

Impacto do fechamento dos aeroportos por condições meteorológicas no atraso dos voos e o custo da emissão de CO₂

Reinaldo Moreira Del Fiacco¹, Marcelo de Miranda Reis¹ e José Carlos Cesar Amorim¹

¹Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*reinaldo.moreira@ime.eb.br

RESUMO: Este artigo aborda os impactos do congestionamento e atrasos em voos comerciais, tanto para as empresas aéreas quanto para os passageiros. Além disso, destaca a relação direta entre esses custos e as emissões de gases poluentes causados pelas aeronaves na área de controle terminal em que o aeroporto está localizado. Com o objetivo de identificar gargalos operacionais e calcular o tempo de permanência das aeronaves durante condições meteorológicas adversas, o artigo propõe um método que utiliza dados coletados por meio do sistema ADS-B e cartas de navegação. O estudo também inclui uma análise bibliométrica para identificar as palavras-chave mais utilizadas na revisão bibliográfica do estudo. Por fim, é feita uma análise da emissão adicional de CO₂ causada pelos atrasos operacionais. Como exemplo, o estudo analisa a área terminal do Aeroporto de Viracopos em Campinas/SP e mostra que o tempo de espera resultou em 52 minutos a mais no tempo em que as aeronaves permaneceram no espaço aéreo ou 9,27 toneladas de CO₂ a mais emitido devido ao atraso e cancelamento dos voos. O método proposto pode ser utilizado para identificar áreas que requerem atenção para garantir a segurança e a eficiência do tráfego aéreo, especialmente em condições meteorológicas adversas.

PALAVRAS-CHAVE: Controle do Espaço Aéreo. ADS-B. Eficiência Operacional. Atrasos de Voos. Emissões.

ABSTRACT: The costs of congestion or delay for airlines and passengers directly impact the means necessary for the resilience of operations and arrival at the destination. They also directly affect the emission of polluting gases caused by aircraft in the terminal control area where the airport is located. Climate predictions show a trend of worsening weather conditions favorable to air operations. This article aims to develop a method for identifying operational bottlenecks and calculating the time aircraft spend in a specific airspace control area during adverse weather conditions. For this purpose, data collected through the ADS-B system and airspace division published on navigation charts will be used. In addition, the article includes a bibliometric study to identify the most used keywords in the literature review. Finally, an analysis of additional CO₂ emissions caused by operational delays will be performed. In the case of the terminal area of Viracopos Airport in Campinas/SP, the results show that the waiting time resulted in 52 minutes more time that the aircraft remained in the airspace or 9.27 tons of additional CO₂ emitted due to flight delays and cancellations.

KEYWORDS: Air Traffic Control. ADS-B. Operational Efficiency. Flight Delay. Emissions.

1. Introdução

Em uma via aérea, a capacidade é restringida quando há um aumento na densidade do tráfego. Scarpel e Pelicioni [1] afirmam que em todo globo o aumento do movimento de aeronaves está atingindo a capacidade dos aeroportos de absorverem a demanda. Mesmo após a pandemia de covid-19, a Associação Internacional do Transporte Aéreo (IATA) [34] espera que ao final de 2023 o movimento global de aeronaves tenha atingido 103% do tráfego em relação a 2019. E a situação da capacidade operacional piora quando há restrições por condições meteorológicas, sendo essa uma tendência ainda para esta década, de acordo com Lui *et al.* [22].

O custo desse congestionamento ou atraso para empresas aéreas e passageiros incide diretamente nos meios necessários para a resiliência das operações e da chegada ao destino [1].

A Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-12 Regras do Ar define uma Área de Controle Terminal (TMA) como um Espaço Aéreo Controlado no qual, dentro de sua dimensão, é prestado o Serviço de Tráfego Aéreo (ATS) de aproximação e chegada para as aeronaves nas imediações de um ou mais aeródromos [30]. No Brasil, é administrado pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), órgão ligado ao Comando da Aeronáutica e Ministério da Defesa. A dificuldade do controle de uma TMA é que as aeronaves estão voando baixo,

com velocidades baixas, próximas umas das outras, executando diferentes tipos de procedimentos e em diferentes rotas, o que causa um aumento da carga de trabalho do controlador de voo e da atenção dos pilotos. Enfim, quando há uma condição de mau tempo meteorológico ou outro evento de interrupção operacional no(s) aeródromo(s) da imediação da TMA [25], isso significa que as aeronaves estarão por mais tempo recebendo o controle de tráfego aéreo, sendo no chamado procedimento de espera ou reduzindo a velocidade, gerando então o aumento de diversos custos operacionais, sendo um deles o da emissão de gases poluentes.

Existem diversas pesquisas relacionadas à otimização da performance do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), assim como de outros países, que visam ao desenvolvimento de rotas mais diretas e à demanda do setor (capacidade), cuidado para evitar áreas residenciais que aumentem a poluição sonora, previsibilidade, capacitação, infraestrutura técnica, segurança operacional e o custo-benefício ([3], [4], [1], [4], [6], [10], [11], [14], [16], [18], [19], [28], [29]). Ou seja, o Controle de Tráfego Aéreo é um tema amplamente debatido, principalmente porque há um conjunto de regras e circunstâncias que aumentam ainda mais a complexidade do transporte aéreo, e que pioram quando encontram condições não controladas pelo homem, como a meteorológica.

Por outro lado, ainda existe uma dificuldade na obtenção e na qualidade dos dados ofertados sobre a movimentação das aeronaves. As empresas aéreas interessadas na otimização de sua malha operacional e, por consequência, na redução de custos, investem na Garantia da Qualidade Operacional de Voo (ou *Flight Operational Quality Assurance* – FOQA), geralmente aplicado dentro do setor de engenharia que abrange um conjunto de métodos de monitoramento, análise e simulação com dados obtidos dos gravadores de dados do voo (FDR, acrônimo em inglês para *Flight Data Recorder*) ([40], [41]). Porém, os dados obtidos são majoritariamente utilizados para a previsão de gastos com manutenção e segurança operacional, e não há o compartilhamento desses dados, já que tais informações poderiam ser utilizadas por outras empresas em

modelagens estatísticas para obterem vantagens sobre a precificação de suas passagens aéreas [41]. De forma específica, o *software* Makron Platao® da Atech®, uma das empresas do Grupo Embraer™, responsável pelo fornecimento dos sistemas que atendem o Controle do Espaço Aéreo Brasileiro, é capaz de simular diversos cenários para fins de treinamentos, mas não de identificar a partir de um cenário real o tempo de atrasos e outras informações estatísticas. Além disso, os dados obtidos pelo sistema Sagitario® de controle de tráfego aéreo não são disponibilizados, servindo para uso tático e geração de relatórios para verificação de capacidade de congestionamento e saturação pós-operacional do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA) [42]. Já a Agência Nacional de Aviação Civil (Anac) disponibiliza informações sobre percentual de atraso e cancelamento de voo, com base no horário previsto para o início do voo, horário real de início do voo, horário previsto para pouso e horário real de pouso [35], sem informações em relação a rota, em qual momento do voo houve atraso operacional e performance das aeronaves.

