

Estudio de la contaminación auditiva producida por las aeronaves sobre la ciudad de Bogotá, utilizando el sistema ADS-B

Fecha de recibido: 15 de julio 2023	Fecha de aprobado: 23 de abril 2024
Reception date: July 15, 2023	Approval date: April 23, 2024
Data de recebimento: 15 de julho de 2023	Data de aprovação: 23 de abril de 2024

Danny Stevens Traslaviña Navarrete

<https://orcid.org/0009-0000-8897-7235>
 dstaslavinan@libertadores.edu.co

Estudiante de Ingeniería Aeronáutica
 Investigador – Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia
 Rol del investigador: teórico y escritura
 Grupo de investigación en diseño, análisis y desarrollo de sistemas de ingeniería - GIDAD
 Aeronautical Engineering Student
 Researcher – Los Libertadores University Foundation, Colombia
 Researcher's role: theoretical and writing
 Research Group in Design, Analysis and Development of Engineering Systems - GIDAD
 Estudante de Engenharia Aeronáutica
 Investigador – Fundação Universitária Los Libertadores, Colômbia
 Função do investigador: teórico e escritor
 Grupo de Investigação em Concepção, Análise e Desenvolvimento de Sistemas de Engenharia - GIDAD

Alec Mauricio Rosales Cabezas

<https://orcid.org/0009-0001-0279-4946>
 amrosalesc@libertadores.edu.co

Estudiante de Ingeniería Aeronáutica
 Investigador – Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia
 Rol del investigador: teórico y escritura
 Grupo de investigación en diseño, análisis y desarrollo de sistemas de ingeniería - GIDAD
 Aeronautical Engineering Student
 Researcher – Los Libertadores University Foundation, Colombia
 Researcher's role: theoretical and writing
 Research Group in Design, Analysis and Development of Engineering Systems - GIDAD
 Estudante de Engenharia Aeronáutica
 Investigador – Fundação Universitária Los Libertadores, Colômbia
 Função do investigador: teórico e escritor
 Grupo de Investigação em Concepção, Análise e Desenvolvimento de Sistemas de Engenharia - GIDAD

Sergio Nicolás Madrid Farfán

<https://orcid.org/0009-0002-9417-4273?lang=en>
 snmadridf@libertadores.edu.co

Estudiante de Ingeniería Aeronáutica
 Investigador – Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia
 Rol del investigador: teórico y escritura
 Grupo de investigación en diseño, análisis y desarrollo de sistemas de ingeniería - GIDAD
 Aeronautical Engineering Student
 Researcher – Los Libertadores University Foundation, Colombia
 Researcher's role: theoretical and writing
 Research Group in Design, Analysis and Development of Engineering Systems - GIDAD
 Estudante de Engenharia Aeronáutica
 Investigador – Fundação Universitária Los Libertadores, Colômbia
 Função do investigador: teórico e escritor
 Grupo de Investigação em Concepção, Análise e Desenvolvimento de Sistemas de Engenharia - GIDAD

Iván Felipe Rodríguez Barón

<https://orcid.org/0000-0001-8336-283X>
 ifrodriguez@libertadores.edu.co

Magíster en Ciencias y tecnologías Espaciales
 Docente e investigador – Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia
 Rol del investigador: teórico y escritura
 Grupo de Investigación en Ingeniería Aplicada (GUIAS)
 Master's Degree in Spatial Sciences and Technologies
 Teacher and researcher – Los Libertadores University Foundation, Colombia
 Role of the researcher: theoretical and writing
 Applied Engineering Research Group (GUIAS)
 Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais
 Professor e investigador – Fundação Universitária Los Libertadores, Colômbia
 Papel do investigador: teórico e escritor
 Grupo de Investigação em Engenharia Aplicada (GUIAS)

Cristian Lozano Tafur

<https://orcid.org/0000-0002-6653-6188>
 cloganot@libertadores.edu.co

Magíster en Ingeniería
 Docente e investigador – Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia
 Rol del investigador: teórico y escritura
 Grupo de investigación en diseño, análisis y desarrollo de sistemas de ingeniería - GIDAD
 Master's Degree in Engineering
 Professor and researcher – Los Libertadores University Foundation, Colombia
 Researcher's role: theorist and writer
 Research Group in Design, Analysis and Development of Engineering Systems - GIDAD
 Mestrado em Engenharia
 Professor e investigador – Fundação Universitária Los Libertadores, Colômbia
 Papel do pesquisador: teórico e escritor
 Grupo de Investigação em Concepção, Análise e Desenvolvimento de Sistemas de Engenharia - GIDAD

Edison Jair Bejarano Sepúlveda

<https://orcid.org/0000-0002-5384-5141>
 ejbejaranos@gmail.com

Ingeniero Aeronáutico
 Docente e investigador – Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia
 Rol del investigador: teórico y escritura
 Grupo de investigación en diseño, análisis y desarrollo de sistemas de ingeniería - GIDAD
 Aeronautical Engineer
 Professor and researcher – Los Libertadores University Foundation, Colombia
 Researcher's role: theoretical and writing
 Research Group in Design, Analysis and Development of Engineering Systems - GIDAD
 Engenharia Aeronáutica
 Professor e investigador – Fundação Universitária Los Libertadores, Colômbia
 Função do investigador: teórico e escritor
 Grupo de Investigação em Concepção, Análise e Desenvolvimento de Sistemas de Engenharia - GIDAD

Cómo citar este artículo: Traslaviña Navarrete, D. S., Rosales Cabezas, A. M., Madrid Farfán, S. N., Rodríguez Barón, I. F., Lozano Tafur, C., y Bejarano Sepúlveda, E. J. (2024). Estudio de la contaminación auditiva producida por las aeronaves sobre la ciudad de Bogotá, utilizando el sistema ADS-B. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 19-29. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderareero.820>



