

# CIENCIA Y PODER AÉREO

Revista Científica de la Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana

ISSN 1909-7050 / E-ISSN 2389-9468 VOL. 19 N.º 2 | JULIO-DICIEMBRE 2024 | Pp. 1-146



ADASTRA

02

Vol. 19

Institución Universitaria, Resolución MEN No. 1906/Agosto 2002 / No. 21057 Noviembre/2016

Julio-diciembre del 2024 | pp. 1-146



[www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)





# **CIENCIA Y PODER AÉREO**

Revista Científica de la Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana  
ISSN 1909-7050 / E-ISSN 2389-9468 VOL. 19 N.º 2 | JULIO-DICIEMBRE 2024 | Pp. 1-146

## **Escuela de Postgrados de la FAC**

Director

CR. Giovanni Rojas Castro

Comandante Grupo Académico

TC. María Paula Mancera Perilla

Comandante Escuadrón de Investigación

TC. Leidy Diana Girón Hernández



## Ciencia y Poder Aéreo

Director | Director | Diretor  
MY. Germán Wedge Rodríguez Pirateque, Ph. D.

Editor Invitado | Guest Editor | Editor convidado  
William Arnulfo Aperador Chaparro  
Ph. D. en Ingeniería  
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia  
CvLAC

### Equipo editorial | Editorial team | Equipe editorial

Coordinación editorial | Editorial coordination | Coordenação editorial  
Mag. María Carolina Suárez Sandoval

Asistencia editorial | Editorial assistance | Assistência editorial  
Mag. Jenny Marcela Rodríguez

Corrección de texto | Copyediting | Revisor de textos  
Español: María Carolina Ochoa García  
Inglés: Gisella Arroyo

Traducción de contenidos | Content translation | Tradução de conteúdo  
Inglés: Sandra Alarcón  
Portugués: Gedma Alejandra Salamanca Rodríguez

Diseño y maquetación | Desing and layout | Design e layout  
Angélica Ramos Vargas

Corrección de sintaxis | Proofreading | Revisor de textos  
Karen Grisales

Foto de cubierta | Cover photo | Foto de capa  
Cortesía del equipo de diseño EPFAC

### Información técnica | Technical information | Informações técnicas

Volumen 19, n.º 2 | julio-diciembre 2024  
Periodicidad semestral  
ISSN 1909-7050  
E-ISSN 2389-9468  
DOI: <https://doi.org/10.18667/issn.1909-7050>  
Bogotá, Colombia 2024

## Comité editorial | Editorial Board | Comitê editorial

Carlos Lozano Rodríguez  
Ph. D. en Ciencias Físicas  
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, España  
ID Scopus

César Nieto Londoño  
Ph. D. en Ingeniería  
Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia  
CvLAC

Eduardo Mojica-Nava  
Ph. D. en Automatización e Informática Industrial  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia.  
ID Scopus <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26422453700>

Jerónimo Ríos Sierra  
Ph. D. en Ciencias Políticas  
Universidad Complutense de Madrid, España  
ID Scopus <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58251706000>

José M. García-Bravo  
Ph. D. en Ingeniería  
Purdue University, EE. UU.  
ID Scopus

Julián Sierra Pérez  
Ph. D. en Ingeniería Aeroespacial  
Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia  
CvLAC

Sergio Tobón Tobón  
Ph. D. en Modelos Educativos y Políticas Culturales  
Centro Universitario CIFE, México  
CvLAC

## Comité científico | Scientific Board | Comitê científico

Avid Roman-Gonzalez  
Ph. D. en Procesamiento de Señales e Imágenes  
Universidad Nacional Tecnológica De Lima, Perú  
ID Scopus

Daniel Viúdez-Moreiras  
Ph. D. en Ingeniería  
Instituto Nacional de Técnica AeroespacialThis link is disabled, España  
ID Scopus

Héctor Enrique Jaramillo Suárez  
Ph. D. en Mecánica de Sólidos  
Universidad Autónoma de Occidente, Colombia  
CvLAC

Hernán Paz Penagos  
Ph. D. en Educación  
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia  
CvLAC

Javier Alberto Pérez-Castán  
Ph. D. en Ingeniería Aeronáutica  
Universidad Politécnica de Madrid, España  
ID Scopus

Juan Manuel Martín-Sánchez  
Ph. D. en Ingeniería Industrial  
Universidad Nacional de Educación a Distancia – UNED, España  
ID. Scopus

## **Pares académicos | Academic peers | Pares académicos**

Alex Fernando Jiménez Vélez

Ph. D. en Ingeniería de Proyectos y Sistemas  
Fuerza Aerea Ecuatoriana, Ecuador

Alexander Alberto Correa Espinal

Ph. D. en Estadística e Investigación Operativa  
Universidad Nacional de Colombia

Andrés Calvillo Téllez

Ph. D. en Ciencias de la Educación  
Instituto Politécnico Nacional, Colombia

Eudaldo Enrique Espinoza Freire

Ph. D. en Ciencias Pedagógicas  
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Erika Ramírez Benítez

Mag. en Estrategia y Geopolítica  
Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto", Colombia