Publicamente, está disponível a captação de dados de voo (*timestamp*, o horário UTC, *callsign*, posição, altitude, velocidade e direção) que são transmitidos por meio de dispositivos de um Sistema de Vigilância Aérea Automático Dependente por Radiodifusão (ADS-B, acrônimo em inglês para *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) acoplado nas aeronaves comerciais e algumas poucas aeronaves da aviação geral. Esses dados podem obtidos pelos receptores de desenvolvimento próprio ou por meio de empresas que comercializam essas informações, como a FlightRadar24™ e a FlightAware™.

Visto isso, há a oportunidade de desenvolver um método para verificação de gargalos operacionais e o tempo de permanência das aeronaves em determinada área de controle do espaço aéreo, utilizando dados obtidos por meio do ADS-B e da divisão do espaço aéreo publicado em cartas de navegação, quando há condições de tempo meteorológico ruim, sendo esse o objetivo deste artigo. Adicionalmente, apresentamos um estudo bibliométrico por meio de uma análise de ocorrência simultânea, para verificar quais são as

palavras-chaves mais utilizadas e suas relações na revisão bibliográfica para este estudo. Por último, também será analisado qual é a emissão adicional de CO₂ causada devido aos atrasos operacionais. Pejovic *et al.* [10], em seu estudo sobre o Aeroporto de Heathrow em Londres, também atestam a falta de informações de fechamento por condições meteorológicas por parte do aeródromo ou da agência reguladora inglesa.

O estudo será aplicado na área terminal do Aeroporto de Viracopos, em Campinas/SP, sendo esse o quarto aeroporto do Brasil com maior número de pousos e decolagens, por ser um aeroporto aliviador e de alternativa de Congonhas, Guarulhos e Belo Horizonte. Além disso, nos últimos 5 anos (2017-2022) os voos de destinos a SBKP tiveram média 5.000 voos mensalmente, e com uma média de atrasos superiores a 30 minutos, 6,05%, atrasos superiores a 60 minutos de 2,52% e média de cancelamentos de 3,23% [35].

Enfim, o congestionamento do Espaço Aéreo, seja por condições meteorológicas ou por qualquer outro motivo, implica também no custo de defesa que necessitará de investimento em pessoal e modernização dos procedimentos e materiais para o reequilíbrio do setor, assim como aconteceu no evento que ficou conhecido como Apagão Aéreo de 2006 [39].

2. Revisão bibliográfica

2.1 Da revisão bibliométrica

Conforme Carvalho *et al.* [16], os atrasos dos voos retornam problemas econômicos significantes para a sociedade, sendo, então, este tema frequente na literatura científica do transporte aéreo e o que torna necessário fazer uma revisão sistemática sobre o assunto.

A partir do termo *weather conditions affect airports operation* na base do ScienceDirect®, foram encontrados 5.377 resultados relacionados a artigos de pesquisa, sendo 400 artigos analisados para esta revisão bibliográfica. Desses, por meio de uma análise empírica dos autores, 28 ([1], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]) são cor-

relatos ao objetivo desta pesquisa. Foi realizada uma revisão bibliométrica com a análise de coocorrências, utilizando o VOSviewer®. Esse *software* permite que sejam visualizadas as relações das palavras-chaves dessas publicações, para que, então, esta revisão bibliográfica pudesse ser guiada com a utilização desses resultados na pesquisa.

Para Marques *et al.* [2], a análise de concorrência é um método quantitativo de palavras-chave catalogadas a partir da teoria de grafos, com um conjunto de objetos que se repetem em diferentes fontes.

Com esse *software*, foram extraídas duas visualizações e nelas foram geradas 79 relações entre as palavras-chaves, em 6 conjuntos. A Figura 1 mostra o resultado dessa análise com a visualização por rede.

No conjunto 1 estão as palavras-chaves *airport*, *aircraft engines*, *air pollutants*, *aviation emissions* e *air quality*, no qual a palavra que mais se repete entre as pesquisas com é *airport*; por isso, essa palavra aparece mais entre as palavras-chaves, assim como entre todas as palavras-chaves das referências bibliográficas. No conjunto 2, a palavra-chave que mais se repete é *climate change*, que se relaciona com as palavras *airport closure*, *London Heathrow*, *weather delay*, *sustainable development* e *disaster risk*. No conjunto 3, *resilience* aparece como a mais repetida e que se relaciona com *severe weather event*, *aviation*, *modal substitution* e *delay*. No conjunto 4 a palavra que mais ocorre é *risk assessment*, relacionada com *urban clusters*, *China*, *location selection* e *environmental risks*. Já no conjunto 5, com a palavra *efficiency* aparece *performance*, *seaport*, *privatization* e *developing countries*. Por fim, no conjunto 6 está *disruptive weather*, com as palavras-chaves *sea-level rise* e *adaptation*.

A Figura 2 mostra o resultado por visualização da ocorrência por sobreposição no

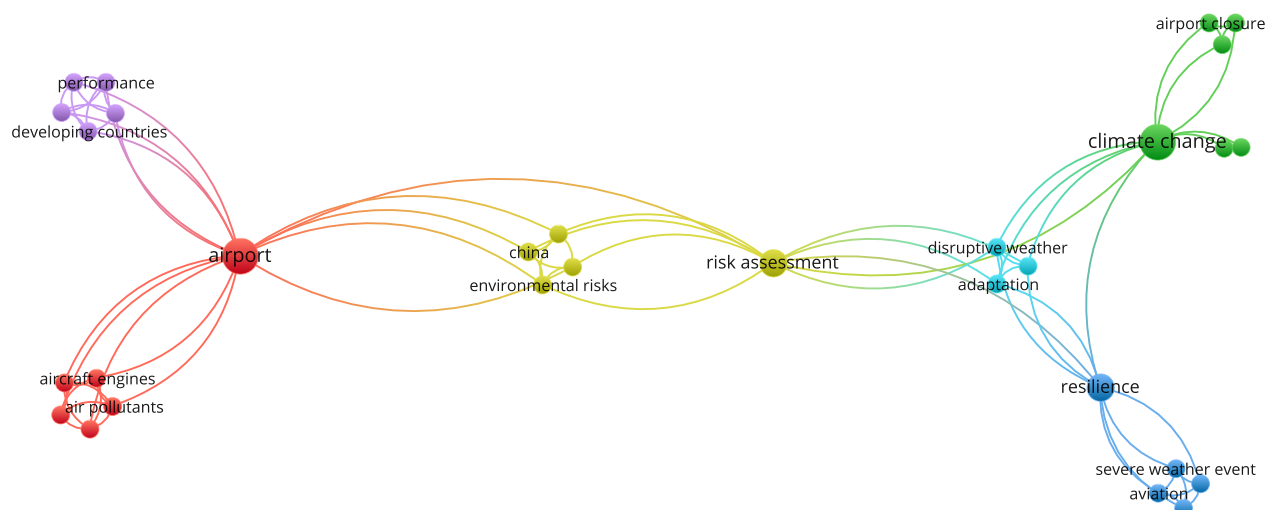
qual é mostrada pelo ano em que as palavras-chaves são encontradas nas publicações. Ela mostra que as palavras relacionadas com meteorologia, qualidade do ar e resiliência são mais recentes.

