



PREDICCIÓN DEL IMPACTO DE LAS EMISIONES DE CO₂ DE AERONAVES EN LA CALIDAD DEL AIRE DE BOGOTÁ MEDIANTE ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING Y TECNOLOGÍA ADS-B

PREDICTION OF THE IMPACT OF AIRCRAFT CO₂ EMISSIONS ON THE AIR QUALITY OF BOGOTÁ USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS AND ADS-B TECHNOLOGY

Cristian Lozano Tafur ¹

Fundación Universitaria Los Libertadores, FULL

Juan Carlos Daza Rincón ²

Fundación Universitaria Los Libertadores, FULL

Jaime Enrique Orduy Rodríguez ³

Escuela de Aviación del Ejército, ESAVE

Iván Felipe Barón Rodríguez ⁴

Escuela de Aviación del Ejército, ESAVE

RESUMEN

El crecimiento de la industria de la aviación ha provocado un aumento significativo de las emisiones de dióxido de carbono. En Colombia, por ejemplo, el número de pasajeros aumentó un 57,2% en 2022. Lo que conlleva a un crecimiento en las emisiones contaminantes producidas por las aeronaves. Para abordar este problema ambiental, se implementó el sistema ADS-B en las aeronaves que operan en Bogotá. Este sistema permite recopilar datos sobre el rendimiento de las aeronaves, como la altitud, la posición, la velocidad y la dirección. Estos datos se utilizan para calcular el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, que son obtenidas por medio de la unión de los datos obtenidos por el sistema ADS-B de las aeronaves y la base de datos de rendimiento de aeronaves BADA. Las emisiones de CO₂ se visualizaron geográficamente en un mapa de la ciudad. Esto permitió identificar las zonas más afectadas por el aumento de las emisiones. Implementando algoritmos de machine learning como random forest es posible realizar una estimación de los niveles de CO₂ en la ciudad. Con esta información, se pueden desarrollar estrategias de mitigación adaptadas a cada área. Los resultados de este estudio se compararon con el índice de calidad del aire de Bogotá (IBOCA) el cual nos presenta la calidad del aire en la ciudad en tiempo real. El modelo de emisiones mostró una correlación con las mediciones del IBOCA en toda la ciudad, permitiendo así por medio de tecnologías como el ADS-B evaluar las emisiones de las aeronaves ayudando a detectar posibles riesgos medioambientales.

PALABRAS CLAVE: Contaminación atmosférica; aeronave; cambio climático; inteligencia artificial; procesamiento de datos.

¹ Cristian Lozano Tafur Docente Ingeniería Aeronáutica - Fundación Universitaria Los Libertadores, FULL, Colombia - clozanot@libertadores.edu.co

² Juan Carlos Daza Rincón Estudiante de Ingeniería Aeronáutica - Fundación Universitaria Los Libertadores, FULL, Colombia - jcdazar01@libertadores.edu.co

³ Jaime Enrique Orduy Rodríguez Docente Ingeniería Aeronáutica - Escuela de Aviación del Ejército, ESAVE, Colombia - jaimeorduyrodriguez@cedoc.edu.co

⁴ Iván Felipe Barón Rodríguez Docente Ingeniería Aeronáutica - Escuela de Aviación del Ejército, ESAVE, Colombia - ivanrodriguezbaron@cedoc.edu.co

ABSTRACT

The growth of the aviation industry has led to a significant increase in carbon dioxide emissions. In Colombia, for example, the number of passengers increased by 57.2% in 2022. This has led to an increase in emissions from aircraft. To address this environmental issue, the ADS-B system was implemented on aircraft operating in Bogotá. This system allows for the collection of data on aircraft performance, such as altitude, position, speed, and direction. These data are used to calculate fuel consumption and CO₂ emissions, which are obtained by combining the data obtained from the ADS-B system of the aircraft and the BADA aircraft performance database. CO₂ emissions were mapped geographically on a city map. This allowed for the identification of the areas most affected by the increase in emissions. By implementing machine learning algorithms such as random forest, it is possible to estimate CO₂ levels in the city. With this information, mitigation strategies can be developed that are tailored to each area. The results of this study were compared to the Bogotá Air Quality Index (IBOCA), which provides real-time air quality information for the city. The emissions model showed a correlation with IBOCA measurements throughout the city, thus enabling the evaluation of aircraft emissions through technologies such as ADS-B, helping to detect potential environmental risks.

KEYWORDS: Air Pollution; Aircraft, Climate Change; Artificial Intelligence; Data processing.

RESUMO

O crescimento da indústria de aviação resultou em um aumento significativo nas emissões de dióxido de carbono. Na Colômbia, por exemplo, o número de passageiros aumentou 57,2% em 2022. Isso levou a um aumento nas emissões poluentes produzidas por aeronaves. Para lidar com esse problema ambiental, o sistema ADS-B foi implementado em aeronaves que operam em Bogotá. Esse sistema permite coletar dados sobre o desempenho das aeronaves, como altitude, posição, velocidade e direção. Esses dados são usados para calcular o consumo de combustível e as emissões de CO₂, que são obtidos combinando os dados obtidos pelo sistema ADS-B das aeronaves e o banco de dados de desempenho de aeronaves BADA. As emissões de CO₂ foram mapeadas geograficamente em um mapa da cidade. Isso permitiu identificar as áreas mais afetadas pelo aumento das emissões. Ao implementar algoritmos de aprendizado de máquina, como random forest, é possível estimar os níveis de CO₂ na cidade. Com essas informações, podem ser desenvolvidas estratégias de mitigação adaptadas a cada área. Os resultados desse estudo foram comparados ao índice de qualidade do ar de Bogotá (IBOCA), que nos apresenta a qualidade do ar na cidade em tempo real. O modelo de emissões mostrou uma correlação com as medições do IBOCA em toda a cidade, permitindo assim, por meio de tecnologias como o ADS-B, avaliar as emissões das aeronaves, ajudando a detectar possíveis riscos ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Poluição atmosférica, Aeronave, Mudanças climáticas, Inteligência artificial, Processamento de dados.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la globalización y la necesidad de transporte rápido han impulsado el avance y la expansión de la aviación a escala mundial, en Colombia hubo un aumento del 57,2% en el número de pasajeros transportados dentro del país en 2022 en comparación con el año anterior (Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil, 2023). Sin embargo, el crecimiento en las operaciones aéreas ha generado problemas medioambientales, especialmente en cuanto a la emisión de dióxido de carbono (CO₂). A nivel mundial la aviación ha crecido más de dos tercios en los últimos 15 años alcanzando cifras para el 2019 de unos

39 millones de vuelos, en este mismo periodo de tiempo el número de pasajeros aumento al doble y el tráfico de carga aérea aumento la mitad, para el 2019 las emisiones generadas por la aviación comercial representan alrededor del 2% de las emisiones antropogénicas mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) y alrededor del 12% de las emisiones del sector del transporte (Bauen et al., 2022).

El cambio climático requiere cooperación de todos los estados con el fin de reducir los impactos de los gases de invernadero en el clima global, es por esto que la

Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) como autoridad mundial, y los estados miembros han resuelto minimizar este impacto y garantizar el crecimiento sostenible de la aviación internacional, en cifras según la OACI la aviación aporta el 1.3% de las emisiones globales de CO₂ y está proyectado que esta cifra siga creciendo (Organización Aviación Civil Internacional, 2019). En 2010 durante la 37ª sesión de la asamblea de la OACI se adoptaron dos objetivos: Mejorar la eficiencia energética en un 2% anual hasta 2050 y lograr un crecimiento neutro en carbono a partir de 2020, se propone cumplir con esto por medio de la aplicación de un conjunto de medidas que incluye innovaciones tecnológicas, mejoras operativas, combustibles de aviación sostenibles y medidas basadas en el mercado (Organización Aviación Civil Internacional, 2019; Strouhal, 2020).

Finalmente, durante la 37ª sesión de la asamblea de la OACI celebrada en 2016 los estados adoptan un régimen mundial de medidas basadas en el mercado para la aviación civil internacional, es aquí donde se implementa el plan CORSIA o por sus siglas el Régimen de compensación y reducción de las emisiones de carbono de la aviación internacional, esto con el fin de abordar el aumento de las emisiones totales de CO₂ de la aviación internacional por encima de los niveles del 2020 (Organización Aviación Civil Internacional, 2019). CORSIA ofrece una forma armonizada de reducir las emisiones de la aviación internacional garantizando que no se produzcan distorsiones del mercado, respetando al mismo tiempo las circunstancias especiales y las capacidades respectivas de los Estados miembros de la OACI, este plan complementa las medidas adoptadas en 2010 y es donde se propone que la cantidad de emisiones de CO₂ que no pueden ser reducidas por medio de las medidas implementadas en 2010 sean compensadas por medio de CORSIA, ya que se calcula que entre 2021 y 2035, el sector de la aviación internacional tendría que compensar unos 2.500 millones de toneladas de emisiones de CO₂ para alcanzar un crecimiento neutro en carbono. (Organización Aviación Civil Internacional, 2019).

CORSIA será implementado por medio de 3 fases que van desde el 2021 hasta el 2035 donde la primera fase catalogada como la fase piloto desarrollada del 2021 al 2023 y la fase que va del 2024 al 2026 catalogada como la primera fase serán de participación voluntaria para los estados, a partir del 2027 la segunda fase tendrá inicio y estarán incluidos todos los estados que tengan una participación individual en las actividades de aviación internacional en el año 2018 que supere el 0,5% de la actividad total o cuya participación acumulada alcance el 90% de la actividad total (Organización de Aviación Civil Internacional, 2019).

Para tener éxito en la aplicación de CORSIA se depende del establecimiento de un sistema sólido y transparente de seguimiento, notificación y verificación o como lo define la OACI de sus siglas en inglés monitoring, reporting and verification (MRV) donde en esta se incluya procedimientos sobre cómo supervisar el uso del combustible, recopilar datos y calcular las emisiones de CO₂; notificar los datos de emisiones de CO₂ y verificar los datos de emisiones de CO₂ para evitar errores, con el fin de aportar las reglas para una correcta implementación del plan CORSI la OACI establece documentos como el Anexo 16 Volumen IV en el cual se encuentran establecidos periodos de cumplimiento, aplicabilidades, y normas básicas para el cumplimiento del MRV, adicional en este se establece el método para calcular la cantidad de emisiones de CO₂ que deben de ser

compensadas en un año dado por parte de los explotadores de aeronaves (Organización de Aviación Civil Internacional, 2023).