Hernán Darío Cerón Muñoz

Ph. D. en Ingeniería Mecánica  
Universidade de São Paulo (USP), Brasil

Jaime Alfonso Cubides-Cárdenas

Mag. en Derecho  
Universidad Católica de Colombia

Jonnathan Jiménez Reina

Mag. en Seguridad y Defensa Nacionales  
Escuela Superior de Guerra, Colombia

Jhonathan O. Murcia Piñeros

Ph. D. en Ingeniería y Tecnología Espacial  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

José Vili Martínez González

Ph. D. en Administración  
Ajedrez Consultores, México

Luini Leonardo Hurtado Cortés

Ph. D. en Ingeniería Automática  
Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Colombia

Marcelo Herrera Martínez

Ph. D. en Acústica  
Universidad de San Buenaventura, Colombia

Marianela Luzardo Briceño

Ph. D. en Estadística  
Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

Oscar Esneider Acosta Agudelo

Mag. en Acústica y Vibraciones  
Universidad San Buenaventura, Colombia

Pedro David Bravo-Mosquera

Ph. D. en Ciencias  
University of Sao Paulo, Brasil

Sergio Francisco Mora Martínez

Magíster en Ingeniería Electrónica  
Universidad ECCI, Colombia

Sergio Gabriel Eissa

Ph. D. en Ciencia Política  
Universidad de Buenos Aires, Argentina

Vladimir Balza Franco

Ph. D. en Administración  
Universidad del Magdalena, Colombia

## **Revista avalada por Publindex**

**Indexada en:** Redalyc, Catálogo Latindex 2.0,  
Latindex, DOAJ, EbscoHost, Redib, Dialnet, Rebiun,  
ErihPlus, Periódica, Sherpa Romeo, Google Scholar

---

## **Para suscripciones o canjes, diríjase a:**

### **Ciencia y Poder Aéreo**

✉ [cienciaypoderaaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaaereo@epfac.edu.co)  
(601) 2134698 Ext. 72500 - 72625  
Biblioteca Escuela de Postgrados de la FAC

### **Para mayores informes:**

Dirección postal | Mailing Address | Endereço postal  
Gra. 11 n.º 102-50 Edificio ESDEG, Escuadrón de Investigación  
Oficina 411. A.A.110111. Bogotá D.C., Colombia  
(601) 2134698 Ext. 72500 - 72625  
[www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)

---

# Contenido

## Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica

- 6-18 **Interdicción aérea, estrategia para mantener el control del espacio aéreo**  
Aerial interdiction, strategy to maintain control of airspace  
Interdição aérea, estratégia para manter o controle do espaço aéreo  
Milton Itzhak Littuma Larrea, Víctor Xavier Enríquez Champutiz
- 19-29 **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  
Danny Stevens Traslaviña Navarrete, Alec Mauricio Rosales Cabezas, Sergio Nicolás Madrid Farfán, Iván Felipe Rodríguez Barón, Cristian Lozano Tafur, Edison Jair Bejarano Sepúlveda,
- 30-45 **Diseño conceptual de un banco de pruebas de inyectores para motores a reacción**  
Conceptual design of a jet engine injector test bench  
Projeto conceitual de uma bancada de testes de injetores de motores a jato  
Luisa Fernanda Mónico Muñoz, Richard Giovanni Avella Sarmiento, Nicoll Andrea Montoya Garzón

## Tecnología e Innovación

- 46-57 **Dynamic analysis of rounded projectiles: Software solution development**  
Análisis dinámico de proyectiles redondeados:  
desarrollo de soluciones con *software*  
Análise dinâmica de projéteis arredondados:  
Desenvolvimento de solução de *software*  
Juan David Roa Camargo, Juan Pablo Ruiz Puente, Camilo Andrés Bayona Roa
- 58-68 **Comparative study of six antenna designs for receiving APT images from NOAA-19 in urban environments**  
Estudio comparativo de seis diseños de antenas para la recepción de imágenes APT NOAA-19 en entornos urbanos  
Estudo comparativo de seis projetos de antenas para recepção de imagens APT NOAA-19 em ambientes urbanos  
Hernán Paz Penagos, Esteban Morales Mahecha, Alejandro Páez Avendaño, Rubén Campos Riaño

69-80

**Dynamics of production of greenhouse gases in the sectors of steel production and vehicle production**

Dinámicas de producción de gases de efecto invernadero en los sectores de acero y de vehículos

Dinâmica de produção de gases de efeito estufa nos setores de produção de aço e de produção de veículos

Roberto Alfonso Montenegro Robles, Mayda Alejandra Calderón Díaz

81-94

**Arquitectura y diseño de *software* para picosatélites orientado al monitoreo y predicción del comportamiento de incendios forestales (CAFO-2019)**

Architecture and software design for picosatellites oriented towards monitoring and predicting forest fire behavior (CAFO-2019)

Arquitetura e design de *software* para picosatélites orientados ao monitoramento e previsão do comportamento de incêndios florestais (CAFO-2019)

Ricardo Andrés Santa Quintero, Brayan Ricardo Moreno Espinosa, Carlos Leonardo Adames Camargo

95-111

**Vigilancia tecnológica para la construcción de un equipo de almacenamiento y transporte de misiles**

Technology watch for the construction of missile storage and transport equipment

Vigilância tecnológica para a construção de equipamento de armazenamento e transporte de mísseis