Carvalho *et al.* [16] realizou uma revisão sistemática sobre a relevância da pesquisa de atrasos de voos, identificando os principais métodos utilizados entre 123 artigos. Foi constatado que, entre 2001 e 2013,

era mais aplicado o uso de estatística descritiva e modelos de regressão. De 2013 a 2017 passaram a ser aplicados métodos de análise de rede. E de 2017 até 2019 foram identificados mais estudos utilizan-

do aprendizagem das máquinas. Esses autores concluem que há uma tendência de evolução de modelos híbridos para análises prescritivas e preditivas do transporte aéreo.

Figura 1 - Resultado das ocorrências das palavras-chaves.



VOSviewer

2.2 Dos efeitos operacionais durante condições meteorológicas adversas

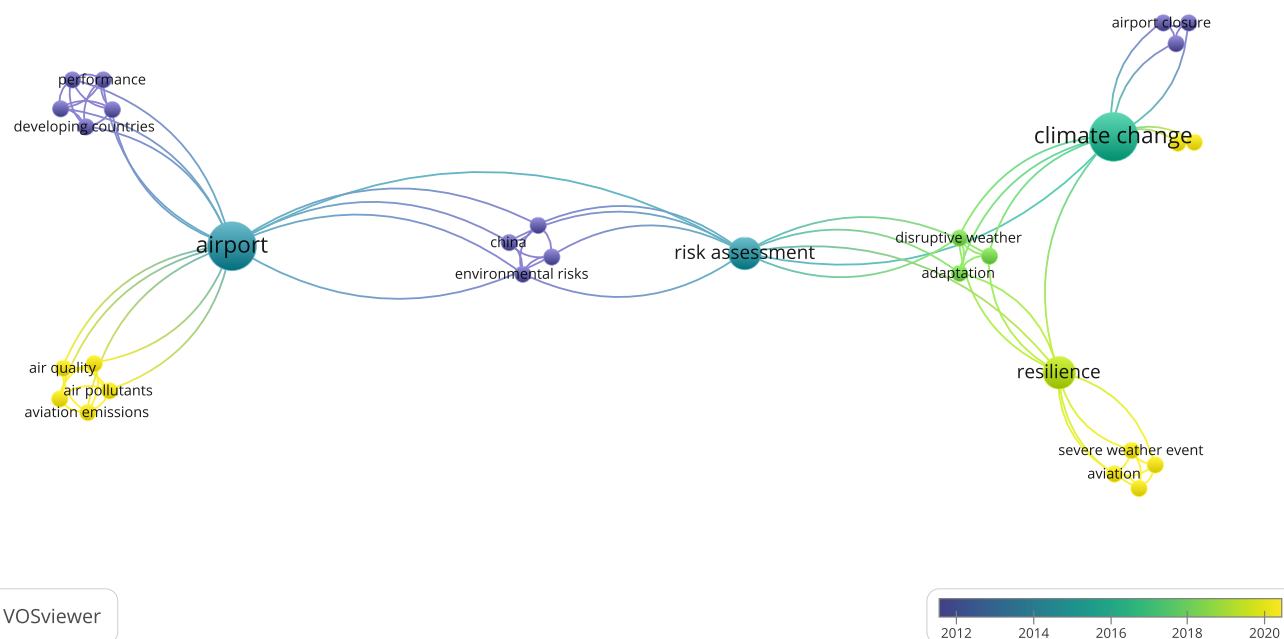
O congestionamento dos aeroportos é causado por condições meteorológicas ruins, falta de capacidade da infraestrutura aeroportuária, aumento da demanda pelo transporte aéreo e o tempo perdido na espera entre os procedimentos de pouso e decolagem [1] [4] [16] [10].

Uma boa prática do órgão que presta serviço de tráfego aéreo é fazer diariamente uma análise da previsão das condições meteorológicas e do movimento do tráfego aéreo. Essa prática é chamada na literatura de *Early Warning Model* (EWM) [1] [17] [18]. No Brasil, ela faz parte do Gerenciamento do Fluxo do Tráfego Aéreo, prestado pelo Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) [31]. O EWM consiste numa análise de regressão que projeta a quantidade de movi-

mentos diários para que sejam tomadas medidas como quantidade de pessoal empregado no controle de tráfego aéreo, nos aeroportos e na escala da tripulação de voo nos aeroportos em que o tempo estará ruim e nos que podem receber voos como alternativa.

Postorino *et al* [4] utilizaram modelos de simulação de eventos discretos, com base no *software* AnyLogic™, para estimar os eventos inesperados, em magnitude e duração, que afetam as operações de um aeroporto, avaliando a dinâmica de cada processo e o impacto dele dentro do sistema de transporte, que é dinâmico e estocástico. Os autores descrevem a dinâmica do transporte aéreo em duas camadas. A primeira seria uma atividade isolada com determinada performance, e a segunda seria o *output* da primeira camada conectando com todo o sistema, mostrando como a propagação de atividades eficientes e ineficientes fazem parte do resultado que representa o sistema.

Figura 2 - Resultado das ocorrências das palavras-chaves por ano da publicação.



Como estudo de caso, os autores utilizaram o aeroporto de Bologna, na Itália. Com capacidade de 24 movimentos por hora, aberto 24 horas, esse aeroporto recebe em média 107 pousos e 109 decolagens por dia.

O estudo considerou a chegada e a partida de 20 voos por hora, pegando dados reais do FlightRadar24™, e considerou a capacidade do aeroporto em relação a quantidade de escadas, caminhões de *catering*, água, limpeza, combustível e transporte de bagagens, e tratantes para *pushback*, a fim de encontrar a quantidade de voos que atrasariam, o total e a média do atraso para a decolagem e a variação do tempo entre a chegada e a saída da aeronave no aeroporto. Como resultado de 20 rodadas de simulação randômica, os autores constataram que, com os diferentes eventos de disrupção, 50% dos voos partiriam com atraso, 11,5% partiriam com mais de 1,5 hora de atraso, e uma aeronave partiria com mais de 4 horas de atraso. Os autores sugerem que novos estudos possam estimar o impacto ambiental com a emissão de CO₂ e ruído, e como esse impacto seria sentido por diferentes *stakeholders*.

Com o objetivo de tornar mais acurada a previsão meteorológica nos aeroportos, Larraondo *et al* [7] desenvolveram novo método de análise com inteligên-

cia das máquinas por meio da Predição Numérica de Tempo (NWP, no acrônimo em inglês). O algoritmo de seu modelo foi desenvolvido em Python e está disponível como *software* livre no repositório do GitHub™ do autor (<https://github.com/prl900/AeroCirTree>).