Estudio de la contaminación auditiva producida por las aeronaves sobre la ciudad de Bogotá, utilizando el sistema ADS-B

Study of the noise pollution produced by aircrafts over the city of Bogota, using the ADS-B system

Estudo da poluição sonora produzida por aeronaves sobre a cidade de Bogotá, utilizando o sistema ADS-B

Resumen: La pandemia de la COVID-19 tuvo un impacto negativo en la industria de la aviación comercial, con una notable reducción del tráfico aéreo. Se proyectó que, hacia finales de 2023, el tráfico aéreo experimentaría un incremento anual del 4,4%, lo cual llevó a un aumento en la contaminación sonora, implicando riesgos para la salud humana. En Colombia, la Aeronáutica Civil regula los niveles de ruido de las aeronaves y establece normativas para su reducción. Utilizando tecnología avanzada, se recolectaron datos sobre el tráfico aéreo en Bogotá mediante una antena ADS-B. El logro más significativo del estudio fue la identificación precisa de las zonas de mayor riesgo de contaminación sonora, con base en datos ya existentes: Suba, Engativá, Usaquén, Fontibón, Teusaquillo, Puente Aranda, Kennedy, Bosa y Barrios Unidos, debido a su proximidad a las rutas aéreas y al Aeropuerto Internacional El Dorado, información que permitió crear mapas de calor fundamentales para planificar estrategias de mitigación adecuadas. Se concluye principalmente que la expansión acelerada del tráfico aéreo incrementará notablemente los niveles de ruido, afectando las áreas cercanas al aeropuerto. Se recomienda revisar y ajustar las regulaciones y políticas de tráfico aéreo para minimizar el impacto en el futuro.

Palabras clave: ADS-B; contaminación sonora; mapas de calor; salud pública; tráfico aéreo.

Abstract: The COVID-19 pandemic had a negative impact on the commercial aviation industry, with a notable reduction in air traffic. It was projected that, by the end of 2023, air traffic would experience an annual increase of 4.4%, leading to an increase in noise pollution, posing risks to human health. In Colombia, the Civil Aviation Authority regulates aircraft noise levels and establishes standards for their reduction. Using advanced technology, data on air traffic in Bogotá were collected through an ADS-B antenna. The most significant achievement of the study was the precise identification of the areas at highest risk of noise pollution, based on existing data: Suba, Engativá, Usaquén, Fontibón, Teusaquillo, Puente Aranda, Kennedy, Bosa, and Barrios Unidos, due to their proximity to flight paths and El Dorado International Airport. This information allowed for the creation of heat maps that are essential for planning appropriate mitigation strategies. It is mainly concluded that the accelerated expansion of air traffic will significantly increase noise levels, affecting areas near the airport. It is recommended to review and adjust air traffic regulations and policies to minimize future impact.

Keywords: ADS-B; noise pollution; heat maps; public health; air traffic.

Resumo: A pandemia de COVID-19 teve um impacto negativo na indústria da aviação comercial, com uma redução notável no tráfego aéreo. Foi projetado que, até o final de 2023, o tráfego aéreo experimentaria um aumento anual de 4,4%, levando a um aumento na poluição sonora, implicando riscos para a saúde humana. Na Colômbia, a Aeronáutica Civil regula os níveis de ruído das aeronaves e estabelece normas para sua redução. Utilizando tecnologia avançada, foram coletados dados sobre o tráfego aéreo em Bogotá através de uma antena ADS-B. A conquista mais significativa do estudo foi a identificação precisa das áreas de maior risco de poluição sonora, com base em dados existentes: Suba, Engativá, Usaquén, Fontibón, Teusaquillo, Puente Aranda, Kennedy, Bosa e Barrios Unidos, devido à sua proximidade com as rotas aéreas e o Aeroporto Internacional El Dorado. Esta informação permitiu a criação de mapas de calor fundamentais para planejar estratégias de mitigação adequadas. Conclui-se principalmente que a expansão acelerada do tráfego aéreo aumentará significativamente os níveis de ruído, afetando as áreas próximas ao aeroporto. Recomenda-se revisar e ajustar as regulamentações e políticas de tráfego aéreo para minimizar o impacto no futuro.

Palavras-chave: ADS-B; poluição sonora; mapas de calor; saúde pública; tráfego aéreo.

Introducción

De acuerdo con Deloitte, se espera que para el 2023 el tráfico aéreo vuelva a los niveles prepandemia y que, a partir de ahí, aumente el tráfico mundial de aeronaves en 4,4% anual (Mohan y O'Neil, 2022; Flores *et al.*, 2019). Esto lleva a que las aerolíneas tengan que aumentar el número de vuelos y, con esto, el número de aeronaves a utilizar. El aumento en el tráfico aéreo trae consigo diferentes problemas para la salud y la calidad de vida de las personas que viven en zonas cercanas a las terminales aéreas y rutas de navegación aérea. Entre las complicaciones más significativas para la salud humana relacionadas directamente con el ruido se destacan la pérdida de audición, el mal humor y la perturbación del sueño.

A su vez, se han encontrado problemas indirectos relacionados fuertemente con el ruido, tales como problemas cardiovasculares, discapacidad cognitiva en niños, resultados adversos en nacimientos, desordenes metabólicos y problemas de salud mental (Ang y Cui, 2022). El nivel de ruido en zonas aledañas a los aeropuertos puede llegar hasta los 87 dB dentro de una edificación, valor que está muy por encima del límite de 45 dB, a partir del cual se empiezan a ver efectos negativos para la salud de las personas (Chen *et al.*, 1997; Nassur *et al.*, 2019; Norén-Cosgriff *et al.*, 2022; Urbano *et al.*, 2018).