Así mismo como CORSIA, la unión europea ha implementado un plan similar denominado EU emissions trading scheme (EU ETS) el cual se limita a los vuelos dentro del Espacio Económico Europeo, aunque si bien este es un plan reducido presente desde el 2013 alcanzaría tasas de compensación de emisiones de CO₂ de entre el 2% y el 4% del CO₂ mundial en el periodo comprendido entre 2016 y 2035 (Maertens et al., 2019; Scheelhaase & Maertens, 2020).

Con el fin de tomar medidas pertinentes ante la contaminación atmosférica las grandes ciudades como el caso de Bogotá ha desarrollado diferentes técnicas para la medición de la calidad del aire, donde la principal herramienta para la ciudad es la instalación de estaciones equipadas con sensores que son ubicadas estratégicamente en la ciudad y a su vez alimentan plataformas web en tiempo real como el Índice Bogotano de Calidad de Aire o mayormente conocido como IBOCA, las medidas realizadas por medio de estas estaciones están definidas por la cantidad de material particulado o PM_{2.5} y PM₁₀, el cual esto hace referencia a material particulado con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros y 10 micrómetros respectivamente. Las cuales son partículas compuestas por la combinación de diferentes componentes presentes en el aire producidos por las distintas industrias incluida la aeronáutica. Dentro de las principales preocupaciones se encuentran las partículas con diámetro aerodinámico menor que 10 micrómetros ya que estas tienen un gran impacto en la salud humana. En el caso de las PM_{2.5} aunque si bien el riesgo disminuye, al ser partículas de menor diámetro son capaces de cubrir grandes extensiones de área, llegando a transportar sustancias tóxicas que al momento de ser respiradas pueden ser llevadas a través del sistema respiratorio, causando grandes enfermedades (Xing et al., 2016).

En específico para el área de la aviación estudios enfatizan en que las emisiones generadas al quemar el combustible pueden presentar un grave impacto en la calidad del aire de las ciudades. Dentro de los componentes generados por la combustión realizada en los motores de las aeronaves podemos encontrar las siguientes sustancias dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O), óxidos nitrosos (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), carbonos orgánicos volátiles (VOC), entre otros gases y partículas. La producción de estas sustancias en las operaciones en tierra y a bajos niveles de vuelo sobre las ciudades impactan seriamente la calidad del aire (Kumaş et al., 2019).

Debido a estos problemas y con el fin de abordar la problemática de las emisiones de CO₂ en el espacio aéreo de Bogotá, el presente estudio se centra en por medio del sistema ADS-B recopilar datos esenciales de las aeronaves, como lo son el nivel de vuelo para por medio de la integración de la base de datos de rendimiento de aeronaves (BADA) estimar los niveles de combustible y, consecuentemente, calcular las emisiones de CO₂.

El sistema ADS-B, por sus siglas en inglés de Automatic Dependent Surveillance – Broadcast, o sistema de vigilancia dependiente automática de radiodifusión en español, es un sistema que envía información de forma periódica sin necesidad de que los pilotos o un operador intervengan,

y que esa información enviada puede ser recibida por cualquiera que tenga los equipos adecuados (Organización de Aviación Civil Internacional, 2021). Este sistema tiene algunas características que permiten resaltar su gran importancia al momento de facilitar la vigilancia aérea global, como, por ejemplo, que tiene una mayor cobertura, una mejor relación señal/ruido y una menor diferencia de potencia entre las señales (Zhang, 2018). El sistema puede funcionar en las diferentes fases de vuelo, como la aproximación, el aterrizaje y el despegue, el movimiento en superficie y en ruta (Indra, 2015).

La tecnología ADS-B es uno de los grandes progresos para el futuro de la gestión de tráfico aéreo, por eso la Federal Aviation Administration (FAA) quiere hacer el cambio de tecnología de radar a ADS-B (Lange et al., 2019). Con este sistema podemos obtener diferentes datos como el identificador de la aeronave, el identificador del vuelo, la posición, la velocidad, el estado del vuelo, entre otros (Organización de Aviación Civil Internacional, 2021). Para obtener estos datos, como se mencionó anteriormente, este es un sistema dependiente, es decir, que este sistema necesita de otros sistemas que están a bordo, como el sistema de navegación, que específicamente necesitará del Global Navigation Satellite System (GNSS), o sistema global de navegación por satélite en español, y también el sistema de datos del aire, para tomar datos como la altitud (Sun, 2021). La trama o mensaje recibida por medio del equipo receptor del sistema está compuesta por 5 bloques con una longitud total de 112 bits como se evidencia en la tabla 1. Cada una de estas partes tiene un número de bits asociado y permite identificar el nombre de cada sección y la información que contiene, como se puede ver en la tabla 1 (Carrasco, 2022).

Tabla 10. De Tabla 1: Estructura de una Trama ADS-B

BIT	NO. BITS	ABREVIACIÓN	INFORMACIÓN
1 - 5	5	DF	Downlink format
6 - 8	3	CA	Transponder Capability
9 - 32	24	ICAO	ICAO aircraft address
33 - 38 (33 - 37)	56 (5)	ME (TC)	Message, extended squitter (Type code)
89 - 112	24	PI	Parity / Interrogator ID

Fuente: Adaptada de (Sun, 2021).

La cuarta sección es el Mensaje, que es donde viene toda la información sobre la aeronave, como velocidad, latitud, longitud, etc. Esta sección tiene una subsección llamada Type Code (TC), que está en los 5 bits iniciales, es decir, entre los bits 33-37, y que sirve para diferenciar el tipo de contenido de la trama ADS-B. En la tabla 2 podemos ver a qué corresponde la información según el Type Code (Carrasco, 2022; Sun, 2021).

Tabla 11. De Tabla 2: Contenido de una Trama de ADS-B

TC	CONTENIDO DE LA TRAMA
1 - 4	Identificación y categorización de la aeronave
5 - 8	Posición superficial (Con altitud barométrica)
9 - 18	Posición de vuelo
19	Velocidades de vuelo
20 - 22	Posición de vuelo (con altitud satelital)
23 - 27	Reservados
28	Estado de vuelo
29	Información de estado y estado de destino
31	Estado de operación de la aeronave

Fuente: Adaptada por los autores de (Carrasco, 2022).

Para recibir las tramas se necesita un receptor y una antena, las antenas son omnidireccionales y operan a 1090 MHz (Carrasco, 2022).

Los equipos ADS-B difunden los datos mediante el espectro radioeléctrico operando en la frecuencia 1090 MHz para el caso de Colombia (Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil, 2018). La implementación del sistema ADS-B en las aeronaves que hacen uso del espacio aéreo colombiano está regida bajo la resolución número 02217 del 26 de octubre de 2023, en la cual se establece que a partir del 01 de noviembre de 2023, las aeronaves que vuelen en espacio aéreo superior colombiano o por encima de nivel de vuelo 290 deberán contar con un equipo operativo ADS-B, para el 01 de septiembre de 2024 las aeronaves que vuelen en el espacio aéreo controlado colombiano o por encima de nivel de vuelo 190 deberán contar con un equipo operativo ADS-B y finalmente para el 01 de enero de 2025 toda aeronave que vuele en el espacio aéreo colombiano y este dentro de un área con cobertura de datos ADS-B deberá contar con un equipo ADS-B instalado y operativo (RESOLUCION NUMERO #02217 DE 26 OCT. 2023, 2023).

Con el avance de esta tecnología, diferentes empresas han creado plataformas como Flightradar24, FlightAware, etc. Estas plataformas ofrecen parte de la información obtenida por el sistema ADS-B de forma gratuita, pero la mayor parte de esta información es de pago. Por lo tanto, una forma de solucionar esto es la implementación de un sistema propio con un receptor y una antena para obtener y decodificar la información.

La Base de Datos de Rendimiento de Aeronaves (BADA, por sus siglas en inglés), es una herramienta fundamental para el análisis y modelado de operaciones aéreas. Creada y mantenida por la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea (EUROCONTROL), está dividida en dos tipos de modelos denominados Aircraft Performance Model (APM) y Airline Procedure Model (ARPM), se basa en un enfoque cinético con variación de masa. El APM modela

una aeronave como un punto y requiere la modelización de las fuerzas subyacentes que causan el movimiento de la aeronave mientras que el enfoque ARPM está impulsado por la necesidad de proporcionar información sobre las operaciones nominales de las aeronaves a diferentes herramientas de simulación y modelización para diversas aplicaciones de gestión del tráfico aéreo. BADA ofrece información detallada sobre el rendimiento de las aeronaves y sobre datos de especificaciones técnicas de las aeronaves, incluyendo aspectos como el consumo de combustible en diferentes fases del vuelo (Nuic et al., 2010).

Esta base de datos se ha convertido en una referencia en la industria aeronáutica, permitiendo a investigadores realizar estimaciones precisas sobre emisiones y otras variables operativas. Dentro de los usos que se le ha dado a BADA con fines investigativos encontramos la investigación titulada “Pollution and noise reduction through missed approach maneuvers based on aircraft reinjection” en donde en la cual se evalúa los niveles de contaminación atmosférica y sonora producidos al realizar aproximaciones frustradas de forma convencional y siguiendo también el procedimiento de reinyección de aeronaves el cual es una técnica en la cual no se siguen los procedimientos de aterrizaje frustrados que establecen las cartas aeronáuticas sino que por medio de la reinyección de aeronaves se eliminan waypoints y se inserta la aeronave en medio de la trayectoria para optimizar la trayectoria tradicional (Casado et al., 2023). Adicional a este estudio también se tiene la investigación titulada “A proposed solution for airborne delays: linear holding” el cual establece un procedimiento de espera lineal en vez de los procedimientos de espera convencionales que permita un ahorro de combustible y evite retrasos en términos de la gestión del tráfico aéreo (Sahin, 2019).

El punto en común de estas investigaciones es por medio del modelo BADA optimizar procedimientos que interpongan ciertas ventajas tanto operacionales como de cuidado al medio ambiente, gracias a este modelo se han desarrollado e implementado investigaciones que permiten mejorar el rendimiento de las aeronaves por medio de los datos de rendimiento que proporciona BADA, para el caso del presente estudio donde se trata acerca de estimar las emisiones generadas por las aeronaves, se encuentra un estudio altamente relacionado denominado “Global Civil Aviation Emissions Estimates for 2017–2020 Using ADS-B Data” el cual haciendo uso de los vuelos registrados por redes de ADS-B en conjunto con el modelo de rendimiento de aeronaves BADA y la base de datos de emisiones de motores de la Organización de Aviación Civil Internacional se estima las emisiones de CO₂, H₂O, NO_x, SO_x, CO, hidrocarburos no quemados (HC) y partículas no volátiles (nvPM). Con relación a esta investigación se resalta una de las conclusiones obtenidas la cual hace referencia a que la red de datos ADS-B es una fuente viable de datos para generar estimaciones de emisiones globales de forma oportuna y transparente para supervisar y evaluar los impactos atmosféricos de la aviación (Quadros et al., 2022).