Esse sistema faz uso do banco de dados da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), buscando informações meteorológicas do Sistema de Previsão Global e do banco de dados do Código METAR distribuído pela WMO Global Telecommunication System (GTS). Como cenário, utilizaram os aeroportos de Berlin Tegel (EDDT), Heathrow (EGLL), Barcelona (LEBL), Charles de Gaulle (LFPG) e Milano Malpensa (LIMC), utilizando 8.760 informações METAR de cada aeroporto nos anos 2011, 2012 e 2013. Para comparar a eficácia do método, utilizaram os métodos de previsão linear e de regressão circular em árvore conhecido como Método Lund. Os resultados revelam que o método proposto por Larraondo *et al* [7] se mostra mais eficaz a longo prazo, sendo que o método linear é mais eficaz a curto prazo, ajustando-se em pequenas variações a longo prazo; já o Método Lund a médio prazo se apresenta mais vantajoso do que a aprendizagem de

máquinas criada pelos autores para a acurácia da previsão meteorológica nos aeroportos.

Para encontrar o impacto meteorológico na performance dos pousos para os voos domésticos no Brasil, Oliveira [11] utilizou do histórico de voos planejados e realizados, dados meteorológicos e estimaram por um modelo logit para analisar como as diversas condições meteorológicas afetam a probabilidade dos atrasos dos voos. Os resultados mostram que há uma evidência significativa sobre o atraso dos voos por eventos meteorológicos, mas condições de visibilidade e teto resultaram em coeficiente negativo, já condições como chuva e rajadas de vento são mais significativas para os atrasos.

3. Método

3.1 Obter informações do horário do fechamento do aeródromo

Para atingir o objetivo, o primeiro passo é encontrar quais foram os horários em que o aeroporto esteve fechado por condições meteorológicas adversas. Por meio da API da REDEMET, um serviço de prestação de informações meteorológicas do DECEA [32], é possível obter o histórico do Código METAR, que traz informações sobre dia, data, horário, aeroporto, velocidade e intensidade do vento, visibilidade vertical, nebulosidade e altura das nuvens, tempo presente, fenômenos de tempo presente, de temperatura do ar e do ponto de orvalho, e a pressão atmosférica no local em hPa. A seguir, há um exemplo de Código METAR do Aeroporto de Viracopos (SBKP), em Campinas/SP. A decodificação é feita através da ICA 105-16 [33].

2022081003 - METAR SBKP 100300Z 02008KT 7000 -RA BKN007 OVC013 18/17 Q1017=

No código METAR mostrado a informação é de 10 de agosto, referente a 3 horas no horário de Greenwich (Z), o vento é de 020° com 08 kt de intensidade, visibilidade de 7 mil pés, com chuva diminuindo (-RA), nublado (BKN) a 700 pés, encoberto (OVC) a 1.300 pés, com temperatura do ar de 18°C e temperatura do ponto de orvalho de 17°C, e a pressão para ajuste do altímetro, de 1017 hPa.

Para encontrar quais foram as horas em que o aeroporto esteve fechado e fazer a estatística descritiva da soma desses resultados, foi desenvolvido um algoritmo em Python (*vide* apêndice) que informasse o tempo (*timestamp*) em que o aeródromo não operou em Regra de Voo Visual (VFR), VFR Especial, procedimentos sob Regra de Voo por Instrumento, operação ILS, LNAV, LNAV (Performance A e B), LNAV Performance C e D, e RNP 0.3. A restrição da visibilidade para cada um desses tipos de procedimento depende das normas do tráfego aéreo e do que está publicado nas cartas de aproximação e decolagem de cada aeródromo.

3.2 Delimitação do espaço aéreo e dados de voos

Segundo Campos [37], para amostragem estatística em pesquisas de transportes, o melhor dia da semana a ser observado é quinta-feira. Dessa forma, esse foi o dia escolhido para os cálculos, após obter os resultados dos horários dos fechamentos do aeródromo. A partir de então, os arquivos em kml e csv para cada voo realizado numa quinta-feira seriam obtidos na plataforma FlightRadar24™. Esses arquivos fornecem as informações de *timestamp*, o horário UTC, *callsign*, altitude, velocidade e direção, sendo então possível calcular o tempo percorrido da aeronave na entrada da área da TMA até o toque final da pista.

O DECEA [34] publica os dados dos Planos de Voos Repetitivos, no qual são mostrados quais foram os voos programados para determinado dia. Com essa informação, comparou-se os voos programados em um dia em que não houve o fechamento do aeródromo, por questões meteorológicas, com um dia em que houve o fechamento, podendo assim estimar a diferença de tempo em que as aeronaves permaneceram até a saída da área terminal, após a decolagem, ou até o pouso.

As delimitações do espaço aéreo em formato csv foi obtida no diretório GEOAISWEB, que é mantido pelo DECEA. Alternativamente, poderia ser obtida por meio de uma Carta de Rota (ENRC). Tendo as coordenadas dos vértices da área e as altitudes em relação ao nível do mar, foi possível reproduzir o espaço geográfico por meio do segundo algoritmo desenvolvido (*vide* repositório <https://github.com/embarquetec/adatfm>).

Esse algoritmo faz a importação da trajetória do voo e identifica o momento em que a aeronave passa por uma das arestas do mapa gerado. Depois, faz-se a subtração do tempo voado entre cada zona do espaço aéreo. A Figura 3 mostra as delimitações no espaço aéreo e a trajetória do voo. A Tabela 1 mostra os *outputs* gerados para determinar o momento em que a aeronave passa por cada zona do espaço aéreo ou fase do voo, por exemplo, decolagem, cruzeiro, descida e pouso. Os resultados mostram também um erro, que é uma correção para mais que corresponde o tempo para a captação das informações da posição da aeronave pelo sistema Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) – e a confirmação da posição da aeronave. Esses tempos são subtraídos do tempo total.

Figura 3 - Reprodução da limitação do espaço aéreo com a trajetória de voo da aeronave.