Abdon Estibenson Uribe Taborda, Diego Alexander Muñoz Morales

112-121

**Inteligencia artificial para la creación de modelos 3D aplicados en un ambiente de realidad virtual**

Artificial intelligence for the creation of 3D models applied in a virtual reality environment

Inteligência artificial para a criação de modelos 3D aplicados em um ambiente de realidade virtual

Ricardo Andrés Santa Quintero, Carolina Andrea García Sarmiento, Juan Esteban Infante Andrade

122-134

**Aplicación de un modelo predictivo de consumo de combustible a partir de *machine learning* y *random forest* para una aerolínea comercial colombiana**

Application of a predictive fuel consumption model using machine learning and random forest for a Colombian commercial airline

Aplicação de um modelo preditivo de consumo de combustível usando *machine learning* e *random forest* para uma companhia aérea comercial colombiana

Pedro Fernando Melo Daza, Juan Andrés Bermúdez Gómez, Cristian Lozano Tafur, Sara Valentina González Medina, Samuel Fuentes Rodríguez

138-146

**Instrucciones para autores | Guidelines for Authors | Diretrizes para autores**

# Interdicción aérea, estrategia para mantener el control del espacio aéreo

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

## Milton Itzhak Littuma Larrea

<https://orcid.org/0009-0002-7287-2548>  
nomada47@yahoo.com

Magíster en Seguridad y Defensa  
Teniente coronel EM – Fuerza Aérea Ecuatoriana, Ecuador  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de Investigación: Academia de Guerra Aérea de la Fuerza Aérea Ecuatoriana

Master's Degree in Security and Defense  
Lieutenant Colonel EM – Ecuadorian Air Force, Ecuador  
Researcher's role: theoretical and writing  
Ecuadorian Air Force Air Warfare Academy Research Group

Mestrado em Segurança e Defesa  
Tenente-coronel EM – Força Aérea Equatoriana, Ecuador  
Papal do investigador: teórico e escritor  
Grupo de Investigação da Academia de Guerra Aérea da Força Aérea Equatoriana

## Víctor Xavier Enríquez Champutiz

<https://orcid.org/0000-0001-6211-8977>  
vxenriquez@gmail.com

Magíster en Ingeniería con especialidad en Sistemas de Calidad  
Teniente coronel EMT – Fuerza Aérea Ecuatoriana, Ecuador  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de Investigación: Academia de Guerra Aérea de la Fuerza Aérea Ecuatoriana

Master's Degree in Engineering with specialization in Quality Systems.  
Lieutenant Colonel EMT – Ecuadorian Air Force, Ecuador  
Researcher's role: Theoretical and writing  
Ecuadorian Air Force Air Warfare Academy Research Group

Mestrado em Engenharia com especialização em Sistemas de Qualidade.  
Tenente-Coronel EMT – Força Aérea Equatoriana, Ecuador  
Papal do investigador: teórico e escrito  
Grupo de Investigação da Academia de Guerra Aérea da Força Aérea Equatoriana

**Cómo citar este artículo:** Littuma Larrea, M. I. y Enríquez Champutiz, V. X. (2024). Interdicción aérea, estrategia para mantener el control del espacio aéreo. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 6-18. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.819>



## Interdicción aérea, estrategia para mantener el control del espacio aéreo

## Aerial interdiction, strategy to maintain control of airspace

## Interdição aérea, estratégia para manter o controle do espaço aéreo

**Resumen:** El presente artículo constituye un extracto del trabajo de investigación para la titulación de magíster en Seguridad y Defensa del Instituto de Altos Estudios Nacional (IAEN) del Ecuador, realizada en el año 2013. Estuvo basado en un estudio comparativo de cinco años (2007-2012) de las estrategias de interdicción aérea adoptadas por Colombia y Brasil en su lucha contra el narcotráfico. Estas han constituido una herramienta invaluable para negar el uso de su espacio aéreo, logrando una disminución considerable de aeronaves sospechosas en vuelo e inmobilizaciones de aeronaves en tierra, destrucción de pistas clandestinas y decomisos de droga y dinero. A partir de este análisis comparativo, el trabajo busca lecciones que permitan al Ecuador materializarla para obtener resultados similares en el marco del corporativismo<sup>1</sup> y la cooperación internacional.

**Palabras clave:** Estado; interceptación aérea; interdicción aérea; narcotráfico.

**Abstract:** This article is an excerpt from the research work for the Master's degree in Security and Defense at the National Higher Studies Institute (IAEN) of Ecuador, conducted in 2013. It was based on a comparative study over five years (2007-2012) of the aerial interdiction strategies adopted by Colombia and Brazil in their fight against drug trafficking. These strategies have been an invaluable tool for denying the use of their airspace, achieving a considerable reduction in suspicious aircraft in flight and immobilizations of aircraft on the ground, destruction of clandestine runways, and seizures of drugs and money. Based on this comparative analysis, the work seeks lessons that will allow Ecuador to materialize similar results within the framework of corporatism and international cooperation.

