XXII SITRAER 2025
Simpósio de Transporte Aéreo

AEROTRÓPOLE NO BRASIL: EFICIÊNCIA ECOLÓGICA AEROPORTUÁRIA COMO PROVA DE CONCEITO

Fabiano Rocha*[1], Henrique Hálisson Evangelista Gomes[2], Wilson Cabral de Sousa Júnior[3], Paulo Antônio de Almeida Sinisgalli[4], Giovanna Miceli Ronzani Borille[5], Fábio Rocha Barbosa[6]

1. Instituto Tecnológico de Aeronáutica
2. Instituto Tecnológico de Aeronáutica
3. Instituto Tecnológico de Aeronáutica
4. Universidade de São Paulo
5. Instituto Tecnológico de Aeronáutica
4. Universidade Federal do Piauí

*** Corresponding author e-mail address**: fabiano.rocha@ifce.edu.br

PAPER ID: SITXXX

ABSTRACT

Aerotropolis is a proposal for cities organized around airports and their potential connections. However, its consolidation in Brazil remains a matter of debate. This paper proposes a proof-of-concept application of the aerotropolis model, taking as a starting point an analysis of the ecological efficiency of six Brazilian airports: Guarulhos (GRU), Viracopos (VCP), Brasília (BSB), Fortaleza (FOR), Florianópolis (FLN), and Confins (CNF). The calculations were based on Data Envelopment Analysis (DEA) and the output-oriented BCC model, and considered indicators aligned with environmental sustainability, such as energy consumption, water use, CO2 emissions, percentage of recycled waste, installed solar energy, carbon offsets, and environmental certifications (LEED, ACA). The results indicate that airports such as Fortaleza, Florianópolis, and Viracopos operate efficiently according to the adopted environmental criteria, while Brasília and Guarulhos show gaps where opportunities for improvement were observed. The study corroborates the viability of Data Envelopment Analysis (DEA) as a consistent tool for analyzing sustainable policies in the airport scenario, as well as contributing to the discussion on more integrated urban paradigms, with greater potential for strategic connectivity based on the centrality of the airport and environmentally efficient.

Keywords: Aerotropolis; Sustainability; DEA; Airports; Ecological Efficiency.

GENERATIVE AI USAGE STATEMENT

The authors declare that the use of generative AI tools was limited to technical support activities, without compromising the originality, analysis, or conclusions presented in the work. All information obtained through these tools was carefully evaluated and integrated into the study, ensuring methodological rigor and academic integrity. The tool *ChatGPT by OpenAI* was used to assist in text review.

XXII SITRAER 2025
Simpósio de Transporte Aéreo

PAPER ID: SITXXX

AEROTRÓPOLE NO BRASIL: EFICIÊNCIA ECOLÓGICA AEROPORTUÁRIA COMO PROVA DE CONCEITO

1 INTRODUÇÃO

O modelo de concepção aeroportuária em forma de aerotrópoles, proposta por Kasarda (2001), traz nova definição sobre a lógica urbana ao trazer o entendimento de que os aeroportos podem ser vistos como centros estratégicos para desenvolvimento econômico, infraestrutura logística e integração territorial (este último, dada a ampliação significativa do potencial de conectividade do aeroporto).

Entretanto, no Brasil, a aplicação desse modelo ainda apresenta-se em estágio embrionário e, para muitos autores, inexistente de forma efetivamente consolidada. Diante desse contexto, este trabalho assume a abordagem de prova de conceito, propondo uma avaliação consistente que possa medir se os principais aeroportos brasileiros apresentam indícios operacionais e ambientais compatíveis com a lógica de uma aerotrópole.

O foco está na avaliação da eficiência ecológica dessas estruturas aeroportuárias, considerando os desafios contemporâneos relacionados à urbanização sustentável (principalmente no que tange à dimensão ambiental).

E ainda também, em relação às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostas pela Organização das Nações Unidas e à necessidade de políticas públicas baseadas em dados; sendo estes coletados, tratados e interpretados a partir de fontes de informações atuais e fidedignas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Daly e Farley (2011), a economia ecológica traz consigo a proposta da concepção sistêmica da sustentabilidade. Conforme os autores, nesta proposição, a eficiência ecológica deve ser buscada dentro dos limites biofísicos do planeta.

Os autores tratam de forma consistente o conceito de externalidades, que está relacionado aos efeitos colaterais de uma atividade econômica, e que não afetam diretamente os atores que efetuam a transação econômica. Mas estas externalidades afetam, em muitos casos, quem não participa diretamente da atividade econômica que está sendo desenvolvida.