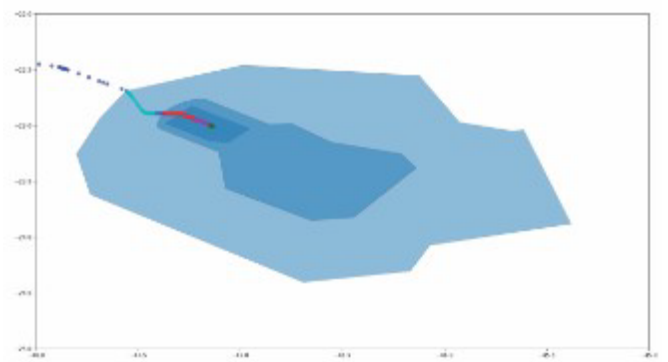


Tabela 1 - Saídas de identificação dos voos

Outputs	Descrição
<i>code</i>	Código IATA de identificação do voo
<i>departure_iata</i>	Código IATA do aeroporto de partida
<i>arrival_iata</i>	Código IATA do aeroporto de destino
<i>takeoff_time</i>	Hora da decolagem
<i>takeoff_time_error</i>	Erro do horário da decolagem

Outputs	Descrição
<i>level_off_time</i>	Hora em que atinge o nível de cruzeiro
<i>level_off_time_error</i>	Erro do horário em que atinge o nível de cruzeiro
<i>descent_init_time</i>	Hora em que se inicia a descida da fase de cruzeiro
<i>descent_init_time_error</i>	Erro da hora em que se inicia a descida da fase de cruzeiro
<i>touchdown_time</i>	Hora do pouso
<i>touchdown_time_error</i>	Erro da hora do pouso
<i>flight_time</i>	Tempo total de voo
<i>flight_time_error</i>	Erro no tempo total de voo
<i>before_takeoff_ground_duration</i>	Tempo em que a aeronave permaneceu em solo antes da decolagem
<i>before_takeoff_ground_duration_error</i>	Erro no tempo em que a aeronave permaneceu em solo antes da decolagem
<i>climb_duration</i>	Tempo de duração da subida
<i>climb_duration_error</i>	Erro no tempo de duração da subida
<i>cruise_duration</i>	Duração do tempo de voo em cruzeiro
<i>cruise_duration_error</i>	Erro na duração do tempo de voo em cruzeiro
<i>descent_duration</i>	Duração da descida
<i>descent_duration_error</i>	Erro no tempo de duração da descida
<i>after_landing_ground_duration</i>	Tempo de táxi após o pouso
<i>after_landing_ground_duration_error</i>	Erro no tempo de táxi após o pouso
<i>air_space_1_entry</i>	Hora de entrada no espaço aéreo

Outputs	Descrição
<i>air_space_1_entry_error</i>	Erro na hora de entrada no espaço aéreo
<i>air_space_1_exit</i>	Hora da saída do espaço aéreo
<i>air_space_1_exit_error</i>	Erro na hora de saída do espaço aéreo
<i>inside_air_space_1</i>	Tempo dentro do espaço aéreo
<i>inside_air_space_1_error</i>	Erro no tempo dentro do espaço aéreo
<i>total_time_inside_air_space</i>	Tempo de voo dentro das seções de espaço aéreo selecionados
<i>total_aircraft_fuel_inside_air_space</i>	Combustível total dentro do espaço aéreo selecionado
<i>total_passenger_CO2_inside_air_space</i>	Total de CO ₂ emitido dentro do espaço aéreo selecionado
<i>total_cost_CO2</i>	Custo total do CO ₂ emitido de acordo com a cotação atual

Para encontrar o custo total do CO₂ emitido de acordo com a cotação atual, utiliza-se o valor de mercado de R\$ 383,62 a tonelada, considerando o fechamento do mercado futuro em 1 de novembro de 2022 [38].

3.3 Cálculo da emissão de poluentes

O cálculo da emissão de CO₂ utiliza a API da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) [38] para o cálculo da emissão individual do passageiro. Esse método utiliza uma variável fixa multiplicando pelo total de combustível com o fator de carga para passageiro dividido pelo número de assentos para a categoria econômica (Y) com o fator de quantidade de passageiros estipulado para cada continente.

$$CO_2 \text{ per pax} = 3,16 \times \frac{(tf \times pfc)}{(nys \times plf)} \quad (1)$$

Sendo:

- = Total de combustível;
- = Fator de carga para passageiro;
- = Número de assentos para a categoria Y;
- = Fator de quantidade de passageiros por região.

Os valores do total do combustível consumido em cada trecho voado são obtidos por meio do retorno da API da OACI [38]. Para isso, é utilizada a média do histórico de todos os voos das companhias aéreas que repassam essa informação ao Bando de Dados da ANAC.

4. Estudo de caso

O cenário escolhido foi o do Aeroporto Internacional de Campinas/Viracopos (SBKP). Campinas é o quarto aeroporto do Brasil com maior número de pousos e decolagem, com 109.230 movimentos registrados no final de 2022, perdendo para Guarulhos (192.280 movimentos), Congonhas (130.820 movimentos) e Brasília (117.736 movimentos) [36]. A cidade de Campinas está localizada numa região serrana, além dos rios Capivari, Jaguari, Capivari-Mirim e Atibaia, que favorecem as condições para formação de aglomerado de gotículas d'água que ficam em suspensão na atmosfera. É esse nevoeiro que restringe a visibilidade para pousos e decolagem, causando atrasos e cancelamentos.

Segundo dados da Anac [35] de percentuais de voos atrasados e cancelados como origem em SBKP de dezembro de 2017 até setembro de 2022, mensalmente são, em média, 5.027 voos, com média de atrasos superiores a 30 minutos; de 7,03%, com atrasos superiores a 60 minutos; de 2,36% e com média de cancelamentos de 2,81%. Como voos de destinos a SBKP, temos em média 5.000 voos, com média de atrasos superiores a 30 minutos, com 6,05%; atrasos superiores a 60 minutos, com 2,52% e média de cancelamentos de 3,23%.

4.1 Dados do fechamento do aeródromo

A Tabela 2 mostra as restrições por teto de nuvens e de visibilidade para a operação por regra de voo e tipo de procedimento.

Tabela 2 - Condições de operação por regra de voo e procedimento para o Aeroporto de Viracopos

Procedimentos	Condições
VFR	Teto > = 1.500 ft
	Visibilidade > = 5.000 ft
VFR Especial	Teto > = 1.000 ft
	Visibilidade > = 3.000 ft
ILS	Teto > = 200 ft
	Visibilidade > = 800 ft
LNAV	Teto > = 357 ft
	Visibilidade > = 1.100 ft
LNAV (Performance A e B)	Teto > = 430 ft
	Visibilidade > = 800 ft
LNAV (Performance C e D)	Teto > = 430 ft
	Visibilidade > = 1.500 ft
RNP 0.3	Teto > = 339 ft
	Visibilidade > = 1.000 ft
RNP 0.15	Teto > = 0 ft
	Visibilidade > = 0 ft

Foram estipulados os dias 15 e 22 de setembro de 2022. A Tabela 3 mostra a quantidade de horas em que o aeródromo não operou para cada tipo de procedimento.