**Keywords:** State; aerial interception; aerial interdiction; drug trafficking.

**Resumo:** Este artigo é um extrato do trabalho de pesquisa para a obtenção do título de mestre em Segurança e Defesa no Instituto de Altos Estudos Nacionais (IAEN) do Equador, realizado em 2013. Foi baseado em um estudo comparativo de cinco anos (2007-2012) das estratégias de interdição aérea adotadas pela Colômbia e pelo Brasil em sua luta contra o narcotráfico. Essas estratégias têm sido uma ferramenta inestimável para negar o uso de seu espaço aéreo, alcançando uma redução considerável de aeronaves suspeitas em voo e imobilizações de aeronaves em solo, destruição de pistas clandestinas e apreensões de drogas e dinheiro. Com base nessa análise comparativa, o trabalho busca lições que permitam ao Equador obter resultados semelhantes no âmbito do corporativismo e da cooperação internacional.

**Palavras-chave:** Estado; interceptação aérea; interdição aérea; narcotráfico.

---

<sup>1</sup> El corporativismo se define como una doctrina política, social y económica que busca resolver los conflictos de interés mediante estructuras organizativas.

## Introducción

A decir de los autores de la escuela “realista”<sup>2</sup> de las relaciones internacionales, como Hans Morgenthau, Edward Carr, Henry Kissinger, Raymond Aron y Stanley Hoffmann, entre otros, el objeto primordial de los Estados radica en su propia seguridad. El Estado concebido de conformidad con el sistema internacional actual, heredero del modelo westfaliano (1648), es una persona jurídica que dispone de “la capacidad de emitir reglas jurídicas vinculantes” y otros instrumentos de poder como el militar, el político y el económico para defender sus elementos de población y territorio, y para “cumplir las funciones de integración y mantenimiento del orden social, así como la defensa de sus fronteras” (Vargas-Velázquez *et al.*, 2008, p. 9; Güell, 2010, p. 25). Con este fin, monopoliza el control de la violencia física, actuando con legitimidad, es decir, con aceptación social, lo que diferencia a un Estado de un grupo ilegal con capacidad coercitiva, “empleándose bajo los límites del Estado de Derecho y en un espacio territorial determinado” (Vargas-Velázquez, 2008, pp. 80-81), y con ello busca su supervivencia mediante la obtención y empleo del poder (Hoffmann, 1987, p. 92).

El poder de los Estados puede verse desafiado por otros pares, frente a lo cual Adam Smith promulga que la primera obligación del Soberano, entendido como el gobierno, es proteger a la sociedad contra la violencia y la invasión de otras sociedades independientes, por medio del empleo de la fuerza militar (Benítez-Manaut, 2005). Sin embargo, las amenazas pueden provenir de “actores no estatales a nivel regional o internacional que actúan como agentes transnacionales dotados de poder y con secretarías capaces de concretar iniciativas o ejercer control” (Hoffmann, 1988); es el caso de, por ejemplo, el terrorismo y el narcotráfico. Las estructuras e instituciones de los países,

e incluso del Sistema Internacional, no se habían diseñado para contrarrestar estas amenazas, en la medida en que su incidencia ha sido diferente en cada una de ellas, y ha hecho que la convivencia internacional se vuelva volátil, incierta, compleja y ambigua.

La persistencia de conflictos internacionales convencionales, como el ocasionado por Rusia y su invasión a Ucrania, la respuesta bélica contundente dada por Israel al grupo extremista Hamas en la franja de Gaza y la guerra contra el narcotráfico (especialmente en América), permiten identificar a los actores estatales y no estatales en un conflicto, así como calificarlos de externos e internos. Sin embargo, en el último caso mencionado esta identificación se perturba por cuanto se desarrolla en las fronteras y en el interior de los países, con lo que pasa a crearse el denominado conflicto “interméstico; es decir, [cuando] simultáneamente son internacionales y domésticos” (Vargas-Velázquez *et al.*, 2008). De tal modo, se evidencia un “cambio del paradigma de la seguridad en el mundo, donde la complejidad de actores crece de manera constante y donde las nuevas amenazas se multiplican” (Sauquillo, 2010). Todo ello contribuye al estado de confusión actual, resumido en el hecho de que cada vez es más difusa y variable la frontera entre defensa como amenaza externa y seguridad como amenaza interna (González, 1996), y el narcotráfico se encuentra en ambas esferas.

El narcotráfico se posiciona en el panorama geopolítico luego del fin de la Guerra Fría como fuente de financiamiento, y en algunos casos, permite el resurgimiento de las amenazas asimétricas y nuevas modalidades de conflicto no convencionales. En este contexto, la seguridad de los Estados se ve desafiada por actores difusos que operan al margen de las estructuras tradicionales. Según la Constitución Política de la mayoría de países del hemisferio occidental, las Fuerzas Armadas, al tener el monopolio legítimo de la fuerza, las enfrentan en el cumplimiento de su misión de preservar la soberanía e integridad territorial, mientras que la Policía Nacional se emplea en la protección interna y el mantenimiento del orden público, teniendo los militares profesionales de las Fuerzas Armadas la misión de neutralizar al enemigo (Rodríguez-Morales y Sánchez-David, 2005).

<sup>2</sup> A decir de Celestino del Arenal, las características esenciales, son: maximizar, mantener, expandir y demostrar el poder, lo que define al interés nacional identificado con la seguridad del Estado (Salomón-González, 2002). Debido a la existencia del poder y la lucha por alcanzar el poder, en el escenario internacional surge la inseguridad, ante la cual el Estado está llamado a proteger a la sociedad que alberga.