Siguiendo con lo anterior uno de los aspectos diferenciadores es el uso de modelos de machine learning por medio del algoritmo Random Forest, este algoritmo hace uso de colecciones de árboles de decisión débiles y poco correlacionados que funcionan como “conjuntos de expertos”. Cada árbol se entrena utilizando una muestra bootstrap de los datos de entrenamiento, y en cada nodo se selecciona la mejor división de entre un subconjunto

aleatorio de las variables predictoras. Este proceso garantiza que cada árbol utilice los datos de entrenamiento y las variables predictoras de forma diferente, reduciendo su dependencia estadística de los demás árboles. Este modelo ha sido ampliamente usado en el campo biomédico, pero no solo limitado a este campo, este algoritmo ha sido usado en el campo de la aviación en distintas investigaciones, como por ejemplo las investigaciones tituladas “Using random forests to diagnose aviation turbulence”, “Forecasting Low-Visibility Procedure States with Tree-Based Statistical Methods” y “Flight Delay Prediction Based on Aviation Big Data and Machine Learning” (Dietz et al., 2019; Gui et al., 2020; Williams, 2014), lo que demuestra el potencial uso que tiene este algoritmo para ser usado en esta investigación.

Dentro de investigaciones relacionadas que sirven como base encontramos que se ha desarrollado un método para calcular el consumo de combustible y las emisiones de las operaciones de vuelo utilizando las trayectorias ADS-B. Este método busca predecir el consumo de combustible y las emisiones producidas por 23 vuelos que parten del aeropuerto internacional de Nanjing Lukou, el principal aeropuerto de la ciudad de Nankín, capital de la provincia de Jiangsu, en China (Filippone et al., 2021). Además, se ha estimado la emisión de dióxido de carbono por parte de las aeronaves en el aeropuerto Isparta Süleyman Demirel, que sirve a la ciudad de Isparta en Turquía. En este caso, la estimación se realizó en 2018 utilizando un enfoque por niveles según el tipo y número de vuelos (Kumaş et al., 2019). Junto con la investigación “Global Civil Aviation Emissions Estimates for 2017–2020 Using ADS-B Data” la cual comparte ciertas características como el uso de ADS-B en conjunto con BADA (Quadros et al., 2022).

Esta investigación tiene como objetivo estimar las emisiones de CO₂ generadas por las operaciones aéreas en el Aeropuerto El Dorado de Bogotá. Para ello, integra datos obtenidos del sistema ADS-B y de la Base de Datos de Rendimiento (BADA). Además, se desarrolla un modelo de aprendizaje automático para predecir los niveles de CO₂ en ubicaciones geográficas específicas. La precisión de estas estimaciones se valida mediante su comparación con las mediciones realizadas por el Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA).

2. MÉTODO

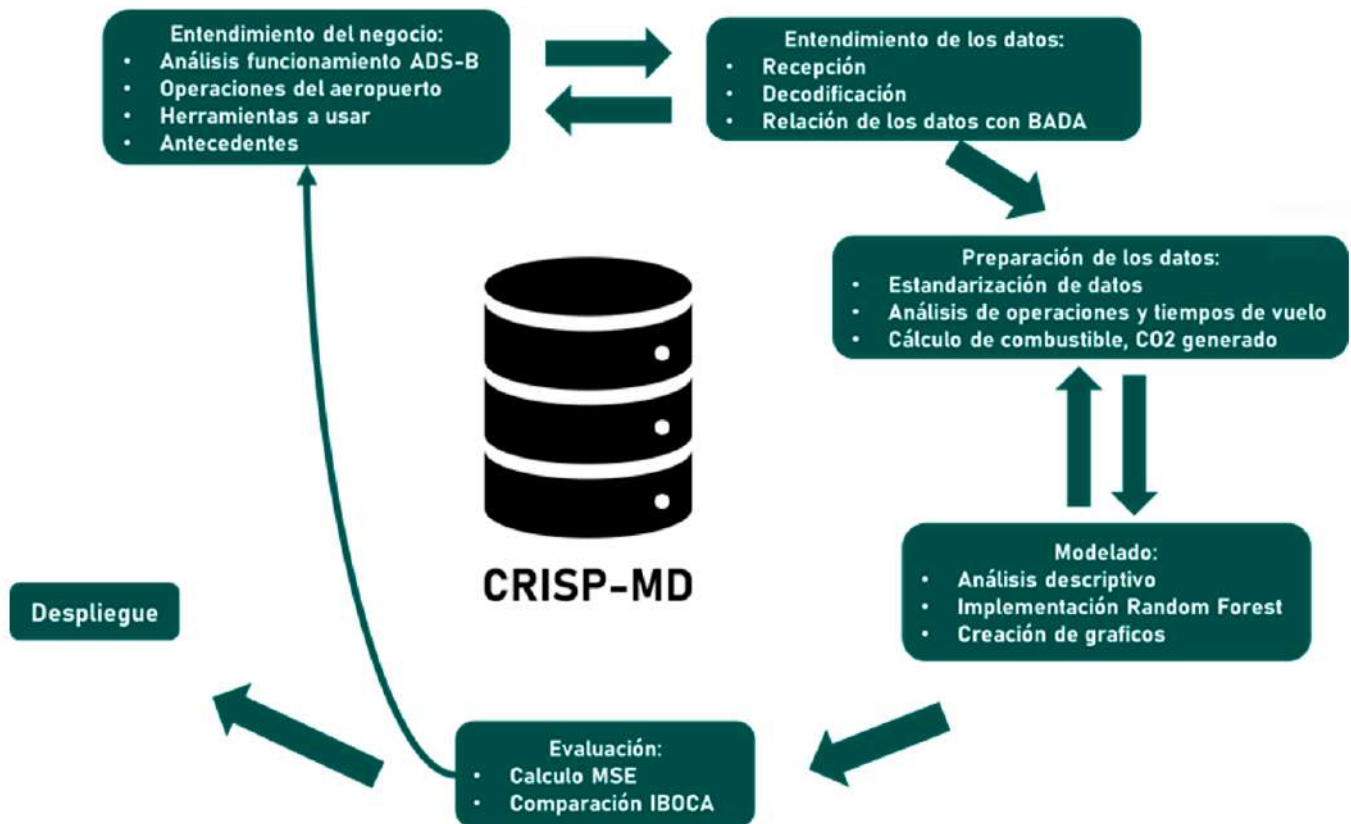
El avance de la tecnología ha generado un incremento en el volumen de datos producido, la frase “lo que no se puede medir no se puede controlar; lo que no se puede controlar no se puede gestionar; lo que no se puede gestionar no se puede mejorar” dicha por Peter Drucker tiene hoy en día mucha importancia, ya que con los datos podemos extraer información valiosa que puede ser útil para mejorar procesos y demás, por eso surge el campo de la ciencia de datos. Como dicen (Blei & Smyth, 2017) “La ciencia de datos ha despertado mucho interés, con la promesa de transformar grandes cantidades de datos en predicciones y conocimientos útiles”. La ciencia de datos ha traído grandes cambios en la sociedad permitiendo a las empresas e industrias tomar y prever decisiones que permitan un crecimiento, por medio de este se han creado diversos productos que permitan simplificar procesos, estos productos de la ciencia de datos

son el resultado de reinterpretar los datos disponibles para objetivos de análisis que difieren de las razones originales que motivaron la recolección de datos (Grossi et al., 2021).

2.1. ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS

Para conseguir los productos anteriormente mencionados, es importante tener una forma de organización que permita realizar lo que se busca, por eso surge el uso de metodologías como CRISP-DM, que es un modelo de proceso independiente de la industria para la minería de datos que tiene seis fases iterativas (Schröer et al., 2021), que se pueden ver en la ilustración 1. Con este modelo se puede establecer el procedimiento adecuado para desarrollar un proyecto que involucre ciencia de datos. Por eso, para esta investigación se usa este tipo de metodología, desarrollando cada una de las fases a grandes rasgos de la siguiente manera:

Imagen 35: Ilustración 1. Metodología CRISP-MD y sus respectivas fases desarrolladas en la investigación



Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

2.1.1. POBLACIÓN Y MUESTRA

El estudio actual se centra en datos obtenidos de aeronaves que sobrevolaron el espacio aéreo de la ciudad de Bogotá en el periodo del 25 de marzo de 2023 al 1 de abril de 2023. Estos datos abarcan distintas fases de vuelo, incluyendo despegue, ascenso, crucero, aproximación y aterrizaje. Para el análisis, se seleccionarán únicamente aquellos vuelos que contengan todos los datos necesarios, asegurando así la integridad y relevancia de la información para el estudio.

2.1.2. INSTRUMENTOS DE RECOGIDA DE INFORMACIÓN

Para captar las señales de las aeronaves ADS-B, se adquirió un receptor junto con una antena de la marca NOOELEC, conocida por fabricar productos de radio definida por software (SDR). La antena, ilustrada en la ilustración 2, opera en un rango de frecuencias de 25 MHz a 1750 MHz, lo que la hace ideal para su uso en el sistema ADS-B. Se conecta a un computador a través de un receptor USB. En el computador, se utiliza el software MATLAB para decodificar las tramas ADS-B. La función principal de este software es convertir las tramas en formato hexadecimal a un formato de texto, que luego se almacena en un archivo de texto plano, separado por comas, preparado para el análisis de datos.

Imagen 36: Ilustración 2. Receptor Nooelec NESDR Mini SDR & DVB-T



Fuente: Adaptada por los autores de (nooelec, s/f).