Tabela 3 - Tempo que cada procedimento permaneceu indisponível para operação

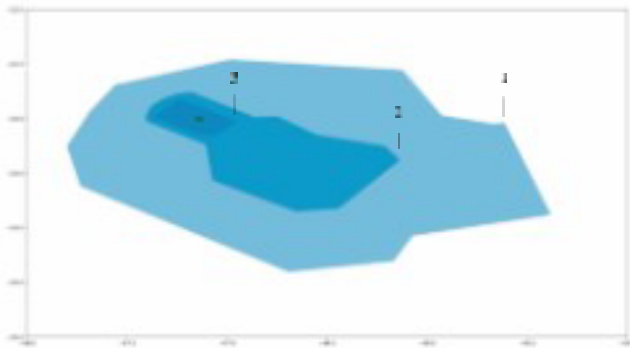
Procedimento	Tempo (hr) dia 15/09	Tempo (hr) dia 22/09
VFR	00:00	18:00
VFR Especial	00:00	08:33
ILS	08:00	04:48
LNAV	00:00	03:00
LNAV (Performance A e B)	00:00	03:33

Procedimento	Tempo (hr) dia 15/09	Tempo (hr) dia 22/09
LNAV (Performance C e D)	00:00	03:33
RNP 0.3	00:00	3:00
RNP 0.15	16:00	21:12

4.2 Delimitação do espaço aéreo e dados de voos

Para os procedimentos de pouso e decolagem no Aeroporto de Viracopos, as aeronaves passam pela CTR Campinas (3), pela TMA São Paulo 2 (2) e TMA São Paulo 1 (1). A Figura 4 mostra as seções dos espaços aéreos delimitados para este estudo.

Figura 4 - Delimitação do espaço aéreo do estudo.



Dentro dessa delimitação, temos os procedimentos Padrões de Chegada Terminal (STAR, no acrônimo em inglês para *Standard Terminal Arrivals*) intitulados de RNAV LOLED 1A (Figura 5), RNAV TIMRU 3B – UTLOT 3B (Figura 6) e RNAV VURAV 2A (Figura 7).

Figura 5 - Procedimentos STAR RNAV LOLED 1A.

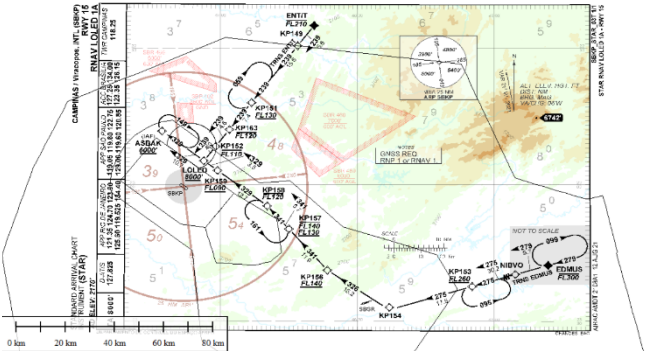


Figura 6 - Procedimento STAR RNAV TIMRU 3B – UTLOT 3B.

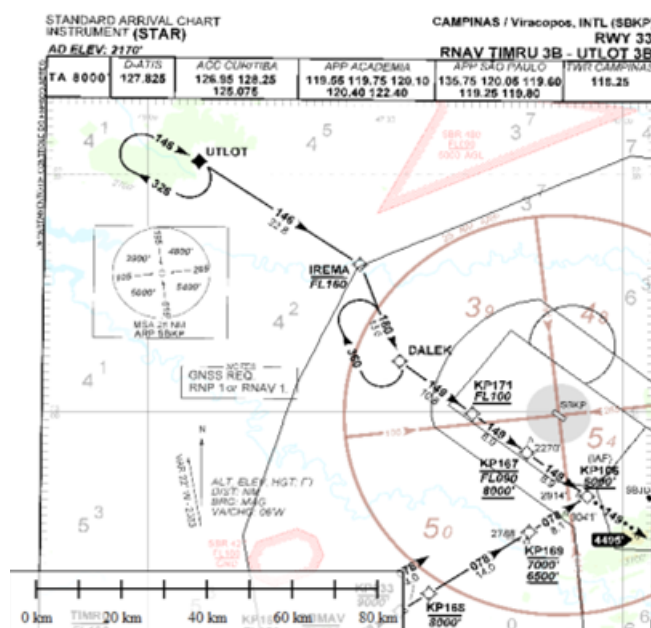
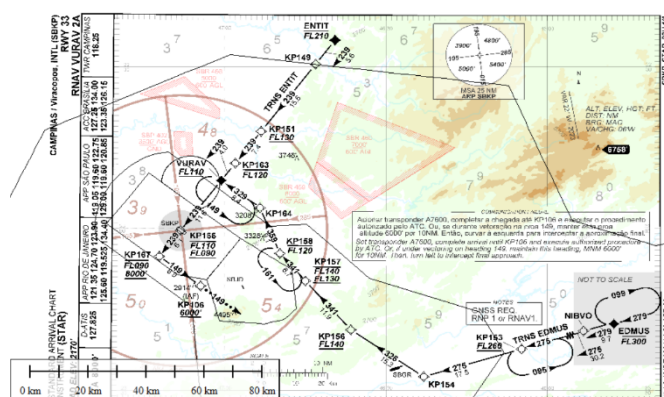


Figura 7 - Procedimento STAR RNAV VURAV 2A.



A partir da análise da base de dados de Planos de Voos Repetitivos do DECEA e do banco de dados de voos do FlightRadar24™, foram segregados os mesmos números de voos e respectivas rotas iguais para que houvesse um comparativo. Foram 44 voos analisados (AD4025, AD4276, AD4385, AD4942, AD4326, AD2942, AD2874, AD4047, AD4099, AD4708, AD4242, AD4386, AD2954, AD4027, AD4638, AD4310, AD4871, AD4555, AD2030, AD4805, AD2953, AD2021, G31771, AD4449, AD4033, G31712, AD4885, AD4285, AD4341, AD4361, AD4853, AD4872, AD4451, AD2740, AD4356, AD4789, AD4424, AD2697, AD4034, AD2824, AD4340, AD2736, AD4763, AD4322). Destes, nenhum voo atrasou no dia 15/09 e 6

voos atrasaram no dia 22/09, e nenhum voo foi desviado para outro aeroporto.

4.3 Resultado da aplicação

A Figura 8 mostra a rota dos voos com os atrasos. Nela é possível observar os procedimentos de órbita que geraram o atraso. O tempo para cada procedimento de órbita depende da performance da aeronave, porém cada perna do procedimento leva em torno de 1 minuto, devendo considerar o tempo para a aeronave entrar no procedimento e outros desvios. Quanto mais escura a cor da rota, maior foi o tempo das aeronaves nesse caminho.

A figura mostra que, na área da TMA São Paulo 1, áreas mais congestionadas estão nos limites do terminal, principalmente no procedimento de órbita no fixo DALEK (*vide* Figura 6) com 00:30:53 h e 13 aeronaves, e na órbita do fixo KP151 (*vide* Fig. 2) com 00:12:52 h e 3 aeronaves.

A Tabela 4 mostra o total de horas de voo por dia, dentro de cada espaço aéreo, e a soma total da hora de voo. A diferença entre as rotas entre o dia em que não houve atraso e o dia que teve foi de 00:52:29 a mais de voo.

Figura 8 - Compilado dos voos do dia 22/09.