Bajo esa lógica de empleo del poder militar, se llevó a cabo esta investigación histórico-descriptiva que pretende responder la pregunta: ¿cómo la interdicción aérea en Brasil y Colombia ha modificado el tráfico aéreo ilícito asociado al narcotráfico? Se ha considerado el estudio de estos dos países, debido a que además de tener una relación de vecindad fronteriza extensa (incorpora áreas inaccesibles por tierra), comparten la problemática de la amenaza del narcotráfico: Colombia, por ser el principal productor y exportador mundial de cocaína “dada su condición bioceánica y su proximidad a las líneas de comunicaciones marítimas del Caribe y el Océano Pacífico”; y Brasil, al considerarse como “el segundo país con niveles de consumo de cocaína y crack de América, además es el principal país de tránsito de drogas hacia Europa, aprovechando su gran red fluvial amazónica, extensión del territorio y costa atlántica” (Arriagada y Hopenhayn, 2000, p. 17).

## El narcotráfico

El narcotráfico “surge como una actividad productiva y mercantil, de carácter internacional y al margen de la legalidad, desarrollada para la consecución del lucro personal y organizacional” (Vargas-Velázquez *et al.*, 2008, p. 25); y “su accionar tiene las características de una empresa transnacional que diversifica sus etapas de producción y de una organización de crimen internacional tipo mafia (González, 1996, p. 97), empleando gran cantidad de gente “para lavar dinero, proveer comunicaciones, seguridad y reclutar reemplazos” (Howard, 2011, p. 6).

Los narcotraficantes aprovechan la ausencia del Estado en ciertas zonas<sup>3</sup>, lo cual provoca que ellos “establezcan una red de lealtades en las comunidades establecidas proporcionando medios de subsistencia económica y seguridad” (Güell, 2010, p. 26). Así es

---

<sup>3</sup> Cuando se da la ausencia del Estado en un territorio, “la soberanía no puede ser ejercida en sus límites” (Foucault, 2009, p. 27); y, por ende, la seguridad no puede ser proporcionada. En estas condiciones, “el poder del Gobierno es desafiado” (Foucault, 2001, p. 45).

como desplazan al Estado en esos territorios. La expansión de la producción, el tráfico ilícito y el consumo de drogas constituyen un fenómeno que: amenaza seriamente la salud pública, pues involucra cada vez más a personas menores de edad; desestabiliza las instituciones del Estado debido a los niveles de corrupción de quienes las integran (Ayuso-Pozo, 2009); afecta los entornos ecológicos debido a la deforestación e invasión de áreas naturales protegidas (parques y reservas), erosionando, contaminando y reduciendo la biodiversidad de los sistemas naturales; y distorsiona la dinámica de la microeconomía de los Estados, al vincular en las operaciones financieras el lavado de activos y el comercio ilegal de insumos químicos. A su vez, patrocinan procesos de desestabilización al incorporar a la delincuencia común, al crimen organizado, a las guerrillas y a la subversión terrorista. Todo ello contribuye al posicionamiento negativo de la imagen internacional de los países (Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida Sin Drogas [Devida], 2012).

[...] Los ingresos brutos de los traficantes del tráfico de cocaína fueron de aproximadamente \$ 84 mil millones en 2009. Mientras que los agricultores andinos de coca ganaron cerca de \$ 1 mil millones, la mayor parte de los ingresos generados por la cocaína se concentró en América del Norte (EE.UU. \$35 mil millones), seguida por Europa Occidental y Central (EE.UU. \$26 mil millones). (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito [UNODC], 2011)

Por definición, los narcotraficantes son contrabandistas y, como tales, son expertos en utilizar los principios de innovación y sorpresa para ser mejores estrategias que sus adversarios (Howard, 2011). En virtud de las agrestes condiciones geográficas, de las limitaciones en la disponibilidad de medios tecnológicos para identificar dónde se produce la cocaína y del tránsito, el transporte aéreo es el medio más rápido y rentable para enviar cocaína y valores, a decir de Howard (2011), Lamberson (2007) y estudios presentados por la UNODC en 2008 y 2009. Los narcotraficantes, para llevar a cabo el transporte aéreo de la droga, utilizan en general los siguientes medios y procedimientos:

- Aviones monomotores o bimotores operados por un solo piloto, tipo Cessna y Caravan, que requieren distancias cortas para el despegue y aterrizaje. Se les acondicionan tanques adicionales de combustible para incrementar su autonomía en hasta diez horas de vuelo, que en promedio permiten volar largas distancias como mil millas náuticas o 1800 kilómetros (Observatorio de Drogas de Colombia, 2006, p. 159). Los costos de operación son bajos y disponen de gran capacidad de carga; por ejemplo, el precio de un avión es de aproximadamente USD 400 000 y está en condiciones de transportar USD 20 millones o una carga que rara vez supera los 600 kilos de cocaína (Littuma-Larrea, 2013; Jiménez, 2012).
- Almacenamiento de pasta base de cocaína cerca de las pistas de aterrizaje, traslado justo antes de la hora de recogida, embarque y despegue en tiempo de respuesta no mayor a cinco minutos.
- Métodos de envío con patrón similar, variando itinerarios por capacidad de carga y urgencia.
- Vuelo con origen legal, cometiendo actividades ilícitas dentro o fuera del país.
- Lanzamiento de droga mediante vuelo rasante.
- Operación aérea aprovechando los fenómenos de tiempo presente como poca visibilidad y escasa luminosidad, y las limitaciones de equipamiento de las aeronaves y la cobertura radar de las Fuerzas Aéreas.
- Tráfico de combustible, adquirido a empresas responsables del suministro.
- Las aeronaves tienen periodos de uso. Las dejan estacionadas en aeropuertos enfriándolas por uno o dos meses (por lo cual se presume complicidad de las autoridades) para después nuevamente salir a realizar vuelos ilegales, o en su defecto las abandonan o incineran.
- Rutas aéreas bidireccionales entre países productores y/o consumidores, empleadas también para transportar insumos, valores, documentos falsos y para incurrir en otros delitos como la trata de personas y el tráfico de armas (Littuma-Larrea, 2013).
- Cuando la tripulación del avión se da cuenta de que no es factible evadir con éxito a la Fuerza de

