopi</i>	29	5,86	1,09	4	5	6	7	7	6
<i>Guira guira</i>	29	8,69	0,81	7	8	9	9	10	9
<i>Hirundo rustica</i>	29	6,66	0,48	6	6	7	7	7	7
<i>Hydropsalis torquata</i>	29	5,69	1,14	4	5	5	7	8	5
<i>Jacamerops aureus</i>	29	3,52	0,78	3	3	3	4	6	3
<i>Jacana jacana</i>	29	6,97	0,57	6	7	7	7	8	7
<i>Machetornis rixosa</i>	29	10,62	0,73	10	10	10	11	12	10
<i>Megascops choliba</i>	29	7,93	0,75	7	7	8	8	10	8

<i>Milvago chimachima</i>	29	8,86	0,74	8	8	9	9	10	9
<i>Milvago chimango</i>	29	7,24	0,44	7	7	7	7	8	7
Nome científico	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max	median
<i>Mycteria americana</i>	29	8,66	0,67	8	8	9	9	10	9
<i>Nothura maculosa</i>	29	7,07	0,70	6	7	7	8	8	7
<i>Nycticorax nycticorax</i>	29	11,59	0,73	11	11	11	12	13	11
<i>Nyctidromus albicollis</i>	29	8,17	0,71	7	8	8	9	10	8
<i>Pandion haliaetus</i>	29	7,55	0,51	7	7	8	8	8	8
<i>Parabuteo unicinctus</i>	29	6,66	0,55	6	6	7	7	8	7
<i>Pardirallus nigricans</i>	29	6,38	1,05	5	6	6	7	8	6
<i>Passer domesticus</i>	29	8,38	0,56	8	8	8	9	10	8
<i>Patagioenas cayennensis</i>	29	13,03	0,57	12	13	13	13	14	13
<i>Patagioenas picazuro</i>	29	9,45	1,06	8	9	9	10	11	9
<i>Petrochelidon pyrrhonota</i>	29	3,38	0,78	2	3	3	4	6	3
<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	29	11,69	0,89	11	11	11	12	14	11
<i>Phimosus infuscatus</i>	29	11,34	0,61	11	11	11	12	13	11
<i>Pitangus sulphuratus</i>	29	8,93	0,65	8	9	9	9	10	9
<i>Pluvialis dominica</i>	29	6,34	0,55	6	6	6	7	8	6
<i>Progne chalybea</i>	29	7,21	0,68	6	7	7	8	8	7

<i>Progne tapera</i>	29	7,97	0,78	7	7	8	8	10	8
<i>Rhynchotus rufescens</i>	29	12,52	1,02	11	12	13	13	14	13
<i>Rynchops niger</i>	29	5,38	0,56	5	5	5	6	7	5
<i>Stelgidopteryx ruficollis</i>	29	4,97	0,68	4	5	5	5	6	5
<i>Streptoprocne zonaris</i>	29	5,21	0,62	4	5	5	5	7	5
<i>Sturnella militaris</i>	29	4,66	0,72	4	4	5	5	6	5
<i>Sturnella superciliaris</i>	29	7,52	0,83	6	7	8	8	9	8
<i>Syrigma sibilatrix</i>	29	8,72	0,84	8	8	9	9	11	9
<i>Tachornis squamata</i>	29	5,45	0,78	4	5	6	6	7	6
<i>Tachycineta albiventer</i>	29	6,00	0,65	5	6	6	6	7	6
<i>Tachycineta leucorrhoa</i>	29	7,03	1,02	6	6	7	8	9	7
<i>Theristicus caudatus</i>	29	11,66	0,77	11	11	11	12	13	11
<i>Tyrannus melancholicus</i>	29	5,90	0,67	5	5	6	6	7	6
Nome científico	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max	median
<i>Tyrannus savana</i>	29	7,79	0,68	7	7	8	8	9	8
<i>Vanellus chilensis</i>	29	14,79	0,73	14	14	15	15	16	15
<i>Xolmis cinereus</i>	29	8,24	1,09	7	7	9	9	10	9
<i>Zenaida auriculata</i>	29	9,28	0,53	9	9	9	9	11	9

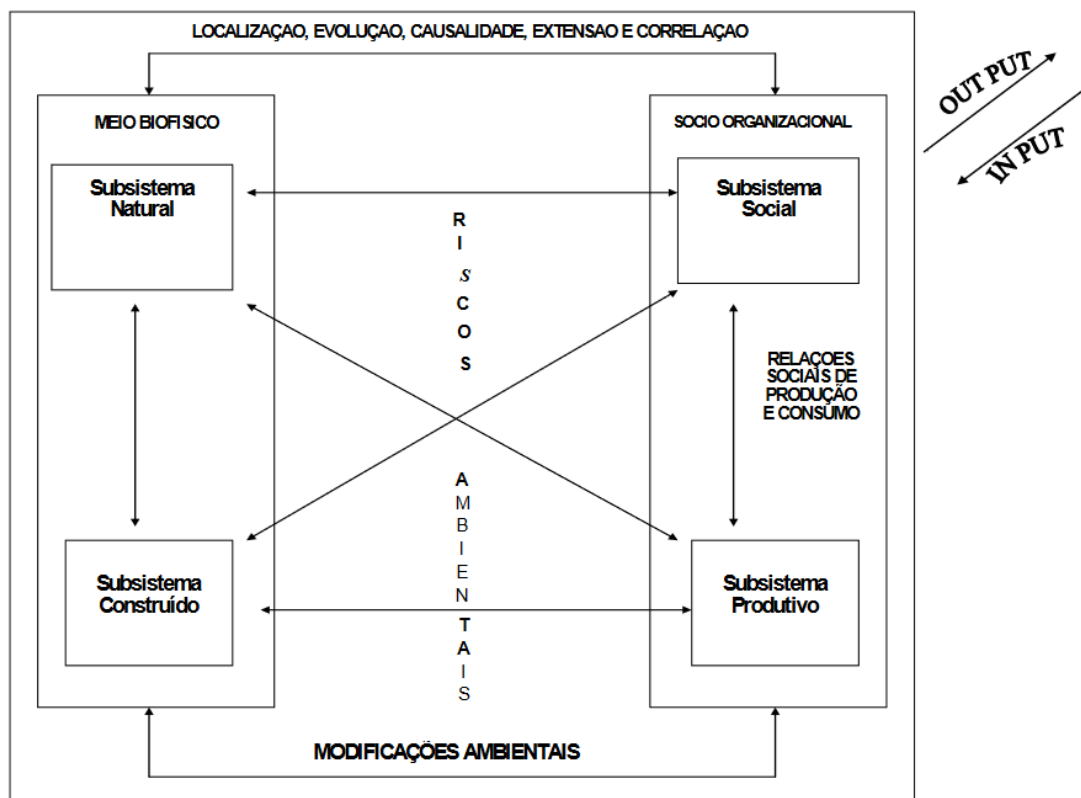
ANEXOS

ANEXO A – Exemplo de esquematização utilizada na compreensão de sistemas ecológicos, neste caso, o sistema exemplifica a interação dos meios biótico e abiótico e como a energia é transportada ao longo do sistema.



Fonte: Towards an Ecological Perspective on the Evolution of Online Communities of Practice. Sheng-cheng Lin.

ANEXO B – Modelo simplificado de Análise sistêmica, neste caso, é abordada a característica social inerente a alguns sistemas, como os que estudam também, mas não somente, efeitos como a colisão entre aeronaves e aves.



Fonte: PINTO, CARVALHO e SILVA (2005) Adaptado de KULLOCK (1994).