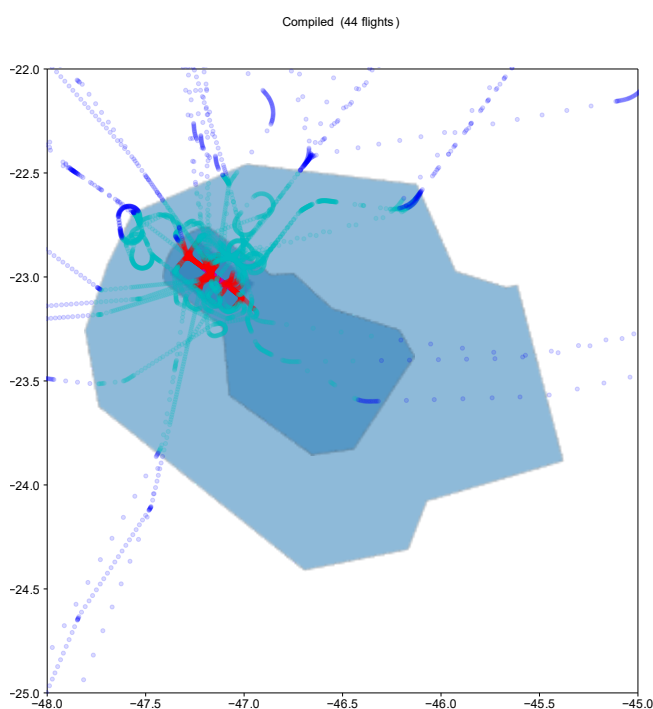


Tabela 4 - Tempo de voo dentro de cada seção do espaço aéreo

<i>Outputs</i>	Tempo (hr) dia 15/09	Tempo (hr) dia 22/09
<i>inside_tma_sao_paulo_1</i>	06:49:21	07:05:35
<i>inside_tma_sao_paulo_1_error</i>	00:25:39	00:29:38
<i>inside_tma_sao_paulo_2</i>	00:55:01	01:13:34
<i>inside_tma_sao_paulo_2_error</i>	00:00:11	00:00:14
<i>inside_ctr_campinas</i>	00:43:13	01:07:01
<i>inside_ctr_campinas_error</i>	00:13:04	00:15:24
<i>total_time_inside_air_space</i>	07:48:41	08:41:10

4.4 Resultado da emissão de poluentes

Segundo o manual da OACI [38], os voos dentro do continente sul-americano, são considerados com 82,6% e 77,27%. Nas rotas verificadas, as aeronaves utilizadas são os modelos A76, A32N, 73G e E95, para o A76 se considera a ocupação de 53 passageiros, e, para as demais aeronaves, são considerados 87 passageiros. O total de combustível gasto em cada trecho de voo foi obtido por meio do banco de dados da Anac.

A Tabela 5 mostra o resultado no qual os atrasos identificados na amostra geraram o consumo de 9.278,74 kg/CO₂ a mais emitidos na atmosfera e com um custo de R\$ 3.559,47 a mais na cotação utilizada de toneladas de CO₂.

Tabela 5 - Total de emissão em kg/CO₂ e custo

<i>Outputs</i>	dia 15/09	dia 22/09
<i>total_aircraft_fuel_inside_air_space</i>	44.587,86 kg	49.637,34 kg

<i>Outputs</i>	dia 15/09	dia 22/09
<i>total_passenger_CO2_inside_air_space</i>	81.933,04 kg/CO ₂	91.211,78 kg/CO ₂
<i>total_cost_CO2</i>	R\$ 31.430,80	R\$ 34.990,27

5. Considerações finais

A análise bibliométrica por ocorrência nos mostra a relevância do tema desta pesquisa, no qual as palavras-chaves relacionadas com eventos meteorológicos severos, resiliência do transporte aéreo e emissão de gases poluentes aparecem em publicações mais recentes.

Com base nos dados apresentados na Tabela 4, pode-se concluir que houve um aumento no tempo total de voo dentro do espaço aéreo interno da TMA São Paulo 1 e da TMA São Paulo 2, bem como do espaço aéreo interno do controle de tráfego de Campinas, entre os dias 15/09 e 22/09. Além disso, os valores apresentados para os erros nas diferentes áreas de controle também aumentaram em relação ao mesmo período. Em particular, o tempo total de voo dentro da TMA São Paulo 1 aumentou de 06:49:21 no dia 15/09 para 07:05:35 no dia 22/09, enquanto o tempo total de voo dentro da TMA São Paulo 2 aumentou de 00:55:01 para 01:13:34 no mesmo período. Da mesma forma, o tempo total de voo dentro do controle de tráfego de Campinas aumentou de 00:43:13 para 01:07:01. Com base nesses resultados, é possível identificar áreas que requerem atenção para garantir a segurança e a eficiência do tráfego aéreo na região.

A aplicação de um sistema de previsão e análise do tempo de congestionamento do espaço aéreo também contribuiria com medidas ATFM tomadas com informações obtidas por meio do Severe Weather Avoidance Plan (SWAP), cuja ativação já visa à mitigação da interrupção do tráfego aéreo a partir da análise das condições meteorológicas.

Os resultados mostram a diferença de consumo entre as mesmas rotas sem o atraso de voo e um dia de operação com alguns voos atrasados. Essa diferença resultou num consumo de aproximadamente

5 toneladas a mais de combustível ou aproximadamente 11 toneladas a mais de kg/CO₂ emitidos na atmosfera. Mostrando a importância no investimento em infraestrutura, tecnologias e treinamento de pilotos para que as aeronaves possam operar com visibilidade cada vez mais restrita e sem causar prejuízos à segurança operacional de voo.

Não foi considerado neste modelo o impacto do tempo de permanência das aeronaves para cada cabeceria; essa análise seria interessante para próximas pesquisas sobre este tema. Outro método seria o uso da metodologia Corsia, que utiliza a potência dos motores durante os ciclos de pouso e decolagem, no qual o regime de potência da aeronave é diferente.