Reacción Inmediata del arma aérea del Estado o a las autoridades policiales en tierra, se deshacen de la cocaína para evitar su captura o inician maniobras que desencadenan temerarias persecuciones que muchas veces terminan en tragedias aéreas.

- Los pilotos completan su misión y regresan casi siempre en vuelo comercial a los lugares desde donde se tiene que iniciar un nuevo periodo de transporte, pero si llegan a ser detenidos, al poco tiempo recuperan su libertad.

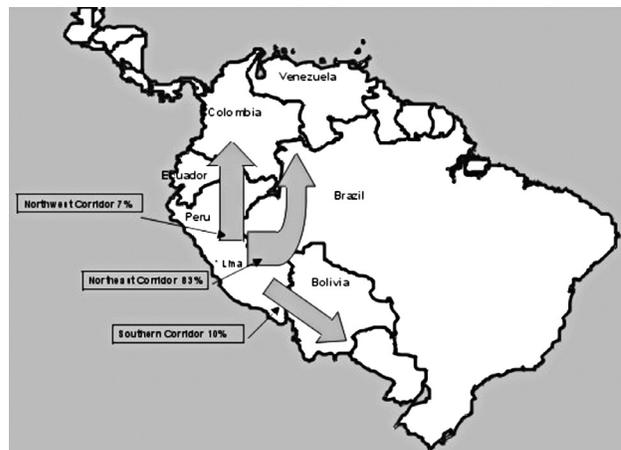


Figura 1. Corredores de tránsito de cocaína de Perú y Brasil hacia laboratorios de Colombia

Fuente: Lamberson (2007).

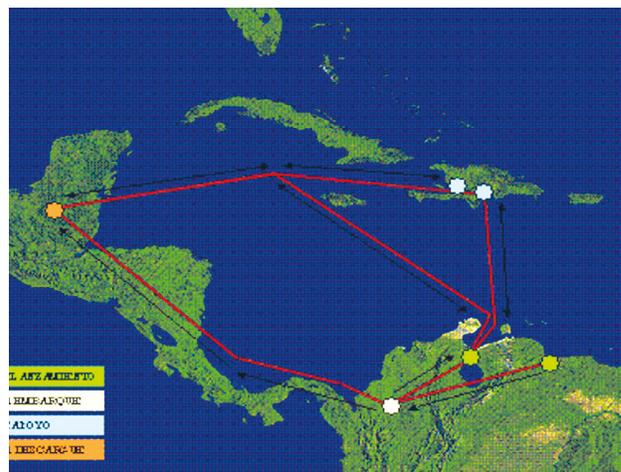


Figura 2. Rutas de tránsito de cocaína desde Colombia y Venezuela hacia México, Centroamérica y el Caribe

Fuente: Littuma-Larrea (2013).

De esta manera, “el cultivo de una planta tradicional se convirtió en un hecho ilícito y con ello floreció una economía ilegal” (Ayuso-Pozo y Beltrán, 2007, p. 13) de carácter internacional, debido a la separación de los centros de producción y de procesamiento, los laboratorios clandestinos, los consumidores y el lavado de dinero a través del sistema financiero internacional. La multiplicidad de vías para el transporte de la droga, a través de diferentes países, ha hecho que los Estados se vean obligados a utilizar todos los medios del poder nacional y, como parte de ello, el poder aéreo, para reducir la operación de estas aeronaves (Pizarro, 1990).

## Guerra las contra drogas y la interdicción aérea

La cronología de la política de lucha contra el narcotráfico en los Estados Unidos, y que se irradiaría hacia el resto de América, inició en 1973 durante el gobierno del presidente Nixon, “cuando estableció la Administración de Control de Drogas (DEA)” (Howard, 2011, p. 6); en 1986 el presidente Reagan firmó “la Directiva de Decisión de Seguridad Nacional (NSSD) Número 221 [que] identificó al narcotráfico como una de las amenazas a la seguridad nacional de Estados Unidos” (González, 1996, p. 97). En 1989 el presidente George Bush (padre) designó al “Departamento de Defensa (DOD) como la principal agencia para el monitoreo y la detección del transporte de drogas ilícitas en el hemisferio defendiendo la lucha contra las drogas en términos militares” (Roncken, 2004, p. 15); y en 1996 el presidente Clinton catalogó la lucha contra el narcotráfico “como una prioridad de seguridad nacional” (Serrano y Toro, 2005, p. 57), motivo por el cual “se destacaron dos programas que recibirían una especial atención en los años posteriores: la erradicación de cultivos ilícitos y la interrupción del puente aéreo (Air Bridge Denial)” (Roncken, 2004, p. 18).