Dos de los efectos negativos más estudiados debido al ruido de aeronaves es la pérdida auditiva y la perturbación del sueño. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), esta última genera irritabilidad y bajo rendimiento laboral. La alteración del sueño tiene una relación con los niveles altos de ruido cuando se presentan de forma discontinua, con el paso de las aeronaves, generando que sea más difícil alcanzar un sueño profundo y que las personas sean más propensas a despertarse varias veces a lo largo de la noche, debido a que el mal humor es un estado mental asociado con la perturbación de actividades, en este caso, el sueño (Ang y Cui, 2022; Nguyen *et al.*, 2023).

Diferentes estudios realizados en aeropuertos de China (Xie *et al.*, 2014) concluyeron que la pérdida

de audición es más significativa en aquellas personas que trabajan en la terminal aérea, lo que sugiere que entre más cercano se encuentre una persona de esta fuente de sonido, mayor será la pérdida auditiva. Sin embargo, estar alejados de un aeropuerto no asegura que el daño sea menor, ya que un estudio hecho en Taiwán (Chen *et al.*, 1997) reveló que los estudiantes de una escuela ubicada bajo una ruta de navegación aérea presentaron una gran disminución en la audición.

En el año 2020, las personas que empezaron a pasar la mayoría de su tiempo en casa debido a la pandemia de COVID-19 se percataron de la gran cantidad de ruido generado por el paso de aviones; esto se suma a un estudio realizado por Airbus, donde informa que actualmente hay 47 megaciudades en el mundo, cuyo 90% contiene aeropuertos con vuelos internacionales (Airbus, 2017; Ang y Cui, 2022). Lo anterior ha aumentado la preocupación de los organismos encargados de controlar la aviación civil a nivel mundial, por eso la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, 2008) en su Anexo 16 define los niveles de ruido permitidos por las aeronaves. A su vez, la Aeronáutica Civil (2016) establece estos niveles en el Anexo 36 del RAC (Reglamento Aeronáutico Colombiano). Asimismo, la OACI ha establecido el uso de unos mapas de contorno mediante el documento 9911, los cuales tienen como fin caracterizar el ruido generado por las aeronaves alrededor de los aeropuertos para conocer la magnitud y extensión del ruido en las zonas aledañas (Rhodes y Boeker, 2018). Y según el estudio realizado por Caballol *et al.* (2022), se estableció que las aeronaves son una fuente puntual de generación de ruido más significativa que cualquier otra fuente en áreas urbanas.

Debido a que el ruido cambia dependiendo de la aeronave, la fase de vuelo y la manipulación del piloto, también varía la magnitud del ruido y los efectos que produce en las personas. A raíz de todo esto, los organismos de control internacional han venido desarrollando diferentes metodologías y normas para la reducción del ruido generado por las aeronaves en los aeropuertos, así como la implementación de estrategias para la disminución del ruido en futuros aviones supersónicos (Gagliardi *et al.*, 2018). Existen dos formas comunes de medir el ruido generado por aeronaves: la primera

es por un evento individual, el cual describe el nivel de ruido de un solo avión; y la segunda, en la cual se miden los niveles de ruido en una localización en un determinado periodo de tiempo (Ang y Cui, 2022; European Civil Aviation Conference [ECAC], 2016).

Un sistema de Vigilancia Dependiente Automática de Radiodifusión (o ADS-B, por sus siglas en inglés) es un componente automatizado de la nueva generación de tecnologías de vigilancia y dirección del tráfico aéreo en el que no intervienen los pilotos ni los controladores aéreos, y funciona mediante el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) para el seguimiento del avión. El procedimiento de radiodifusión transmite con mayor precisión que los sistemas de radar primarios y secundarios los datos clave de la aeronave, como su identificación, origen, destino, posición, velocidad y rumbo, a la estación o antena en tierra. Su aplicación se centra en mejorar la seguridad, eficiencia y capacidad de gestión del tráfico aéreo en una región determinada (Manesh y Kaabouch, 2017).

Este proyecto se centró en la recopilación, el tratamiento y el análisis de datos provenientes de una antena ADS-B con el fin de visualizar una representación mediante un mapa de calor de las áreas que presentan una mayor concentración de ruido, ocasionada por la frecuencia de vuelo y el tipo de aeronave que transita por ese espacio aéreo. También, se busca identificar las trayectorias de vuelo del Aeropuerto Internacional El Dorado y las rutas aéreas que atraviesan la ciudad de Bogotá, a fin de determinar cuáles son las localidades de alto riesgo para la salud humana debido a un análisis del ruido acumulado por el tránsito aéreo basado en datos previamente recopilados.

Metodología

Este trabajo se basa en la metodología iterativa CRISP-DM, cuyo principal uso está en los proyectos dedicados a extraer valores de datos con un enfoque estructurado que garantiza que el proyecto cumpla sus objetivos, lo que hace de esta metodología una estrategia flexible y adaptable a muchos tipos de proyectos de análisis de

datos (IBM, 17 de agosto de 2021; Mindomo, s. f.; Vallalta, s. f.). Para utilizar adecuadamente esta metodología, es necesario cumplir con una serie de etapas. En primer lugar, se identificó y se comprendió el problema para entender su alcance y definir los objetivos. Asimismo, se analizó el estado actual del problema y los requerimientos para evaluarlo, con el fin de planificar los procedimientos para llevar a cabo la recolección de datos.