Referências

- [1] SCARPE, R. A.; L. C. Pelecioni. A data analytics approach for anticipating congested days at the São Paulo International Airport. *Journal of Air Transport Management*, v. 72, 2018, p. 1-10.
- [2] MARQUES, F. B.; Y.; MACULAN, C. M. S. Co-ocorrência de palavras-chave em dados abertos da Capes: teses e dissertações em Ciência da Informação. *Múltiplos Olhares em Ciência da Informação*, [S.l.], n. Especial, 2021. @the
- [3] SANTA, S. L. B.; RIBEIRO, J. M. P.; MAZON, G.; SCHNEIDER, J.; BARCECELOS, R. L.; GUERRA, J. B. S. O. A Green Airport model: Proposition based on social and environmental management systems, *Sustainable Cities and Society*, v. 59, 2020.
- [4] POSTORINO, M. N.; MABTECCHINI, L.; MALANDRI, C.; PAGANELLI, F. A methodological framework to evaluate the impact of disruptions on airport turnaround operations: A case study, *Case Studies on Transport Policy*, v. 8, Issue 2, 2020.
- [5] OUM, T. H.; ZHANG, A.; ZHANG, Y. A note on optimal airport pricing in a hub- and-spoke system, *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 30, Issue 1, 1996.
- [6] SIVAKUMAR, S. A novel Integrated Risk Management Method for Airport operations, *Journal of Air Transport Management*, v. 105, 2022.
- [7] LARRAONDO, P. R.; INZA, I.; LOZANO J. A. A system for airport weather forecasting based on circular regression trees, *Environmental Modelling & Software*, v. 100, 2018.
- [8] CHEN, Z.; LI, H.; REN, H.; XU, Q.; HONG, J. A total environmental risk assessment model for international hub airports, *International Journal of Project Management*, v. 29, Issue 7, 2011.
- [9] LIN, M. H. Airport pricing and capacity: Schedule versus congestion delays, *Research in Transportation Economics*, v. 90, 2021.
- [10] PEJOVIC, T.; NOLAND, R. B.; WILLIAMS, V.; TOUMI, R. A tentative analysis of the impacts of an airport closure, *Journal of Air Transport Management*, v. 15, Issue 5, 2009.
- [11] OLIVEIRA, M.; EUFRÁSIO, A. B. R.; GUTERRES, M. X.; MURÇA, M. C. R.; GOMES, R. A. Analysis of airport weather impact on on-time performance of arrival flights for the Brazilian domestic air transportation system, *Journal of Air Transport Management*, v. 91, 2021.
- [12] TOKUSLU, A. Estimation of aircraft emissions at Georgian international airport, *Energy*, v. 206, 2020.
- [13] LIN, M. H.; ZANG, A. Hub congestion pricing: Discriminatory passenger charges, *Economics of Transportation*, v. 5, 2016.
- [14] ZHOU, L.; CHEN, Z. Measuring the performance of airport resilience to severe weather events, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 83, 2020.
- [15] PLANDA, B.; SKORUPSKI, J. Methods of air traffic management in the airport area including the environmental factor, *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 11, Issue 4, 2017.
- [16] CARVALHO, L.; STERNBERG, A.; GONÇALVES, L. M.; CRUZ, A. B.; SOARES, J. A.; BRANDÃO, D.; CARVALHO, D.; OGASAWARA, E. On the relevance of data science for flight delay research: a systematic review, *Transport Reviews*, v. 41, Issue 4, 2021.
- [17] WANG, Y.; ZHANG, Y. Prediction of runway configurations and airport acceptance rates for multi-airport system using gridded weather forecast, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 125, 2021.
- [18] SCHULTZ, M.; REITMANN, S.; ALAM, S. Predictive classification and understanding of weather impact on airport performance through machine learning, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 131, 2021.
- [19] ASHLEY, K.; SAVAGE, I. Pricing congestion for arriving flights at Chicago O'Hare Airport, *Journal of Air Transport Management*, v. 16, Issue 1, 2010.

- [20] RHODES, S. L. The effect of the environment on aviation weather safety: Meteorological assessment for the new Denver airport,
- [21] Environmental Impact Assessment Review, v. 13, Issue 1, 1993.
- [22] GONG, S. X. H.; CULLINANE, K.; FIRTH, M. The impact of airport and seaport privatization on efficiency and performance: A review of the international evidence and implications for developing countries, *Transport Policy*, v. 24, 2012.
- [23] LUI, G. N.; HON, K. K.; LIEM, R. P. Weather impact quantification on airport arrival on-time performance through a Bayesian statistics modeling approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 143, 2022.
- [24] JOHNSON, T.; SAVAGE, I.; Departure delays, the pricing of congestion, and expansion proposals at Chicago O'Hare Airport, *Journal of Air Transport Management*, v. 12, Issue 4, 2006.
- [25] BURBIDGE, R. Adapting aviation to a changing climate: Key priorities for action, *Journal of Air Transport Management*, v. 71, 2018.
- [26] WANG, S.; CHU, J.; LI, J.; DUAN, R. Prediction of Arrival Flight Operation Strategies under Convective Weather Based on Trajectory Clustering, *Aerospace*, v. 9, Issue 4, 2022.
- [27] KETABDARI, M.; TORALDO, E.; CRISPINO, M. Numerical Risk Analyses of the Impact of Meteorological Conditions on Probability of Airport Runway Excursion Accidents. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2020. ICCSA 2020. Lecture Notes in Computer Science*, v. 12249. Springer, Cham, 2020.
- [28] TASZAREK, M.; KENDZIERSKI, S.; PILGUJ, N. Hazardous weather affecting European airports: Climatological estimates of situations with limited visibility, thunderstorm, low-level wind shear and snowfall from ERA5. *Weather and Climate Extremes*, v. 28, 2020.
- [29] KAEWUNRUEN, S.; SRESAKOOLCHAI, J.; XIANG, Y. Identification of Weather Influences on Flight Punctuality Using Machine Learning Approach. *Climate*, v. 9, Issue 127, 2021.
- [30] ADLER, N.; YAZHEMSKY, E. The value of a marginal change in capacity at congested airports, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 114, Part A, 2018.
- [31] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. ICA 100-12 – Regras do Ar. Ministério da Defesa, Brasília, 2016.
- [32] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. ROCA 21-74 – Regulamento do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Ministério da Defesa, Brasília, 2018.
- [33] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. API-REDEMETS: O que é? online, s.d. Disponível em: <<https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/api-redemet-o-que-e/>>.
- [34] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. ICA 105-16 – Códigos Meteorológicos. Ministério da Defesa, Brasília, 2017.
- [35] IATA – International Air Transport Association (IATA). Air Passenger Numbers to Recover in 2024. ONLINE, 2022. Available at: <<https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/>>.
- [36] ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. Percentuais de atrasos e cancelamentos. online, s.d. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/voos-e-operacoes-aereas/percentuais-de-atrasos-e-cancelamentos>>.
- [37] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2021. ONLINE, 2022. Disponível em: <http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2021.pdf>.
- [38] CAMPOS, V. B. G. Planejamento de Transportes: Conceitos e Modelos, Ed. Interciência, 2013.
- [39] INVESTING.com. Crédito Carbono Futuros – Dez 22 (CFI2Z2). ONLINE. Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>.
- [40] PRAZERES, D. L.; GUEDES, E. P. A Participação da Administração Privada na Exploração da Infraestrutura Aeroportuária Brasileira. Caderno do IX Simpósio de Transporte Aéreo – SITRAER. Manuais, 2010 p. 386-397, Tr. 41.
- [41] CORRADO, S. J.; PURANIK, T. G.; FISCHER, O. P.; MAVRIS, D. N. A clustering-based quantitative analysis of the interdependent relationship between spatial and energy anomalies in ADS-B trajectory data,
- [42] *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 131, 2021.
- [43] SILVA, L. C.; MURÇA, M. C. R. A data analytics framework for anomaly detection in flight operations, *Journal of Air Transport Management*, v. 110, 2023.
- [44] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. CIRCEA 100-77 – Padronização na Utilização do TATIC e SAGIATIO Integrados no Âmbito do SISCEAB. Ministério da Defesa, Brasília, 2017.
- [45] DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. AIC A 20/19 - Severe Weather Avoidance Plan (SWAP). Ministério da Defesa, Brasília, 2019.