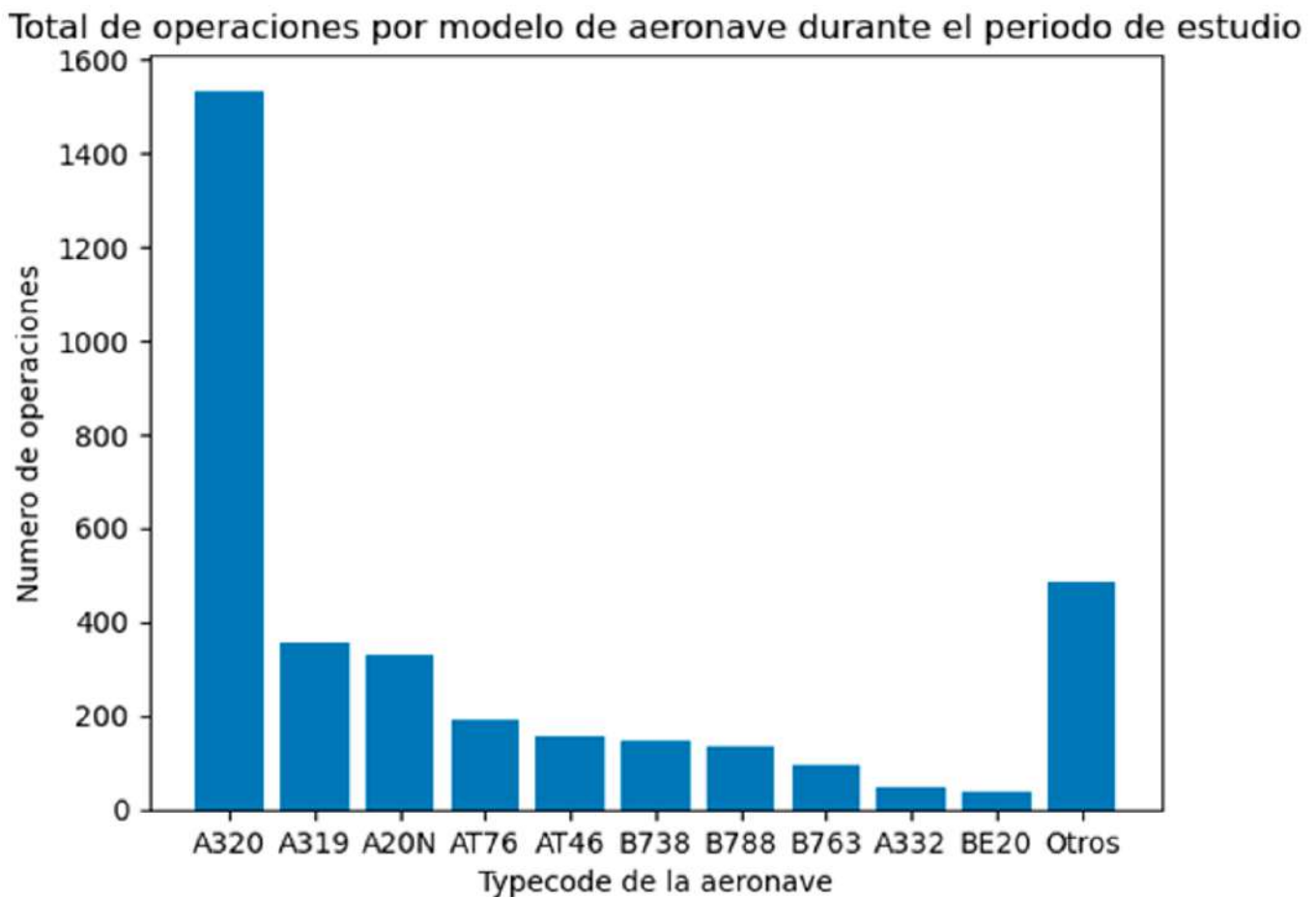
2.1.3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento seguido para el desarrollo de la investigación está basado en el uso de la metodología CRISP-DM por tanto se enumeran y se explican los pasos seguidos en cada una de las fases. La primera fase implica el análisis de tecnologías relevantes, revisión de antecedentes sobre cálculo de emisiones, estudio de procedimientos del Aeropuerto El Dorado, y determinación de la ubicación óptima para la antena receptora. En la segunda fase, se procesan y revisan los datos ADS-B de las aeronaves, utilizando el CRC de los mensajes para filtrar los datos irrelevantes y vincularlos con la Base de Datos de Rendimiento (BADA) a través del nivel de vuelo, seleccionando una muestra representativa de aeronaves. La tercera fase se centra en asegurar la calidad de los datos, estandarizándolos y formateándolos, además de eliminar errores o anomalías. En la cuarta fase, se utiliza el algoritmo Random Forest para predecir los niveles de CO₂, generando gráficos y mapas para una mejor visualización y comprensión de los resultados. Finalmente, la quinta fase incluye la medición del Error Cuadrático Medio (MSE) del modelo para evaluar su precisión y la comparación de los resultados con el Índice Bogotano de Calidad de Aire (IBOCA) para validar los datos obtenidos.

3. RESULTADOS

Durante el periodo de ocho días del 25 de marzo al 1 de abril de 2023, se identificaron 528 aeronaves diferentes sobre la ciudad de Bogotá. Esta muestra reveló la presencia de aproximadamente 65 modelos distintos de aeronaves, demostrando así una amplia variedad en el espacio aéreo de la ciudad. Muchos de estos modelos realizaron múltiples operaciones en un mismo día. En total, se estimó que hubo 3511 operaciones, incluyendo tanto salidas como llegadas, durante el periodo de estudio. Estas operaciones se distribuyen entre los diferentes modelos de aeronaves, detalle que se muestra en la ilustración 3.

Imagen 37: Ilustración 3. Operaciones efectuadas por cada modelo de aeronave durante el periodo de estudio

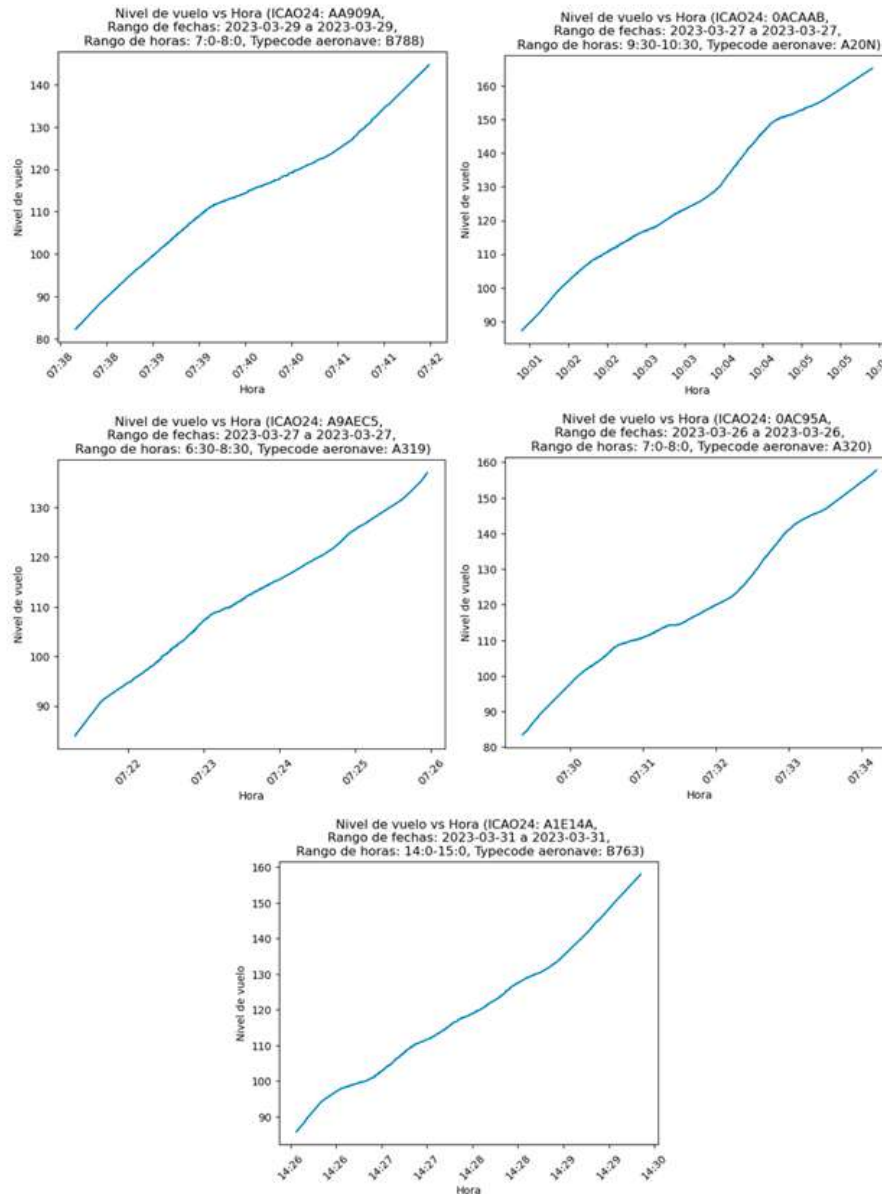


Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

La ilustración 3 muestra que el Airbus A320, identificado con el tipo de código A320, destaca significativamente en el número de operaciones en comparación con otros modelos de aeronaves. Específicamente, la diferencia con el Airbus A319, el segundo modelo más operativo, es de 1175 operaciones. Esta prominencia se debe a que el Airbus A320 es el avión más común en Colombia, atendiendo la mayoría de las rutas en el país. Su presencia es especialmente notoria en el Aeropuerto El Dorado, el principal aeropuerto de Colombia. Dada su alta frecuencia de operaciones sobre la ciudad, se anticipa que este modelo puede ser uno de los principales contribuyentes a las emisiones de CO₂. Esto se debe a que las emisiones dependen del rendimiento del Airbus A320 en comparación con otros modelos de aeronaves.

Una vez trazadas las rutas de las aeronaves, el siguiente paso fue calcular los perfiles de ascenso de algunos modelos específicos, con el objetivo de analizar el tiempo que toman para ascender al salir de la ciudad. Estos perfiles de ascenso se presentan en la ilustración 5, donde se observa que modelos como el Airbus A319, Airbus A320, Airbus A320NEO, Boeing 767-300ER y Boeing 787-8 siguen un patrón de ascenso rápido. Este procedimiento se lleva a cabo para cumplir con las directrices de los manuales de abatimiento de ruido, buscando alcanzar niveles de vuelo altos en un corto periodo de tiempo. Este método se utiliza principalmente para minimizar los niveles de ruido en la ciudad, en especial en áreas residenciales, reduciendo así el impacto acústico del tráfico aéreo en las zonas habitadas.