En la segunda etapa, se realizó la revisión, el análisis y el estudio de los datos, los cuales fueron recepcionados por medio de la antena ADS-B y recolectados por el programa “Airplane Tracking Using ADS-B Signals” del *software* MATLAB, el cual además de recolectarlos los tabulaba en un archivo de texto. Fueron recolectados un total de 9 360 793 datos, durante una semana de lunes a viernes, en un horario de 2:00 a 6:00 p.m. En la tercera fase, estos fueron clasificados y ajustados para ser manipulados con mayor facilidad y poder obtener las rutas de aproximación y salida de las aeronaves al Aeropuerto Internacional El Dorado, y se registraron aeronaves que únicamente sobrevuelan la ciudad. De los datos recolectados fueron descartados 9 287 702, dejando únicamente 73 091 datos útiles, ya que aquellos que fueron descartados eran datos vacíos o corruptos.

Después, se llevó a cabo el modelado de los datos utilizando Python, mediante las bibliotecas Geopandas, Matplotlib y Folium. Estas herramientas permitieron la creación de un mapa de Bogotá, destacando las rutas aéreas que atraviesan su área metropolitana y los municipios cercanos, con lo que se generó un mapa de calor que visualiza gráficamente la densidad y el nivel de utilización de dichas rutas. En adición, se implementó un análisis para la representación del ruido sobre Bogotá mediante la utilización de la librería Folium y dos bases de datos fundamentales. La primera es la ANP Legacy Data de la European Union Aviation Safety Agency (EASA, 15 de agosto de 2023), de donde se tomaron los datos de ruido; estos fueron recopilados por Eurocontrol y la Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés) antes de la entrada en vigor del Reglamento de la Unión Europea número 598/2014. La segunda base de datos fue la

Aircraft Database de OpenSky Network, que recopila la información de identificación de cada aeronave.

Las bases de datos utilizadas permitieron correlacionar el código ICAO de las aeronaves con una amplia gama de detalles sobre cada aeronave; es decir, información como el tipo de aeronave (avión comercial, avión privado, helicóptero, etc.), su modelo específico y la matrícula de la aeronave (un identificador único asignado a cada aeronave). También, se incluyó lo más importante en este análisis: el tipo de motor instalado en cada aeronave, con su respectiva medición de ruido realizada por Eurocontrol y la FAA hasta el 2014 durante tres fases distintas del vuelo: lateral (cuando la aeronave está en una posición lateral respecto a un punto de referencia), en sobrevuelo (cuando la aeronave está pasando directamente sobre un punto de referencia) y en aproximación (cuando la aeronave se está preparando para aterrizar).

El resultado de este análisis fue la creación de un *heatmap* o mapa de calor. Este mapa proporciona una representación visual de la acumulación de ruido sobre Bogotá mediante las bases de datos, mostrando áreas donde el ruido generado por las aeronaves es más intenso o más frecuente. Esta información es vital para representar el impacto del tráfico aéreo en el entorno urbano y para desarrollar estrategias efectivas de gestión del ruido a fin de mitigar sus efectos en la calidad de vida de los residentes de la ciudad.

Resultados

En la Figura 1, se puede observar el mapa resultante de las rutas aéreas identificadas sobre Bogotá y sus municipios cercanos, información proporcionada por el sistema ADS-B. En este mapa, se observan con claridad las rutas de navegación aérea tomadas por las aeronaves a la llegada y salida del Aeropuerto Internacional El Dorado. De la misma forma, es posible observar diferentes líneas que atraviesan el área metropolitana, dichas líneas representan rutas de navegación aérea que se encuentran sobre Bogotá. En este mapa, es posible también visualizar cuáles son los municipios que se

encuentran bajo rutas de navegación, entre ellos: Soacha, La Calera, Cota, Chía, Cajicá, Zipaquirá, Tenjo, Tabio, Funza y Madrid. Con esto, se representa que, junto a gran parte de Bogotá, estos sean los sectores con una gran acumulación de ruido por el vuelo constante de aeronaves, así como una posible afectación en caso de aumentar las frecuencias de vuelos por parte del Aeropuerto Internacional El Dorado.

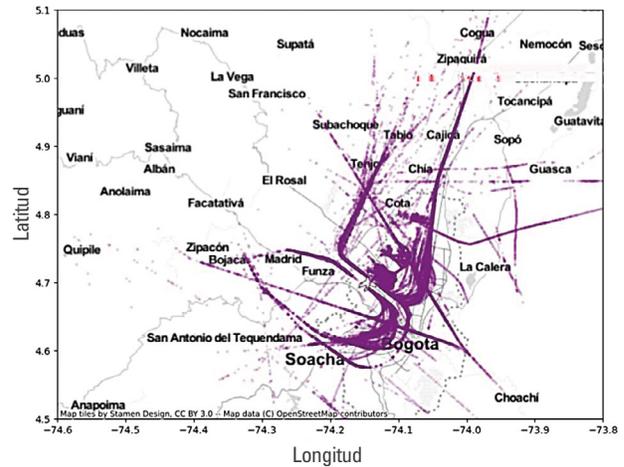


Figura 1. Trayectorias de vuelos en Bogotá y municipios cercanos
Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

Por medio de *heatmaps*, se puede visualizar cómo se distribuye la acumulación registrada de ruido en el espacio aéreo de Bogotá y sus alrededores. La Tabla 1 proporciona una referencia de los colores utilizados en el *heatmap* de la Figura 2 y la Figura 3, cada uno asociado con un nivel específico de ruido medido en decibeles (dB).