La intervención de Estados Unidos en los países de la región andina (considerados productores) y en el resto de países de Centroamérica y Sudamérica (considerados de tránsito y consumidores) “se planteó en

términos de seguridad nacional y dentro de esta lógica bajo su control” (Ayuso-Pozo y Beltrán, 2007, p. 24), con lo que pasó “de una ausencia de control a un régimen de lucha frontal contra estas, encarnada en estrategias prohibicionistas y altamente represivas” (Uprimny y Guzmán, 2010). Siguiendo este direccionamiento político, la interdicción aérea se ha venido realizando en el dominio aéreo a través de las misiones de interdicción destinadas a perturbar, disuadir de sus propósitos o destruir el narcotráfico (Krieger, 2015), cumpliéndose en seis etapas fundamentales (Roncken, 2004):

- Suministro de información de inteligencia a los organismos antidrogas sobre un transporte de drogas planificado o en camino (*provision of intelligence*);
- Los radares en tierra: ROTHR, TRAS, GMR y de otros tipos detectan a las aeronaves sospechosas (*initial detection*);
- Aviones grandes con radar como los E-3 y medianos como los P-3 ubican el blanco (aeronave considerada como sospechosa) y siguen su curso (*monitoring*);
- Los aviones interceptores como los F-15, F-16 y los Citation 550 ubican e identifican visualmente el blanco, haciendo distinción entre tráfico lícito y tráfico de drogas (*identifying*);
- La responsabilidad para la acción se pasa a las agencias autorizadas para interceptar, detener e incautar (*handoff*);
- Las agencias estadounidenses autorizadas o los funcionarios de otros países realizan la interdicción al traficante (*apprehending*)

En las etapas 4 y 5, la maniobra de interdicción aérea “está regida por los reglamentos y directrices administrativas de los Estados en cumplimiento del Convenio sobre Aviación Civil Internacional” (Dirección General de Aviación Civil Ecuador, 2012, p. 49), considerando que la trayectoria de la aeronave interceptora debe evitar el peligro de colisión o que su estela turbulenta no induzca a una pérdida de control de la aeronave interceptada. Debe abstenerse del empleo de armas, cuidando que los movimientos dispuestos a la

aeronave interceptada estén dentro de su rendimiento operacional, y que cuando se proporcione guía de navegación, se lo haga procurando condiciones meteorológicas óptimas en ruta y considerando suficiente remanente de combustible y espacio de maniobra apropiado para el circuito de aterrizaje, retacada o aproximación frustrada (Internet Flight Information Service [IFIS], s. f.; Dirección General de Aviación Civil Ecuador, 2012). Por su parte, el piloto al mando de una aeronave interceptada deberá cumplir las instrucciones verbales o visuales dadas por el piloto del avión interceptor, independientemente de si se encuentra en su país de origen o en espacio aéreo de un Estado extranjero. Sin embargo, el piloto de la aeronave no cooperante, a sabiendas de que está desarrollando una actividad ilegal, podría eludir, tomar acciones agresivas o ignorar las instrucciones, conociendo que los convenios internacionales no autorizan a los pilotos de la aeronave interceptora a dispararles, excepto a identificarlos y a escoltarlos.

En vista de lo anterior, en Sudamérica Estados como Colombia, Perú y Brasil disponen de una ley denominada Ley del Derribo o del Abate, la cual permite el ejercicio pleno de la soberanía nacional de los Estados en el espacio aéreo, ante la presencia de una aeronave declarada como hostil, con lo que se faculta el derribo por desobediencia o inobservancia de las instrucciones recibidas, en cumplimiento de un protocolo establecido previamente en el más alto nivel político-militar de cada país.

Los resultados que se pueden obtener de la interdicción aérea, a decir del gobierno de los Estados Unidos, pueden medirse a través del número de toneladas interceptadas; aunque según Stephen Howard, “estas son una medida falsa para la guerra contra las drogas, al igual que la cuenta de bajas lo fue en la Guerra de Vietnam” (2011, p. 10). Una forma de advertir el impacto de la interdicción contra el narcotráfico es analizar la frecuencia de operaciones ilícitas que se da en los espacios terrestre, marítimo y aéreo<sup>4</sup>; pero dado que

<sup>4</sup> En Perú, las autoridades antidrogas desarrollaron durante seis meses un monitoreo de tránsito aéreo para establecer un patrón de vuelos ilícitos. Una vez que empezaron a aplicarse las operaciones antidrogas Support

los controles no logran ser permanentes, los envíos se van a realizar por las vías sobre las que menos presión se ejerza<sup>5</sup>. Aunque las misiones de interdicción aérea, que permiten mantener el control del espacio aéreo, no van a resolver el complejo fenómeno social del consumo de drogas, juegan un papel importante en la estrategia contra las drogas en general (Lamberson, 2007), y cuando están bien planificadas y adecuadas a la realidad y a las leyes del país en el que se ejecutan, se pueden conseguir resultados positivos tales como los siguientes (Céspedes, 1991):

- Impedir las constantes incursiones del espacio aéreo que afectan la soberanía del Estado y su integridad territorial.
- Reducir la comercialización, el consumo y por ende disminuirá el nivel de violencia social.
- Garantizar la estabilidad del régimen democrático.
- Mejorar la imagen internacional, lo cual repercutirá en el tratamiento que reciben los compatriotas fuera de las fronteras.
- Reducir los problemas emergentes del desequilibrio ecológico que ocasiona la producción de sulfato base de cocaína, los efectos que producen los residuos de químicos en los pisos ecológicos más aún cuando utilizan el glifosato para destruir cultivos, dañando el medio ambiente y la naturaleza.