Imagen 39: Ilustración 5. Perfiles de ascenso para distintas aeronaves



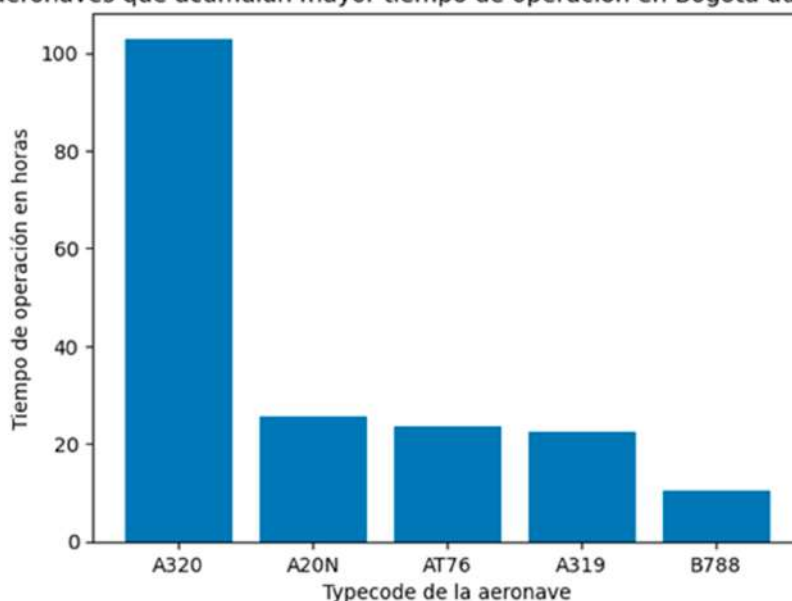
Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

La discretización de las rutas y la consideración de los niveles de vuelo permiten calcular los tiempos de vuelo en relación con la velocidad vertical de cada aeronave. Este dato es esencial para establecer una correlación con la Base de Datos de Rendimiento de Aeronaves (BADA). Al cruzar estos tiempos de vuelo y velocidades con la información de BADA, se puede determinar el consumo de combustible específico para cada modelo de aeronave. Este enfoque ofrece una estimación precisa del consumo de combustible, lo que es fundamental para calcular las emisiones de CO₂, ya que estas están directamente relacionadas con la cantidad de combustible quemado durante las operaciones de vuelo.

Para dirigir la investigación y tener una perspectiva clara de los resultados esperados, se realiza una comparación del número de horas que cada modelo de aeronave opera en el espacio aéreo de Bogotá. Esta comparativa se ilustra en la ilustración 6. La premisa subyacente es que un mayor número de horas de operación por parte de un modelo de aeronave podría indicar un consumo más elevado de combustible. Sin embargo, esto no implica necesariamente un aumento proporcional en las emisiones de CO₂, ya que las emisiones dependen significativamente del rendimiento y la tecnología de cada aeronave. Por ejemplo, modelos más nuevos y con tecnologías avanzadas podrían ser más eficientes en cuanto a consumo de combustible y emisiones, a pesar de tener tiempos de operación más largos. Por lo tanto, este análisis de horas de vuelo por modelo es un paso crucial para entender no solo el uso del espacio aéreo, sino también para predecir y comparar las emisiones de CO₂ de diferentes tipos de aeronaves operando en la ciudad.

Imagen 40: Ilustración 6. Número de horas operadas por modelo de aeronave para el periodo de estudio

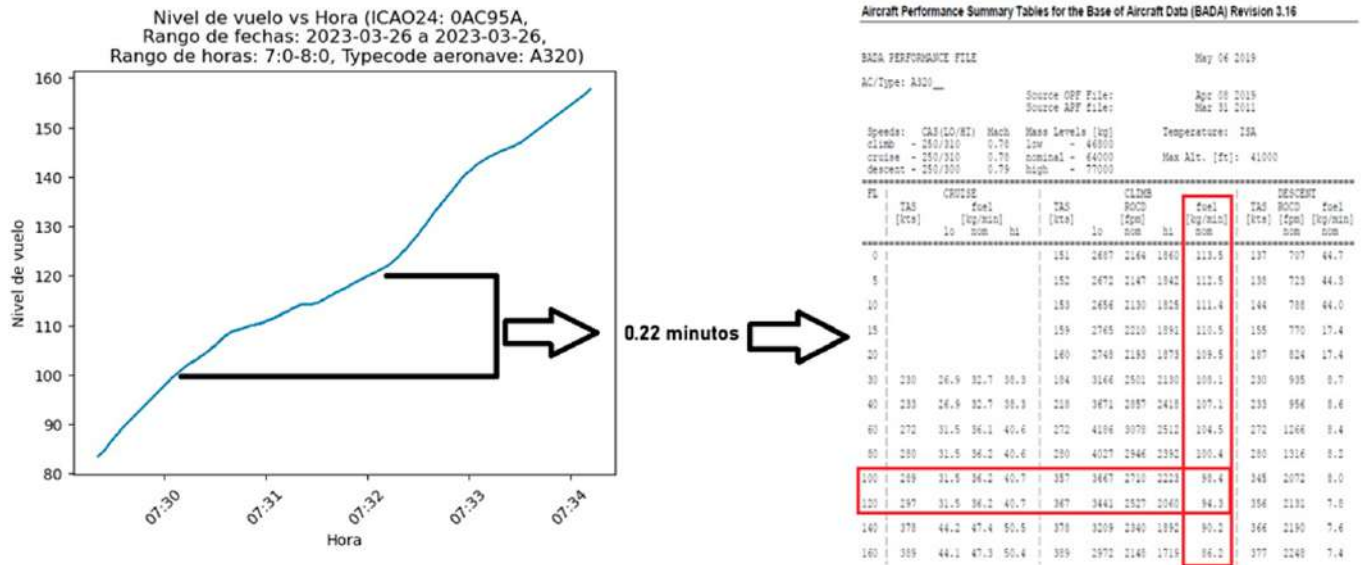
Los 5 modelos de aeronaves que acumulan mayor tiempo de operación en Bogotá durante el periodo de estudio



Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

Para calcular las emisiones de CO₂ producidas por las aeronaves, es crucial determinar primero el combustible consumido. Este cálculo se puede realizar utilizando la Base de Datos de Rendimiento de Aeronaves (BADA). BADA proporciona información sobre el consumo de combustible por minuto, que varía según el nivel de vuelo y la fase de vuelo en que se encuentre la aeronave. Utilizando los tiempos calculados previamente, que representan cuánto tarda una aeronave en pasar de un nivel de vuelo a otro, estos se correlacionan con el correspondiente nivel de vuelo para determinar el consumo de combustible. De este modo, se tiene en cuenta tanto la duración del vuelo en cada fase (ascenso, crucero, descenso) como el nivel de vuelo específico, lo que permite una estimación precisa del combustible utilizado. La ilustración 7 ilustra este proceso, mostrando cómo se vinculan los tiempos de vuelo y los niveles de vuelo con el consumo de combustible. Con esta información, es posible calcular las emisiones totales de CO₂, ya que las emisiones están directamente relacionadas con la cantidad de combustible quemado. Este enfoque ofrece una evaluación detallada y precisa del impacto ambiental de las operaciones aéreas en términos de emisiones de CO₂.

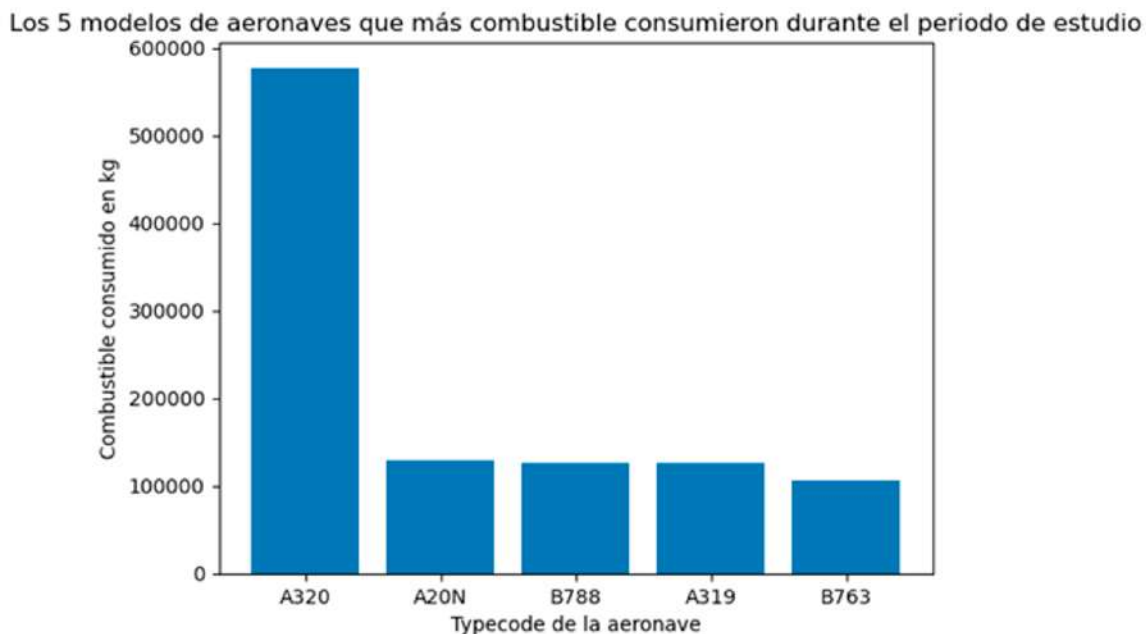
Imagen 41: Ilustración 7. Procedimiento seguido para obtener el consumo de combustible basado en los tiempos de ascenso



Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

Para determinar las emisiones totales de CO₂, se calcula primero el combustible consumido por cada aeronave en los distintos niveles de vuelo. Esto se hace sumando el combustible utilizado en cada fase y nivel de vuelo para cada aeronave. Luego, se convierte la cantidad total de combustible consumido en kilogramos de CO₂, proporcionando una medida directa de las emisiones. El análisis se profundiza al examinar el combustible consumido desglosado por modelo de aeronave durante todo el periodo de estudio. Este análisis permite identificar qué modelos de aeronaves son los mayores consumidores de combustible y, por tanto, los mayores contribuyentes a las emisiones de CO₂. Este desglose por modelo de aeronave es esencial para comprender el impacto ambiental específico de cada tipo de aeronave operando en el espacio aéreo de Bogotá. Los resultados de este análisis se presentan en la ilustración 8, donde se muestra el consumo de combustible por modelo de aeronave a lo largo del periodo estudiado. Esta representación visual facilita la comparación entre los distintos modelos y resalta aquellos que tienen un mayor impacto en términos de emisiones de CO₂, lo que es clave para futuras políticas de gestión y control de emisiones en el sector aéreo.