Tabla 1.
Color vs. Ruido en Rutas

Color	Ruido (dB)
Morado	De 0 a 10
Azul	De 11 a 20
Verde	De 21 a 40
Amarillo	De 41 a 60
Naranja	De 61 a 80
Rojo	Más de 81

Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

En las Figuras 2 y 3, se observan en general las zonas que presentan una acumulación alta del tráfico aéreo y se distinguen porque presentan colores entre naranja y rojo; entre ellas están las localidades de Suba, Fontibón, Engativá, Barrios Unidos y Teusaquillo, y municipios cercanos como Soacha, Funza, Madrid, Chía, Cajicá y Zipaquirá. Fue posible identificar zonas con una acumulación moderada, representadas por los colores verde y amarillo; y por último las zonas con bajo o nulo tráfico aéreo están representadas por tonalidades azul y morada, respectivamente. Con este *heatmap*, se puede observar cómo las zonas mencionadas, con una posible ampliación de los aeropuertos de Bogotá, presentan una mayor acumulación de ruido, generando que muchas de las zonas pasen a una tonalidad roja con un nivel de ruido registrado de más de 81 dB.

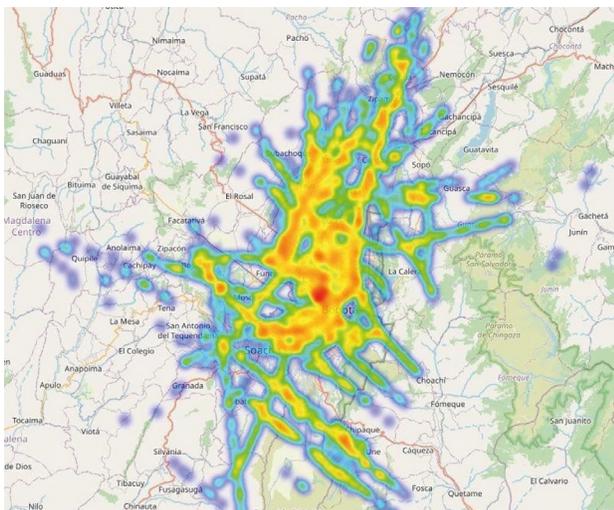


Figura 2. *Heatmap* de los vuelos en Bogotá y sus municipios cercanos
Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

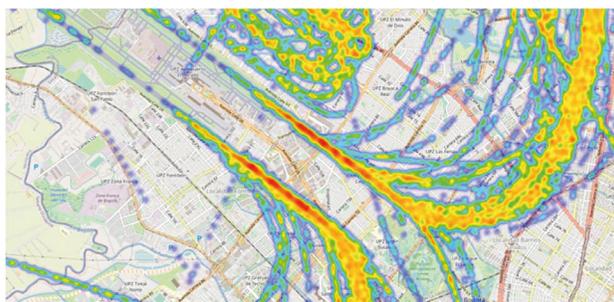


Figura 3. *Heatmap* de los vuelos en las zonas aledañas al Aeropuerto Internacional El Dorado
Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

A través del análisis de datos, se detectaron 35 tipos o modelos distintos de aeronaves que vuelan regularmente sobre la ciudad de Bogotá, abarcando aviones de servicio comercial, privado, militar y gubernamental. Dentro de este grupo, se resaltaron dieciséis modelos que constituyeron el 91 % del conjunto de aeronaves que cruzaron el espacio aéreo de la ciudad, totalizando 260 aeronaves de dichos modelos específicos, como se evidencia en la Figura 4. En conjunto, se logró identificar un total de 283 aeronaves transitando sobre Bogotá, entre las cuales las aeronaves Airbus A320 en sus diferentes series representan el 36,04 % del tráfico aéreo, con un total de 102 aviones, seguidas por los Boeing 737 y 787 con el 22,7 %.

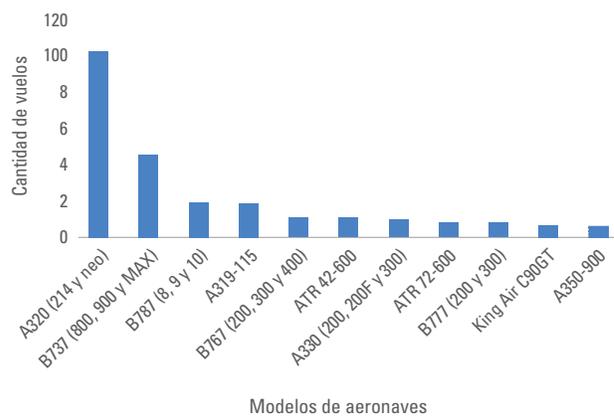


Figura 4. Número de aviones según modelo
Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

Durante el análisis de datos, y tras la comparación del modelo de aviones con las bases de datos utilizadas, se notó la falta de información sobre las características de emisiones sonoras de ciertos aviones de uso militar, como el Lockheed C-5 Galaxy y el Lockheed C-130 Hércules. Debido a esta ausencia de datos, se excluyeron dichas aeronaves del presente estudio.

En la Figura 5, se puede apreciar claramente que los aviones clasificados como comerciales de fuselaje ancho, como el Boeing 747 y el Airbus A330, muestran los niveles más altos de ruido en las fases analizadas, superando consistentemente los 90 dB. Esto permite determinar rangos de ruido que varían de 68,3 a 100 dB durante las maniobras de vuelo lateral, utilizando