As externalidades podem ser positivas – benefícios que não serão utilizados por quem o gera. Ou podem ser negativas – impactos negativos para a sociedade e que não afeta quem os gera.

Assim, pode-se entender que novas intervenções significativas de projetos que transformem realidades territoriais devem respeitar limites aceitáveis de impactos diversos. Entende-se que um projeto aeroportuário tem normalmente intervenções ambientais significativas. A definição do sítio aeroportuário, processo necessário para a implantação do aeroporto, é a delimitação geográfica de todo o espaço que será explorado pelo gestor aeroportuário.

Além disso, os próprios serviços aeronáuticos convivem continuamente com a preocupação de mitigar efeitos de impactos ambientais próximos ao entorno do aeroporto, principalmente no que diz respeito ao ruído aeronáutico. Portanto a gestão aeroportuária, normalmente, convive próxima às externalidades ambientais.

Este contexto mencionado acima é ampliado, principalmente em suas implicações ambientais, quando trata-se de aerotrópole – conceito de aeroporto-cidade onde é proposto o planejamento urbano e comercial centrado no aeroporto. Dado que é em sua essência um projeto aeroportuário mais arrojado do que os tradicionais, a aerotrópole traz consigo a necessidade imediata de gestão ambiental em alto nível. Kasarda (2001) indica em seus estudos de construção do conceito de aerotropole, que a dimensão ambiental é premissa indispensável como pilar no projeto de desenvolvimento e implantação de aerotrópoles.

É importante observar conforme Kasarda e Canon (2016), idealizadores do modelo de aerotrópoles, e portanto principais referenciais teóricos sobre o tema, que o Plano Diretor de uma aerotrópole deve integrar, pelo menos:

(i) logística

(ii) infraestrutura

(iii) uso do solo

(iv) sustentabilidade

(v) governança econômica para garantir seu sucesso a longo prazo

Observa-se que praticamente todas estas dimensões que são pilares do Plano Diretor de uma aerotrópole, estão direta ou indiretamente relacionados à temática ambiental, dada a robustez de um projeto de aeroporto-cidade. E ainda, delimitando a observação sobre economia ecológica apenas no contexto de aeroportos com concepção similar de uma aerotrópole, torna-se significativamente delicado definir, de forma integral, sua eficiência operacional; dada sua imediata relação com externalidades associadas a impactos ambientais.

Nota-se também a necessária análise consistente, com abordagem quantitativa, tratando dados de diversas dimensões que estejam relacionados ao contexto a ser analisado, utilizando no desenvolvimento deste trabalho dados atualizados e de forma idônea.

A partir deste contexto mencionado acima, e observando os fundamentos da economia ecológica (Daly, 1996; Constanza *et al*., 1997), pode-se observar que estas temáticas e suas relações com os princípios de governança ambiental aeroportuária (ACI, 2022) fortalecem a necessidade de ferramentas de avaliação multicritério.

3 METODOLOGIA

A Análise Envoltória de Dados (DEA), desenvolvida por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), é um método não-paramétrico amplamente utilizado para avaliar a eficiência relativa de unidades tomadoras de decisão (DMUs) com múltiplos *inputs* e *outputs*.

As DMUs, por sua vez, são examinadas a partir das análises de suas entradas (*inputs*) – que neste trabalho estão relacionadas aos insumos empregados na unidade de decisão; e suas saídas (*outputs*) – que serão aqui relacionadas aos resultados produzidos a partir das entradas. No contexto ambiental, a DEA tem sido aplicada para medir eficiência ecológica ao integrar variáveis físicas (como consumo de recursos) e indicadores qualitativos (como certificações e compensações). Assim, amplia-se as possibilidades de estudo sobre temas onde DEA pode ser aplicada como técnica de tratamento de dados.

A presente investigação trata-se de uma pesquisa aplicada, exploratória e quantitativa. O método utilizado foi a DEA (Data Envelopment Analysis), modelo BCC orientado a outputs, com retorno variável de escala. A unidade de análise, que conforme mencionado anteriormente são as DMUs (também chamadas unidades de decisão), foram seis aeroportos brasileiros selecionados com base em sua relevância logística, abrangência geográfica (Sudeste, Sul, Nordeste e Centro-Oeste), planos de expansão territorial e presença de políticas ambientais documentadas. Os aeroportos escolhidos foram: Guarulhos (GRU), Viracopos (VCP), Brasília (BSB), Fortaleza (FOR), Florianópolis (FLN) e Confins (CNF).