Imagen 42: Ilustración 8. Combustible consumido en kilogramos por cada modelo de aeronave para el periodo de estudio

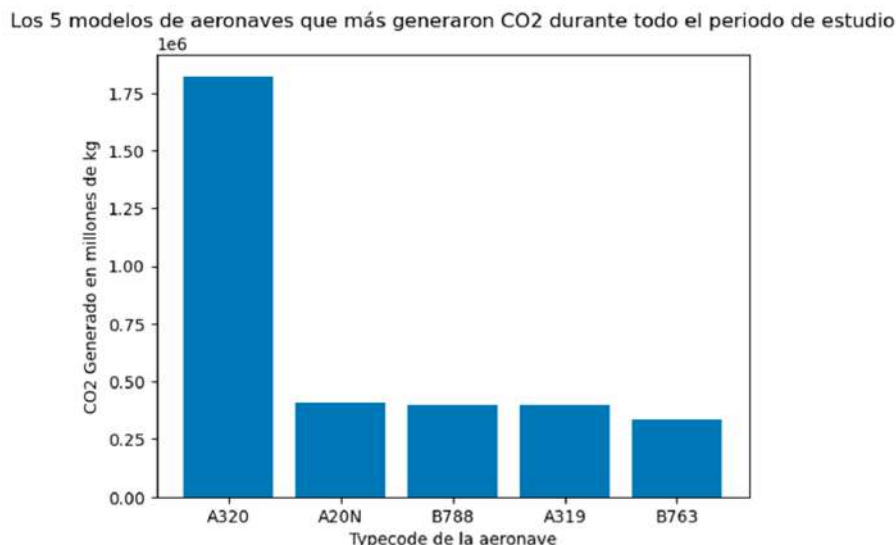


Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

La ilustración 8 muestra cómo se correlacionan diferentes variables analizadas, tales como el número de operaciones, las horas de operación y el consumo de combustible de los distintos modelos de aeronaves. Un caso interesante es el del modelo AT76, correspondiente a un ATR 72-600. A pesar de que este modelo opera un número considerable de horas, no se encuentra entre los primeros en términos de consumo de combustible total. Esta situación se debe a que el ATR 72-600, a pesar de su alta operatividad, tiene un consumo de combustible por minuto relativamente bajo en comparación con otros modelos. Esta eficiencia en el consumo hace que, aunque el avión esté en operación durante muchas horas, el total de combustible consumido sea menor en comparación con otros modelos que, aunque operen menos tiempo, consuman más combustible por minuto. Este hallazgo demuestra la importancia de no solo considerar la cantidad de operaciones o las horas de vuelo, sino también la eficiencia en términos de consumo de combustible de cada modelo para evaluar su impacto ambiental. Por tanto, el AT76 se destaca por su rendimiento eficiente, lo que resulta en un menor impacto en términos de emisiones de CO₂, a pesar de su alta frecuencia de uso. Este tipo de análisis es crucial para tomar decisiones informadas sobre gestión ambiental y políticas de sostenibilidad en la aviación. La investigación, en su búsqueda de uno de sus objetivos clave, se enfoca ahora en el análisis de los niveles de CO₂ generados por las aeronaves. Se parte de la premisa de que la generación de CO₂ en niveles de vuelo bajos podría tener un impacto ambiental más significativo que en niveles de vuelo altos. Esto se basa en la información de la Base de Datos de Rendimiento de Aeronaves (BADA), que indica que el consumo de combustible disminuye a medida que la aeronave alcanza niveles de vuelo más altos. El rápido ascenso de las aeronaves, un procedimiento común para cumplir con las normativas de reducción de ruido puede considerarse también una estrategia eficaz para disminuir las emisiones de CO₂ en niveles de vuelo bajos, lo que potencialmente reduce la contaminación en áreas urbanas. Esta consideración es particularmente relevante en ciudades como Bogotá, donde la proximidad del aeropuerto a zonas residenciales hace que la gestión de las emisiones en niveles bajos sea crucial. Para calcular estas emisiones, se utiliza el factor establecido por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) en el marco del plan CORSIA. Según este factor, por cada kilogramo de combustible Jet A1 consumido, se liberan 3,16 kilogramos de CO₂. Este cálculo permite una estimación precisa de las emisiones totales de CO₂ generadas por las operaciones aéreas, y ayuda a evaluar el impacto ambiental de diferentes modelos de aeronaves y patrones de vuelo. Así, este análisis proporciona información valiosa para las políticas de control de emisiones en la aviación, ofreciendo una base para posibles estrategias de mitigación que podrían incluir la optimización de los perfiles de vuelo para minimizar las emisiones en áreas críticas.(Organización de Aviación Civil Internacional, 2018).

El análisis también incluye la evaluación de los niveles de CO₂ emitidos por cada modelo de aeronave, cuyos resultados se presentan en la ilustración 9. Esta figura refleja que las emisiones de CO₂ están directamente relacionadas con la cantidad de combustible consumido. De acuerdo con este análisis, el Airbus A320 resulta ser el modelo con mayores emisiones de CO₂, lo cual concuerda con su predominante presencia en las operaciones aéreas de Colombia. La significativa contribución del Airbus A320 a las emisiones totales de CO₂ subraya la importancia de desarrollar e implementar estrategias enfocadas en la mitigación de emisiones, especialmente para este tipo de aeronaves de alta frecuencia. Estas estrategias podrían incluir la introducción de tecnologías más eficientes en el consumo de combustible, la optimización de rutas y perfiles de vuelo para minimizar el tiempo de vuelo en niveles bajos, o incluso la consideración de alternativas de combustibles más limpios o sostenibles. Dado que los modelos de aeronaves como el Airbus A320 juegan un rol crucial en el transporte aéreo en Colombia, su impacto ambiental es significativo. Por lo tanto, cualquier mejora en la eficiencia de estas aeronaves o en la gestión de sus operaciones podría tener un impacto positivo considerable en la reducción de las emisiones globales de CO₂ en el sector aéreo. Este enfoque no solo beneficia al medio ambiente, sino que también puede alinear a las aerolíneas con regulaciones internacionales más estrictas en materia de emisiones y sostenibilidad.

Imagen 43: Ilustración 9. CO₂ generado en millones de kilogramos por modelo de aeronave para el periodo de estudio



Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

En la tabla 3 se logra observar de mejor manera las cantidades de combustible consumido y su respectiva relación con el CO2 generado por cada modelo de aeronave, obtenido por medio del factor establecido por la OACI.

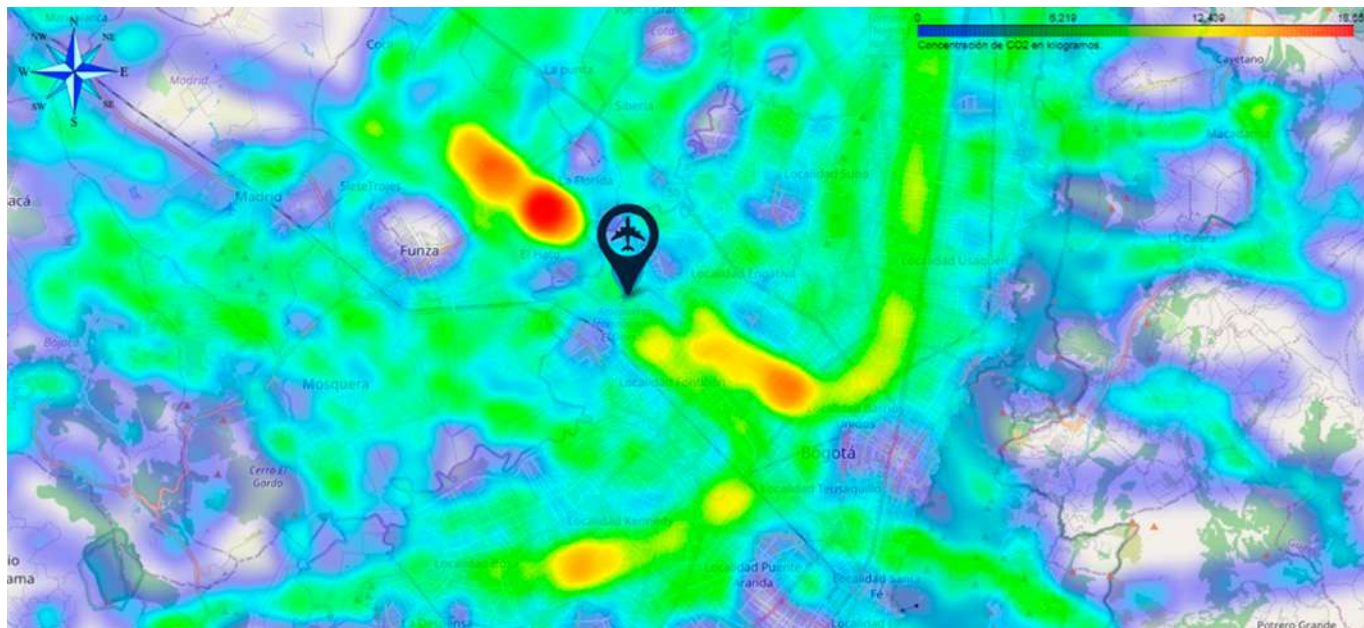
Tabla 12. De Tabla 3. Relación entre combustible consumido en kilogramos y CO2 generado en kilogramo para cada modelo de aeronave

TYPECODE	MODELO DE AERONAVE	COMBUSTIBLE CONSUMIDO (KG)	CO2 GENERADO (KG)
A320	Airbus A320	576,706.48	1,822,392
A20N	Airbus A320NEO	129,779.36	410,102.8
B788	Boeing 787 - 800	125,707.55	397,235.9
A319	Airbus A319	125,385.77	396,219
B763	Boeing 767 - 300ER	106,148.45	335,429.1

Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

La integración de los datos de emisiones con las rutas de vuelo ha permitido la creación de un mapa de calor, mostrado en la ilustración 10. Este mapa destaca visualmente las áreas con diferentes densidades de CO2, utilizando tonalidades rojas para indicar zonas de alta densidad y tonos azules para las de menor densidad. La ilustración 10 revela que, sobre la ciudad de Bogotá, localidades como Fontibón y Kennedy experimentan niveles de CO2 de aproximadamente 15 toneladas por semana. Por otro lado, en zonas como Barrios Unidos y Usaquén, los niveles son ligeramente inferiores, alrededor de 12 toneladas de CO2 en el mismo período. Es importante destacar que estas áreas tienen una alta densidad poblacional y son puntos clave de actividad urbana, incluyendo zonas universitarias e industriales. Esto sugiere que las emisiones totales de CO2 en estas zonas se ven intensificadas no solo por las operaciones aéreas, sino también por las actividades terrestres. Este mapa de calor es una herramienta valiosa para comprender la distribución espacial de las emisiones de CO2 y su impacto en áreas urbanas específicas. Los datos pueden ser utilizados por los planificadores urbanos y las autoridades ambientales para identificar áreas críticas y desarrollar estrategias dirigidas a mitigar la contaminación del aire, especialmente en zonas con alta densidad poblacional y actividad industrial. También puede servir como base para la toma de decisiones en cuanto a regulaciones de tráfico aéreo y medidas de gestión ambiental en y alrededor de áreas urbanas densamente pobladas.