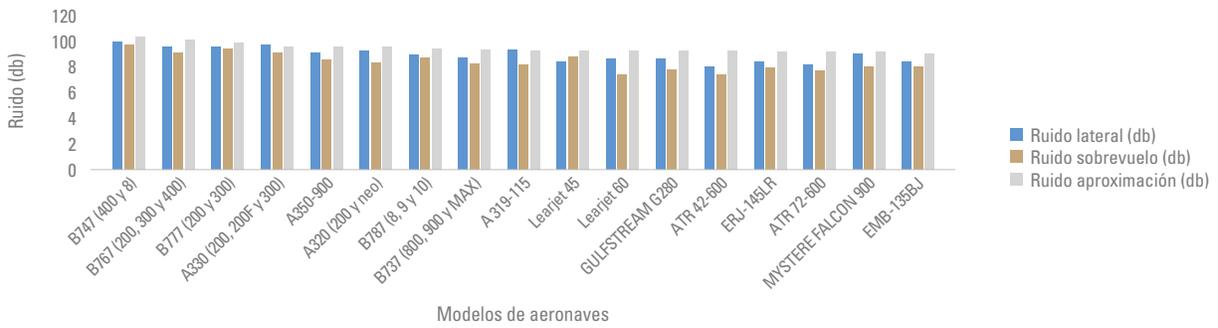


Figura 5. Ruido en dB vs. tipo de aeronave

Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

datos ya existentes; de 68,3 a 98 dB en las fases de sobrevuelo, y alcanzan un máximo de 101,83 dB durante la aproximación al aeropuerto. También, se determinó que los aviones que generan menos ruido son el King Air E90, el C90GT y el Piper PA-28, utilizando datos ya existentes; sin embargo, estos representan solo el 3% del tráfico aéreo total que sobrevoló la ciudad de Bogotá.

En las Figuras 6, 7 y 8, se representa gráficamente y de una manera más cercana la acumulación de ruido en la ciudad. La Tabla 2 proporciona una referencia de los colores utilizados en los *heatmaps* de la Figura 6 a la Figura 8.

Tabla 2. Color correspondiente a cada nivel de ruido.

Color	Ruido (dB)
Azul	De 0 a 40
Morado	De 41 a 60
Naranja	De 61 a 80
Rojo	Más de 81

Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

La Figura 6 revela que gran parte de la zona norte de la ciudad presenta niveles de ruido percibido que superan los 81 dB, lo cual era previsible debido a que muchas de las salidas del Aeropuerto Internacional El Dorado pasan por este lugar. Además, el Aeropuerto de Guaymaral, ubicado en esta zona, también afecta a las localidades de Usaquén, Engativá y Suba.



Figura 6. *Heatmap* de ruido al norte de Bogotá

Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

En la Figura 7, se puede apreciar en el indicador la presencia del Aeropuerto Internacional El Dorado y la concentración de niveles de ruido en las áreas cercanas a este, abarcando las localidades de Engativá, Fontibón, Barrios Unidos y Teusaquillo. La mayoría de estas áreas, destacadas en color rojo, señalan un nivel elevado de ruido generado por aeronaves, corroborando los hallazgos de un estudio llevado a cabo hace seis años por la Aeronáutica Civil (2018).

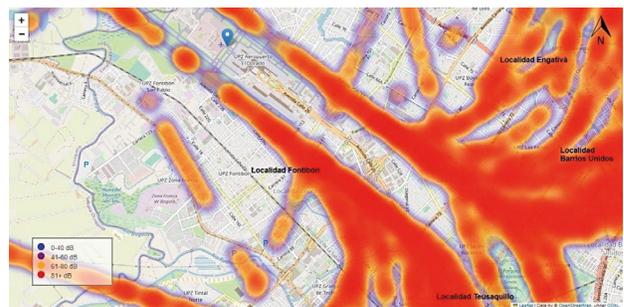


Figura 7. *Heatmap* de ruido en cercanías al aeropuerto

Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

En la Figura 8, se muestra la región situada al sur del aeropuerto, que abarca otra área utilizada para las salidas de vuelos y a veces para aproximaciones y llegadas debido a condiciones climáticas o de vientos. Esto provoca una importante presencia de aeronaves y con ello un alto registro de generación de ruido, con base en los datos de ruido de las aeronaves ya existentes. Como resultado, se evidencia que la mayoría de estas áreas se identifican en la representación visual mediante el color rojo. Dichas localidades incluyen Fontibón, Puente Aranda, Kennedy y Bosa.

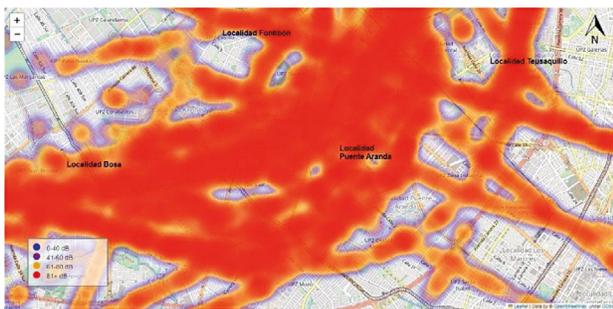


Figura 8. Heatmap de ruido al sur de Bogotá
Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

Discusión y/o análisis

Con el primer mapa obtenido al graficar las rutas aéreas sobre Bogotá y los municipios cercanos, se pudo evidenciar cuáles zonas son las más afectadas por el tráfico aéreo. En el interior de Bogotá, se identificaron las localidades de Bosa, Barrios Unidos, Fontibón, Engativá, Usaquén y Suba como áreas con mayor afectación por el flujo constante de vuelos. Estas áreas urbanas, densamente pobladas, experimentan niveles significativos de ruido que suelen sobrepasar los 81 dB.

En cuanto a los municipios cercanos a la ciudad, se destacan Zipaquirá, Cajicá, Chía, Cota, Soacha, Madrid, Funza, Tenjo y Tabio como áreas donde se observa que el tráfico aéreo tiene un impacto considerable (basado en los datos ya existentes) entre 40 y 80 dB; y en algunas zonas incluso sobrepasa esos valores. Estos municipios, aunque ubicados a las afueras de Bogotá, también experimentaron una afluencia significativa

de vuelos debido a su proximidad al aeropuerto principal o a las rutas de vuelo. La presencia constante de aeronaves puede influir en la calidad de vida de los residentes, así como en la infraestructura y el desarrollo urbano de estas áreas.