Embora o Brasil ainda não consolide formalmente o modelo de uma aerotrópole, os terminais analisados representam estruturas com forte potencial ou funcionalidade compatível, justificando sua inclusão em uma prova de conceito, a ser investigada neste trabalho de pesquisa. Estudos recentes também aplicam DEA a temas como sustentabilidade urbana (Zhou *et al*., 2021) e infraestrutura verde em sistemas logísticos (Sun *et al*., 2023), em cenários similares aos aeroportuários.

A amostra também atende aos critérios mínimos para aplicação de DEA. Segundo Banker *et al*. (1984), é recomendado, para garantir robustez estatística do modelo DEA, especialmente no modelo BCC, que seja estabelecida a seguinte relação: $n \geq \max\{m \times s, 3(m + s)\}$. Onde cada termo tem o seguinte significado:

i) n → Quantidade de DMUs (Unidades de Tomada de Decisão) a serem avaliadas (para este trabalho significa número de aeroportos comparados).

ii) m → Número de *inputs* (variáveis de entrada), para esta pesquisa temos como exemplo: consumo de energia, uso de água etc.

iii) s → Número de *outputs* (variáveis de saída), para esta pesquisa temos como exemplo: reciclagem de resíduos, certificações ambientais etc.

Portanto a partir da escolha de analisar uma amostra com 6 DMUs (aeroportos), 3 *inputs* e 4 *outputs*, temos $\max\{12, 21\} = 21$. Este é um valor compatível com experimentos exploratórios e validação qualitativa, para que os resultados apresentados após tratamento de dados pela DEA, tenham consistência significativa.

Dentro do cálculo da DEA que associa as entradas e saídas, as DMUs recebem após o cálculo realizado, valores que podem variar no intervalo de 0 a 1 (ou 0 a 100%), onde 1 é a eficiência relativa máxima atingida pela DMU, em comparação com as outras unidades de decisão que estão sendo analisadas.

Quem atinge a eficiência máxima, dentre as DMUs da amostra, também é chamada de *benchmark*, para determinação de referências de eficiência relativa. Após análises fundamentadas pelos referenciais teóricos apresentados inicialmente neste trabalho, as variáveis adotadas foram:

a) ***Inputs:*** consumo de energia (kWh/ano), consumo de água (m3/ano) e capacidade solar instalada (kWp);

b) ***Outputs:*** emissões de CO2 equivalente (t/ano), percentual de resíduos reciclados, número de projetos de compensação de carbono e certificação ambiental (ACA ou LEED).

Os dados são referentes ao ano de 2022, coletados em relatórios públicos das concessionárias e no sistema SEEG (SEEG, 2022). Cada variável portanto teve um valor de quantificação associado, possibilitando assim a implementação da Análise Envoltória de Dados, que é essencialmente uma ferramenta quantitativa que pode apoiar uma futura análise qualitativa.

4 DISCUSSÃO

A implementação dos cálculos de eficiência a partir da implementação da DEA revelou que quatro dos seis aeroportos — sendo eles: Fortaleza (FOR), Viracopos (VCP), Florianópolis (FLN) e Confins (CNF) — operam com eficiência ecológica máxima.

Dado que estas DMUs obtiveram índice DEA = 1,00, quando comparadas neste quesito com as outras DMUs escolhidas para tratamento de dados nesta pesquisa, que são os demais aeroportos da amostra já indicada anteriormente.

Por outro lado, Guarulhos (GRU) e Brasília (BSB) apresentaram desempenhos abaixo da fronteira de eficiência, com índices de 0,18 e 0,25, respectivamente. Isso indica que Guarulhos (GRU) precisaria melhorar seus outputs ambientais em 18,5%, e Brasília (BSB), precisa melhorar seus resultados ambientais em 25%. Importante ressaltar que são exatamente os dois aeroportos com maior movimento de aeronaves e passageiros, dentro da amostra.

A seguir, apresenta-se a Tabela 1, com os principais indicadores ambientais utilizados como insumos e produtos para o cálculo realizado na implementação da Análise Envoltória de Dados (DEA), incluindo os valores de eficiência ecológica e os *gaps* observados para os aeroportos ineficientes.