Imagen 44: Ilustración 10. Mapa de calor de la concentración de CO2 en la ciudad de Bogotá y sus alrededores para todo el periodo de estudio



Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

The map displays AQI levels across Bogotá. A legend in the top right corner defines the color scale:

Favorable	Moderada	Regular	Mala	Peligrosa	En mantenimiento
0 - 50	50.1 - 100	100.1 - 150	150.1 - 200	200.1 - 500	--

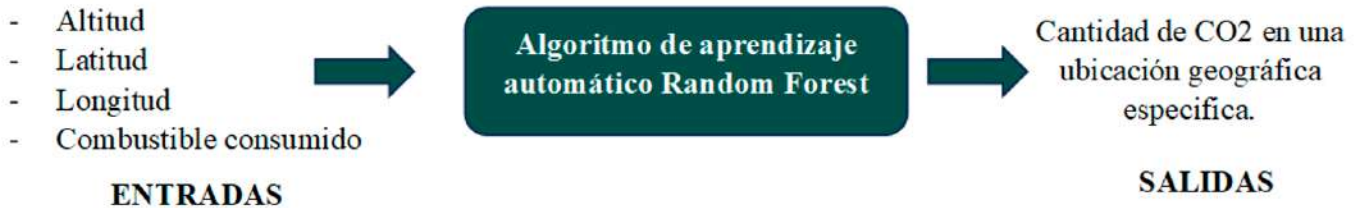
Below the legend, there is a section for 'IBOCA' and 'Contaminante' with a toggle for 'Mapa de interpolación'.

The map shows various neighborhoods and their corresponding AQI values in yellow circles: Suba (65, 55), Engativa (74), Fontibón (82, 95), Barrrios Unidos (67), Chapinero (55, 61), Santa Fe (61), Ciudad Bolívar (82, 57), and others. A compass rose and a scale bar are also present.

98



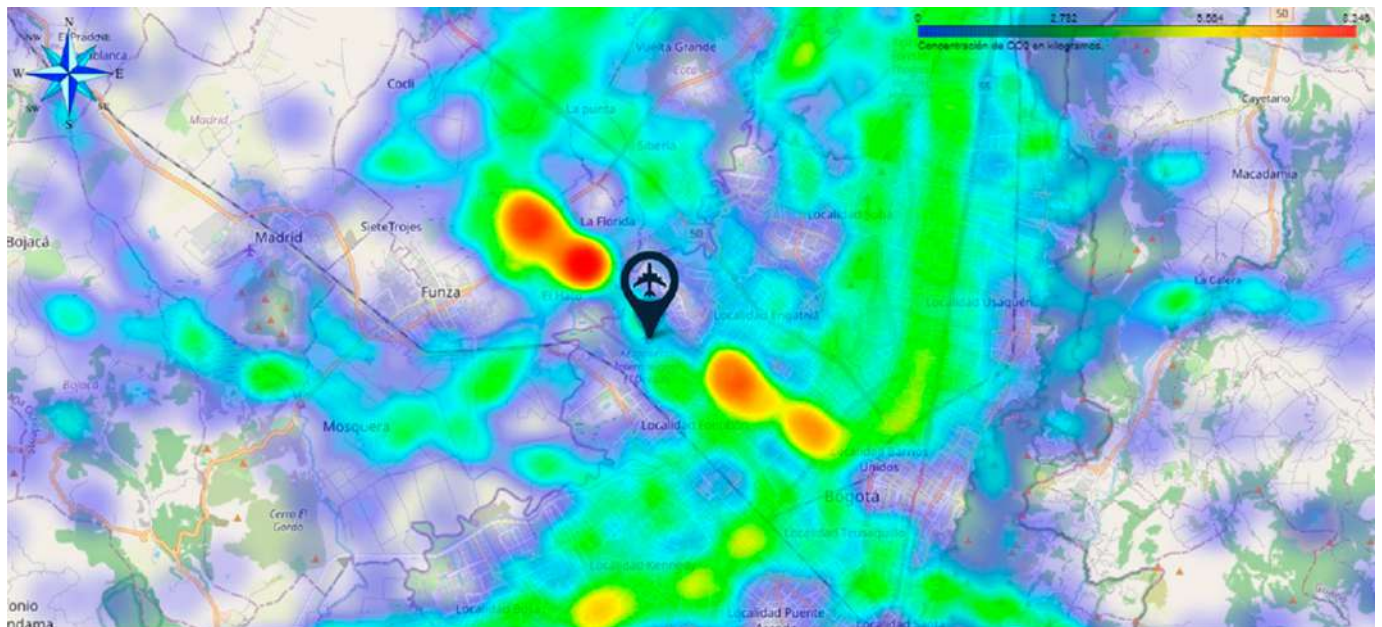
Imagen 46: Ilustración 12. Entradas y salidas para el modelo de machine learning basado en el algoritmo Random Forest



Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

Finalmente, se efectuaron predicciones sobre las emisiones de dióxido de carbono, cuyos resultados se detallan en la ilustración 13. Es notable la coherencia observada entre los datos de emisiones estimados anteriormente y las cifras proyectadas por el modelo de aprendizaje automático. Se constata que en áreas próximas al Aeropuerto El Dorado, específicamente en las localidades de Fontibón y Kennedy, las emisiones de CO₂ son significativamente elevadas, alcanzando hasta 12 toneladas. En contraste, en zonas más distantes como Barrios Unidos y Usaquén, las emisiones son considerablemente inferiores, aproximadamente 5 toneladas. Estos hallazgos evidencian el considerable impacto de las operaciones aéreas en la calidad del aire de las áreas circundantes y subrayan la necesidad imperante de implementar estrategias efectivas para el control y gestión de dichas emisiones, con el fin de preservar la salud pública y proteger el medio ambiente.

Imagen 47: Ilustración 13. Mapa de calor obtenido por medio de las predicciones del modelo Random Forest

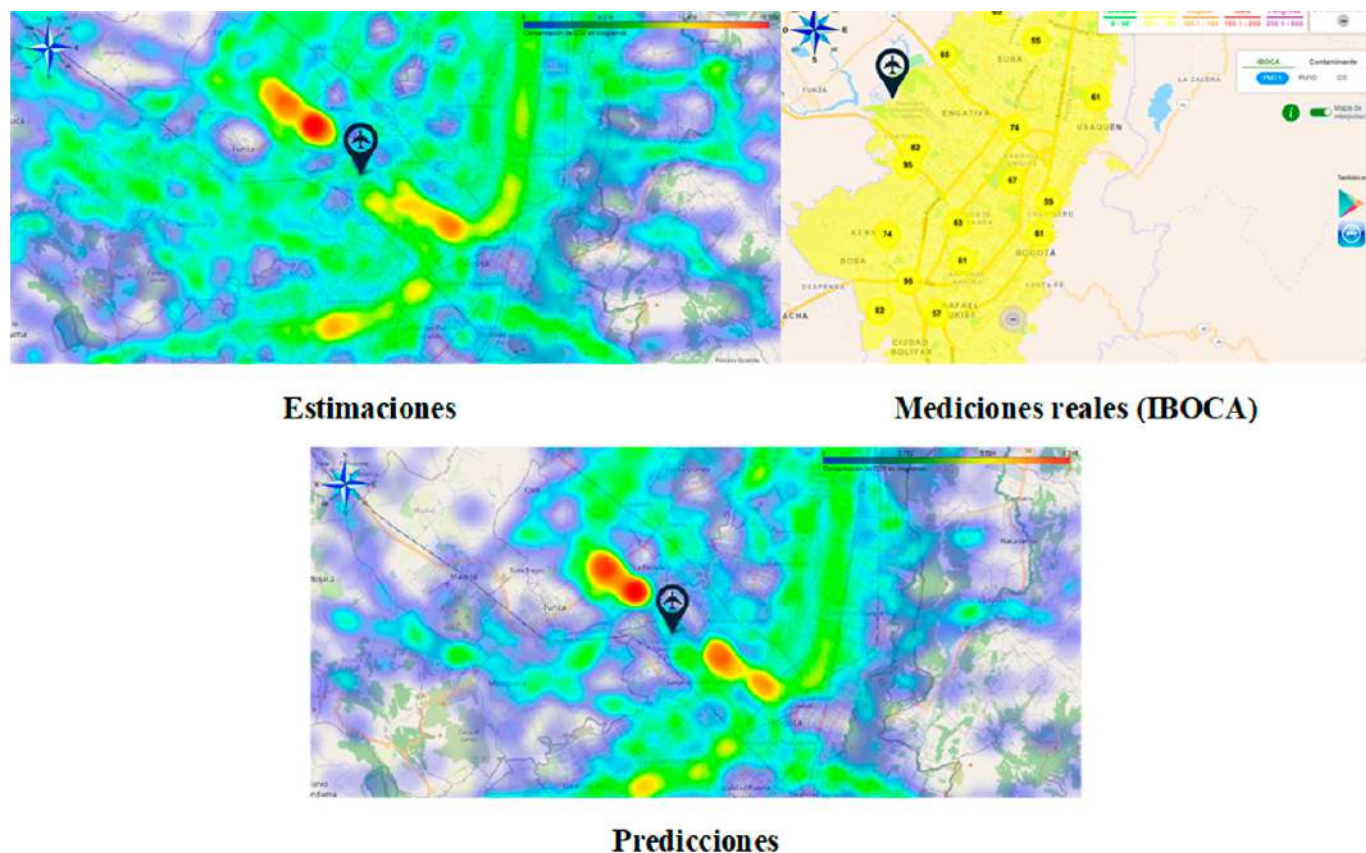


Fuente: Completamente generada por los autores. 2023.