Al igual que en las anteriores áreas con un análisis previo de potencial afectación por ruido, se observa que localidades como Chapinero, La Candelaria, Santa Fe, Ciudad Bolívar, Tunjuelito, Rafael Uribe Uribe, Usme, Sumapaz, San Cristóbal y Antonio Nariño presentan una afectación baja en términos de ruido (de 0 a 40 dB) proveniente de actividades aéreas. Esto se debe a que en estas zonas la frecuencia y la distancia con las rutas aéreas comúnmente usadas son reducidas, lo cual disminuye la posibilidad de acumulación de ruido y su potencial impacto en la calidad de vida de los residentes.

Estos mapas, que muestran exclusivamente las rutas aéreas, son herramientas valiosas para la planificación urbana y la gestión de aeropuertos, ya que permiten identificar nuevas alternativas para las rutas aéreas, así como evaluar el impacto potencial del ruido generado por el tráfico aéreo en áreas urbanas y cercanas a la ciudad. En el caso específico de Bogotá, el uso de estos mapas puede contribuir a la mitigación del impacto sonoro, facilitando la toma de decisiones en cuanto a la ubicación de infraestructuras y el diseño de políticas y normativas de transporte aéreo más sostenibles, en beneficio de todos los actores involucrados. La veracidad de este estudio se respalda con los hallazgos de las Figuras 4 a 8, ya que corroboran los hallazgos llevados a cabo por la Aeronáutica Civil (2018).

Utilizando el tipo de avión y sus motores para generar un mapa de calor, se pudo representar el nivel de ruido producido por cada aeronave identificada. Esta información fue fundamental para identificar las localidades de Bogotá con una posible acumulación de ruido moderada a alta, con base en los datos que indicaban niveles de 60 a más de 81 dB, lo que a su vez ofrece una base sólida para la formulación de estrategias de gestión del ruido y planificación urbana.

Con base en estos análisis, se formula una serie de recomendaciones para abordar este desafío de manera efectiva. En primer lugar, se propone la creación o actualización de nuevas cartas SID (Standard

Instrument Departure) y STAR (Standard Terminal Arrival Route), las cuales constituyen el marco para la planificación y ejecución de las rutas de salida y aproximación de las aeronaves al Aeropuerto Internacional El Dorado. Estas nuevas cartas deben estar diseñadas para incluir una amplia gama de *waypoints* o puntos de sobrevuelo estratégicamente ubicados a lo largo de las rutas, con el fin de diversificar y dispersar el flujo de tráfico aéreo para que no se concentre una sola zona, pues aumentaría el ruido. Esta medida no solo ayudaría a evitar la concentración del ruido sobre áreas residenciales y comunidades sensibles, sino que también optimizaría la eficiencia operativa del espacio aéreo.

Además, se anima a las empresas y aerolíneas a comprometerse con un programa continuo de renovación de su flota de aeronaves, ya que la adquisición de aeronaves más modernas y eficientes en términos de consumo de combustible y emisiones sonoras no solo mejoraría la calidad del servicio y la seguridad operativa, sino que a su vez reduciría significativamente el impacto acústico en el entorno. La inversión en tecnologías de vanguardia, como motores más silenciosos y sistemas de gestión de ruido avanzados, puede marcar una gran diferencia en la mitigación del ruido generado por las operaciones aéreas.

Es esencial promover la cooperación entre las partes interesadas, incluidas las autoridades de la aviación, las comunidades locales y las empresas del sector aeronáutico a través del diálogo y la colaboración, a fin de identificar soluciones innovadoras y adaptadas a las necesidades específicas de Bogotá. Esto podría incluir medidas como la implementación de procedimientos de vuelo más silenciosos, el desarrollo de políticas de uso del suelo que mitiguen la exposición al ruido y la inversión en tecnologías de control de ruido en la infraestructura del Aeropuerto Internacional El Dorado.

Conclusiones

El uso de mapas de calor o *heatmaps* en este estudio proporciona una visualización detallada de las áreas

dentro del área metropolitana de Bogotá y sus alrededores que están experimentando una concentración considerable de tráfico aéreo y, como consecuencia, una acumulación de ruido. Esta herramienta gráfica ofrece una representación clara y precisa, donde el tono rojo en el mapa indica las zonas con una densidad de tráfico aéreo más alta y un nivel de ruido alto, que puede ir de los 40 a los 80 dB e incluso sobrepasar este valor en determinadas zonas. Tales sectores cuentan con un alto riesgo de aumento en los valores de contaminación sonora, ya que podrían enfrentar una mayor influencia en caso de una futura expansión del Aeropuerto Internacional El Dorado o de un aumento en el tráfico aéreo.

La identificación de estas áreas críticas mediante mapas de calor facilita la comprensión visual de los problemas de congestión aérea y de ruido, lo que a su vez permite una toma de decisiones más informada y eficiente en términos de modificaciones o ajustes en las rutas aéreas para mitigar el impacto negativo sobre las comunidades que se observa que son afectadas.

Así mismo, se ha llevado a cabo una evaluación minuciosa y exhaustiva del potencial del ruido de las aeronaves en las diferentes localidades de la ciudad, utilizando proyecciones de las rutas de vuelo de los aviones que operan en el Aeropuerto Internacional El Dorado o que sobrevuelan la región metropolitana o aledaña de Bogotá. Esta evaluación ha revelado que localidades como Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá, Usaquén y Suba, así como los municipios cercanos de Cota, Chía, Cajicá, Zipaquirá, Tenjo y Soacha, podrían enfrentar un mayor riesgo de exposición al ruido de las aeronaves. Por otro lado, sectores como Puente Aranda, Teusaquillo y Barrios Unidos experimentan un impacto sonoro menor, que va desde los 0 hasta los 40 dB, un nivel aceptable de ruido y que no pone en riesgo la salud de la población cercana. Estas conclusiones se ven respaldadas por los mapas de calor que indican la acumulación de ruido con sus respectivos valores en dB, lo cual confirma que las zonas más afectadas están ubicadas en cercanía al aeropuerto y/o a las rutas aéreas previamente identificadas y graficadas.