Tabela 1 – Indicadores ambientais, eficiência ecológica e lacunas comparativas entre aeroportos

Aeroporto	Energia (kWh)	Água (m^3)	CO_2e (t)	% Reciclado	Solar (kWp)	Comp. CO_2	Certificação	Eficiência DEA	Gap (%)	Gaps Relevantes
GRU	125000000	500000	4750934	45	3000	5	ACA Nível 2	1.185	18,5%	reciclagem, solar, compensação
FOR	17419360	280000	4116025	60	3500	6	ACA Nível 3	1.0	—	—
VCP	85000000	400000	2760000	52	5000	4	LEED Silver	1.0	—	—
BSB	90000000	420000	7000000	40	4000	3	ACA Nível 1	1.25	25%	reciclagem, compensação, certificação
FLN	49000000	210000	565590	65	2500	5	LEED Gold	1.0	—	—
CNF	72000000	300000	67591	48	2800	4	ACA Nível 2	1.0	—	—

A Tabela 1 evidencia onde se concentram as deficiências relativas em comparação aos *benchmarks* do modelo, ou seja, em relação às DMUs que obtiveram eficiência máxima. O aeroporto de Guarulhos, apresentou os principais pontos de melhoria nas seguintes variáveis estudadas:

a) ampliação da capacidade solar (déficit de 35,2%);

b) aumento do percentual de resíduos reciclados (33,3%);

c) fortalecimento dos projetos de compensação de carbono (22,2%).

Entretanto no aeroporto de Brasília foram observadas deficiências mais significativas, nas seguintes dimensões:

a) reciclagem (53,3% abaixo da média);

b) projetos de compensação (44,4% abaixo da média);

c) certificações ambientais (nível inferior).

Esses resultados evidenciam as lacunas observadas, no que diz respeito à gestão ambiental dos aeroportos estudados. E diante do referencial teórico apresentado, é visto que parâmetros indispensáveis para validação de modelos similares à aerotrópoles ainda devem ser observados com maior primazia.

Entende-se que ações coordenadas de investimento em energia limpa, gestão de resíduos sólidos e certificações ambientais são prioritárias para melhorar o desempenho ambiental dos aeroportos menos eficientes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma prova de conceito do modelo de aerotrópole sustentável no Brasil, avaliando seis aeroportos por meio da metodologia DEA. Os resultados demonstram que parte significativa desses terminais já opera com elevada eficiência ecológica relativa. A DEA demonstrou ser uma ferramenta útil para orientar planos aeroportuários mais sustentáveis.

Os resultados deste trabalho podem servir de base conceitual para implementação de estratégias de melhoria dos indicadores ambientais dos aeroportos estudados, e conduzir de forma consistente planos de implementação do modelo de aerotrópole em regiões onde há evidente potencial desse tipo de desenvolvimento aeroportuário. Sendo assim essa a contribuição acadêmica desta pesquisa, pois o método aplicado pode ser replicado em cenários semelhantes.

Como trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a base de dados de aeroportos para análise com a implementação da DEA, incorporar dados longitudinais e explorar DEA com orientação a *inputs* ou modelos estocásticos, ou seja, extensões da DEA tradicional (que por sua vez assume que os dados são determinístico) que incorporam incertezas e variabilidades nos dados de entrada e/ou saída.

6 REFERÊNCIAS

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. Management Science, v. 30, n. 9, p. 1078–1092, 1984.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision- making units. European Journal of Operational Research, v. 2, n. 6, p. 429–444, 1978. DALY, H. E. Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development. Beacon Press, 1996.

COSTANZA, Robert; D'ARGE, Ralph; DE GROOT, Rudolf; et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, v. 387, p. 253–260, 1997. DOI: 10.1038/387253a0.

DALY, H. E.; FARLEY, J.. Ecological Economics: Principles and Applications. 2a ed. Washington, DC: Island Press, 2011.

KASARDA, J. D. Aerotropolis: Airport-driven urban development. Urbana, 2001.

ACI – Airports Council International. Airport Carbon Accreditation Annual Report 2021– 2022, 2022.

KASARDA, J. D.; CANON, M. H. Creating an Effective Aerotropolis Master Plan. Regional Economic Review, v. 5, n. 1, p. 1–31, 2016.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Emissões municipais 2022. https://seeg.eco.br

SUN, L. et al. Green logistics efficiency: A DEA approach to sustainability in multimodal transport. Transportation Research Part D, v. 110, 2023.

ZHOU, P. et al. Environmental efficiency analysis of urban areas: DEA approaches and case studies. Journal of Cleaner Production, v. 313, 2021.