Para evaluar la precisión del modelo desarrollado, se calculó el Error Cuadrático Medio (MSE, por sus siglas en inglés), una métrica de evaluación que cuantifica el error promedio entre los valores reales y las predicciones realizadas por el modelo. Esta métrica proporciona una indicación de cuán cercanas están las predicciones a los valores reales: un MSE de 0 indica predicciones perfectas, mientras que un valor más alto refleja una mayor desviación de los valores reales. En el caso de este estudio, se obtuvo un MSE de 7212.52 kg, lo que sugiere que, en promedio, las predicciones del modelo se desviaron en 7.21 toneladas de los valores reales de emisiones de CO₂. Considerando que el total de emisiones de CO₂ durante el periodo de estudio fue de 4,361.71 toneladas, el MSE obtenido representa un error aproximado del 0.17%. Este bajo porcentaje de error indica que el modelo proporciona una predicción altamente precisa de los niveles de CO₂ en puntos geográficos específicos sobre la ciudad de Bogotá, destacando su eficacia y relevancia para aplicaciones prácticas en la gestión y planificación ambiental urbana.

Para corroborar los resultados obtenidos en esta investigación, se presenta la ilustración 14, la cual ilustra la relación entre las zonas de mayor contaminación identificadas a través de nuestras estimaciones, la contaminación real medida por el Índice Bogotano de Calidad del Aire (IBOCA) y las predicciones del modelo de aprendizaje automático. Es destacable que los diferentes resultados obtenidos, en especial los representados en la ilustración 14, muestran una correlación significativa entre las mediciones de IBOCA y los datos obtenidos en este estudio. Este hallazgo subraya la relevancia y el potencial de las nuevas tecnologías en la aviación y, en particular, el papel crucial de la inteligencia artificial y su rama de machine learning, en la investigación ambiental. La capacidad de estos enfoques tecnológicos para ofrecer insights detallados y precisos sobre temas ambientales es evidente, lo que enfatiza su importancia en la era actual donde el cuidado del medio ambiente es un asunto de creciente urgencia y atención. En conclusión, los resultados de esta investigación demuestran cómo la integración de tecnologías avanzadas en la aviación y el análisis de datos mediante técnicas de aprendizaje automático pueden proporcionar valiosas contribuciones en el estudio y gestión de cuestiones ambientales, especialmente en lo que respecta a la calidad del aire y las emisiones de CO₂ en zonas urbanas.

Imagen 48: Ilustración 14. Comparativa entre las estimaciones, mediciones reales y predicciones de CO₂



Fuente: Completamente generada por los autores, 2023.

4. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

El incremento en las operaciones aéreas en el Aeropuerto El Dorado conlleva un impacto significativo en la calidad del aire de Bogotá. Esta investigación ha permitido determinar que las localidades con una mayor frecuencia de sobrevuelos de aeronaves, como Usaquén y Barrios Unidos, así como las áreas adyacentes al aeropuerto, especialmente Fontibón y Kennedy, experimentan una notable degradación en la calidad del aire, siendo estas últimas las más afectadas con altas concentraciones de CO₂.

El uso del sistema ADS-B y la base de datos de rendimiento de aeronaves BADA, aunque originalmente no estaban destinados a este propósito, han demostrado ser herramientas valiosas para estimar las emisiones. La correlación de estos datos con las mediciones de IBOCA valida su precisión y utilidad.

La implementación del algoritmo de aprendizaje automático Random Forest ha demostrado ser eficaz para predecir las emisiones de CO₂ en diferentes áreas de Bogotá, basándose en variables como altitud, latitud, longitud y consumo de combustible. Esto brinda a las autoridades la posibilidad de identificar y mitigar potenciales deterioros en la calidad del aire, con el objetivo de proteger la salud de la población en las zonas afectadas.

Expandir esta investigación a otros aeropuertos en Colombia, especialmente aquellos ubicados en áreas densamente pobladas, y extender el estudio a otros contaminantes emitidos por las aeronaves, podría proporcionar una comprensión más completa del impacto ambiental de las operaciones aéreas, facilitando la implementación de medidas correctivas eficientes.

Es crucial implementar estrategias que mitiguen el impacto de las emisiones contaminantes de la aviación en áreas urbanas, como el uso de energías limpias, la optimización de rutas, la promoción del transporte sostenible y la investigación en eficiencia aerodinámica y materiales.

Aunque la aviación no contribuye mayormente a la huella de carbono global, se encuentra en constante evolución, buscando reducir su impacto ambiental. Un ejemplo destacado es la iniciativa de Airbus, que para 2035 busca desarrollar motores impulsados por hidrógeno, lo cual representaría un avance significativo en la reducción de emisiones contaminantes en el sector aéreo.



REFERENCIAS

- Bauen, A., Harris, A., Sim, C., Gudde, N., Prussi, M., & Scarlat, N. (2022). *CORSIA Lower Carbon Aviation Fuels: An Assessment of the Greenhouse Gas Emission Reduction Potential*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(22). <https://doi.org/10.3390/app122211818>
- Blei, D. M., & Smyth, P. (2017). *Science and data science*. En *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Vol. 114, Número 33). <https://doi.org/10.1073/pnas.1702076114>
- Carrasco, D. (2022). *Desarrollo de una interfaz para recepción, procesamiento y visualización de tramas ADS-B de aeronaves usando un módulo RTL-SDR*. *Escuela Politécnica Nacional*.
- Casado, R., Bermúdez, A., Hernández-Orallo, E., Boronat, P., Pérez-Francisco, M., & Calafate, C. T. (2023). *Pollution and noise reduction through missed approach maneuvers based on aircraft reinjection*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103574>
- Dietz, S. J., Kneringer, P., Mayr, G. J., & Zeileis, A. (2019). *Forecasting Low-Visibility Procedure States with Tree-Based Statistical Methods*. *Pure and Applied Geophysics*, 176(6). <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1914-x>
- Filippone, A., Parkes, B., Bojdo, N., & Kelly, T. (2021). *Prediction of aircraft engine emissions using ADS-B flight data*. *Aeronautical Journal*, 125(1288). <https://doi.org/10.1017/aer.2021.2>



REFERENCIAS

- Grossi, V., Giannotti, F., Pedreschi, D., Manghi, P., Pagano, P., & Assante, M. (2021). *Data science: a game changer for science and innovation. International Journal of Data Science and Analytics*, 11(4). <https://doi.org/10.1007/s41060-020-00240-2>
- Gui, G., Liu, F., Sun, J., Yang, J., Zhou, Z., & Zhao, D. (2020). *Flight delay prediction based on aviation big data and machine learning. IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(1). <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2954094>
- Indra. (2015). *SISTEMA ADS-B ATM*.
- Kumaş, K., Aksu, H. H., Anan, O., Akyüz, A., & Güngör, A. (2019). *Estimation of carbon dioxide emissions from airplanes: A case study of a turkish airport. AIP Conference Proceedings*, 2178(1). <https://doi.org/10.1063/1.5135441/773161>
- Lange, A., Sieling, J., & Gonzalez Parra, G. (2019). *Convergence in airline operations: The case of ground times. Journal of Air Transport Management*, 77, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.03.001>
- Maertens, S., Grimme, W., Scheelhaase, J., & Jung, M. (2019). *Options to continue the EU ETS for aviation in a CORSIA-World. Sustainability (Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205703>
- Nooelec. (s/f). *Nooelec - Nooelec NESDR SMARt v4 Bundle - Premium RTL-SDR w/ Aluminum Enclosure, 0.5PPM TCXO, SMA Input & 3 Antennas. RTL2832U & R820T2-Based. Recuperado el 20 de agosto de 2022, de https://www.nooelec.com/store/nesdr-smart.html*
- Nuic, A., Poles, D., & Mouillet, V. (2010). *BADA: An advanced aircraft performance model for present and future ATM systems. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 24(10). <https://doi.org/10.1002/acs.1176>
- Organización Aviación Civil Internacional. (2019). *DESTINATION GREEN The Next Chapter - 2019 Environmental Report Aviation and Environment*.
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2018). *MATERIAL DIDÁCTICO SOBRE UNA REGLAMENTACIÓN MODELO PARA ASISTIR A LOS ESTADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL CORSIA*.
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2019). *CORSIA PLAN DE COMPENSACIÓN Y REDUCCIÓN DE CARBONO PARA LA AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL - PLAN DE IMPLANTACIÓN*.
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2021). *Panorama de la Vigilancia dependiente automática - emisión (ADS-B OUT)*.
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2023). *Anexo 16 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional, Protección del medioambiente; Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA): Vol. IV (Segunda)*.
- Quadros, F. D. A., Snellen, M., Sun, J., & Dedoussi, I. C. (2022). *Global Civil Aviation Emissions Estimates for 2017–2020 Using ADS-B Data. Journal of Aircraft*, 59(6). <https://doi.org/10.2514/1.C036763>
- Sahin, O. (2019). *A proposed solution for airborne delays: Linear holding. Aeronautical Journal*, 123(1269). <https://doi.org/10.1017/aer.2019.78>
- Scheelhaase, J., & Maertens, S. (2020). *How to improve the global “Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation” (CORSIA)? Transportation Research Procedia*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.11.013>
- Schröer, C., Kruse, F., & Gómez, J. M. (2021). *A systematic literature review on applying CRISP-DM process model. Procedia Computer Science*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.199>



REFERENCIAS

- Secretaría Distrital de Ambiente. (s/f). Mapa de calidad del aire de Bogotá. Recuperado el 31 de marzo de 2023, de <http://iboca.ambientebogota.gov.co/mapa/>
- Strouhal, M. (2020). CORSIA - Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation. *MAD - Magazine of Aviation Development*, 8(1). <https://doi.org/10.14311/mad.2020.01.03>
- Sun, J. (2021). *The 1090 Megahertz Riddle A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals* (2a ed.).
- RESOLUCIÓN NÚMERO #02217 DE 26 OCT. 2023, (2023).
- Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil. (2018). *Generalidades para la aprobación de Aeronavegabilidad del Sistema ADS-B OUT*.
- Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil. (2023, enero 30). 2022: el año más representativo para la historia de la aviación en Colombia. <https://www.aerocivil.gov.co/prensa/noticias/Pages/2022,-el-ano-mas-representativo-para-la-historia-de-la-aviacion-en-Colombia.aspx>
- Williams, J. K. (2014). Using random forests to diagnose aviation turbulence. *Machine Learning*, 95(1). <https://doi.org/10.1007/s10994-013-5346-7>
- Xing, Y. F., Xu, Y. H., Shi, M. H., & Lian, Y. X. (2016). The impact of PM2.5 on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), E69. <https://doi.org/10.3978/J.ISSN.2072-1439.2016.01.19>
- Zhang, Z. (2018). Optimization performance analysis of 1090ES ADS-B signal separation algorithm based on PCA and ICA. *International Journal of Performability Engineering*, 14(4). <https://doi.org/10.23940/ijpe.18.04.p17.741750>