Este tipo de análisis no solo permite la identificación temprana y precisa de áreas con un potencial

acumulativo elevado de ruido, sino que también facilita que las entidades regulatorias, en este caso la Aeronáutica Civil, así como los planificadores urbanos y las autoridades aeroportuarias (OPAIN S.A.), anticipen y desarrollen planes de contingencia y mitigación con un impacto económico reducido. Además, el uso de estas herramientas y metodologías avanzadas de análisis y visualización de datos facilita la planificación y gestión efectiva del tráfico aéreo, lo cual ayuda a abordar los desafíos actuales de la industria aeronáutica en términos de contaminación acústica.

La disponibilidad de este tipo de análisis también es fundamental para la planificación y el desarrollo de nuevas ciudades, la expansión del aeropuerto ya existente o la creación de nuevas infraestructuras, y para la identificación temprana de personas en riesgo de sufrir los efectos del ruido de las aeronaves, lo cual a su vez puede ayudar en la prevención de posibles enfermedades asociadas.

Referencias

- Aeronáutica Civil. (2016). *RAC 36. Estándares de ruido* [en línea]. <https://tinyurl.com/mrsmmzms>
- Aeronáutica Civil. (2018). *Metodología general. Modelo de propagación de ruido* [en línea]. <https://tinyurl.com/45cjsxmvz>
- Airbus, S. (2017). *Global Market Forecast 2017-2036* [en línea]. <https://tinyurl.com/2vtxr5s5>
- Ang, L. Y. L. y Cui, F. (2022). Remote Work: Aircraft Noise Implications, Prediction, and Management in the Built Environment. *Applied Acoustics*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108978>
- Caballol, D., Raposo, Á. P., Gil-Carrillo, F. y Morales-Segura, M. (2022). Measurement of Ambient Vibration in Empty Buildings and Relation to External Noise. *Applied Acoustics*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108431>
- Chen, T.-J., Chen, S.-S., Hsieh, P.-Y. y Chiang, H.-C. (1997). Auditory Effects of Aircraft Noise on People Living Near an Airport. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 52(1), 45-50. <https://doi.org/10.1080/00039899709603799>
- European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2023, agosto 15). *ANP Legacy Data* [en línea]. <https://tinyurl.com/2asyfx77>
- European Civil Aviation Conference (ECAC). (2016). *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports* (4.ª ed.). [en línea]. <https://tinyurl.com/bdhsbvts>
- Flores, R., Asensio, C., Gagliardi, P. y Licitra, G. (2019). Study of the Correction Factors for Aircraft Noise Façade Measurements. *Applied Acoustics*, 145, 399-407. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.10.007>
- Gagliardi, P., Teti, L. y Licitra, G. (2018). A Statistical Evaluation on Flight Operational Characteristics Affecting Aircraft Noise During Take-Off. *Applied Acoustics*, 134, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.12.024>
- IBM. (2021, agosto 17). *Conceptos básicos de ayuda de CRISP-DM* [en línea]. <https://tinyurl.com/mr26n4u4>
- Manesh, M. R. y Kaabouch, N. (2017). Analysis of Vulnerabilities, Attacks, Countermeasures and Overall Risk of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) System. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 19, 16-31. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2017.10.002>
- Mindomo. (s. f.). *CRISP-DM: La metodología para poner orden en los proyectos* [en línea]. <https://tinyurl.com/4xezkt7n>
- Mohan, S. y O'Neil, K. (2022). *2023 Aerospace and Defense Industry Outlook*. Deloitte [en línea]. <https://tinyurl.com/5n8ueppm>
- Nassur, A.-M., Léger, D., Lefèvre, M., Elbaz, M., Mietlicki, F., Nguyen, P., Ribeiro, C., Sineau, M., Laumon, B. y Evrard, A.-S. (2019). The Impact of Aircraft Noise Exposure on Objective Parameters of Sleep Quality: Results of the DEBATS Study in France. *Sleep Medicine*, 54, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2018.10.013>
- Nguyen, D. D., Whitsel, E. A., Wellenius, G. A., Levy, J. I., Leibler, J. H., Grady, S. T., Stewart, J. D., Fox, M. P., Collins, J. M., Eliot, M. N., Malwitz, A., Manson, J. E. y Peters, J. L. (2023). Long-Term Aircraft Noise Exposure and Risk of Hypertension in Postmenopausal Women. *Environmental Research*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115037>
- Norén-Cosgriff, K., Belyaev, I. y Løvholt, F. (2022). Building Vibration Induced by Sonic Boom-Field Test in Russia. *Applied Acoustics*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108422>
- Rhodes, D. y Boeker, E. R. (s. f.). *Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports — Recent Updates to ICAO Doc 9911* [en línea]. <https://tinyurl.com/fpymk3a8>

- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). (2008). *Protección del medio ambiente* (5.ª ed.) [en línea]. <https://tinyurl.com/36dyv5wm>
- Urbano, S., Chaumette, E., Goupil, P. y Tourneret, J.-Y. (2018). Aircraft Vibration Detection and Diagnosis for Predictive Maintenance using a GLR Test. *IFAC-PapersOnLine*, 51(24), 1030-1036. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.716>
- Vallalta-Rueda, J. F. (s. f.). *CRISP-DM: una metodología para minería de datos en salud* [en línea]. <https://tinyurl.com/zp45scbk>
- Xie, H., Li, H. y Kang, J. (2014). The Characteristics and Control Strategies of Aircraft Noise in China. *Applied Acoustics*, 84, 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.01.011>