## Resultados de la interdicción en Colombia y Brasil

“El narcotráfico de la cocaína en América Latina, [...] concentra en la región la totalidad de producción global de hoja de coca, pasta base de cocaína y clorhidrato

---

Justice y Laser Strike, se volvieron a comparar y se concluyó que existía un impacto significativo cerrando el flujo de transbordos aéreos de drogas ilícitas hacia Colombia (Lamberson, 2007).

<sup>5</sup> Cuando los carteles comenzaron a traficar la cocaína, su primer medio de transporte fue por avión. A medida que la vigilancia y la interdicción aérea se hicieron más eficaces, los narcotraficantes cambiaron su *modus operandi* a rutas más elaboradas e indirectas concebidas para evadir la intercepción, el decomiso y el encarcelamiento (Howard, 2011, p. 10).

de cocaína del mundo” (Arriagada y Hopenhayn, 2000, p. 5). Y también concentra: el empleo de la interdicción aérea como herramienta del poder militar aéreo que operacionaliza de interceptación aire-aire para la identificación y el seguimiento de aeronaves declaradas como sospechosas por los servicios de control de tránsito aéreo; el bombardeo para la erradicación de cultivos ilícitos; y la destrucción de infraestructura aeronáutica, redes de comando, control y comunicaciones, laboratorios y centros de almacenamiento ubicados en áreas de muy difícil acceso por vías fluvial o terrestre. Estas acciones se vinculan directamente en la coyuntura política, económica, social y militar de la realidad Sudamericana.



Figura 3. Avioneta monomotor Cessna 206 en la que se decomisaron 250 kilos de alcaloide de cocaína

Fuente: Periódico *Perú 21* (Perú).



Figura 4. Avioneta bimotor PA en pista clandestina

Fuente: Periódico *El Heraldo* (Honduras).

Colombia y Brasil, conscientes de que el crimen organizado no reconoce fronteras para su accionar, se han visto obligados a estructurar en sus legislaciones nuevas medidas jurídicas, a reorganizar sus instituciones y a adoptar estrategias tendientes a neutralizar el

fenómeno del narcotráfico, que está afectando la gobernabilidad, la democracia y el desarrollo de sus países (Coimbra, 2012). Tales acciones han favorecido el paulatino ingreso de las Fuerzas Armadas en el desarrollo de actividades llamadas “operaciones militares no tradicionales, entre otras las de interdicción en la lucha contra el narcotráfico” (Soberón-Garrido, 2001).

## Caso Colombia

Colombia realiza operaciones de interdicción aérea gracias a la modernización de las Fuerzas Armadas, con el empleo de tácticas de helicoportado con capacidad de combate nocturno y de fuego desde el aire (Vargas-Velázquez, 2008, p. 176). Esto lo ha efectuado en cooperación con otros países desde 2003, cuyos procedimientos están sujetos al Acuerdo Air Bridge Denial (Negación del Puente Aéreo), bajo la estricta aplicación de las normas establecidas en materia de derechos humanos y derecho internacional de los conflictos armados, y de las reglas aplicadas a la aviación civil internacional (Comisión Interamericana para el Control del Abuso Drogas [Cicad] y Secretaría de Seguridad Multidimensional [SSM], 2010), relativas al programa de supresión de tráfico ilícito aéreo de estupefacientes y sustancias sicotrópicas, con los siguientes resultados:

- Incremento de la capacidad de vigilancia de su espacio aéreo, identificando tres zonas de tránsito aéreo ilegal (Observatorio de Drogas de Colombia, 2006, p. 143).
- Establecimiento de rutas y horarios por lo general nocturnos, al sustituir el paradigma de derribar aeronaves para limpiar su espacio aéreo por la de realizar la incautación de las aeronaves para obtener información que permita generar inteligencia (Fuerza Aeroespacial Colombiana [FAC], 2006).
- Negación de uso del espacio aéreo, siendo así el factor cuantitativo de neutralizaciones e inmovilizaciones como un resultado residual del proceso de interdicción; y lo que vendría a ser la consecuencia más importante y directa de este mismo proceso es la variación porcentual en la reducción del problema (entiéndase como

problema la detección de movimientos aéreos sospechosos) (Observatorio de Drogas de Colombia, 2006, p. 139).

- Inmovilización de 65 aeronaves, en el año 2009, por contravenciones a la Resolución 24 de la Dirección Nacional de Estupefacientes (Cicad y SSM, 2010, p. 114).
- Inutilización de pistas mediante misiones de bombardeo y judicialización a los propietarios de los predios en las que se encuentran, además de los propietarios de las empresas a las que pertenecen las aeronaves incautadas y al personal de pilotos y de apoyo a las operaciones de vuelo.

Tabla 1.  
Vuelos sospechosos en Colombia

Año	Promedio de vuelos sospechosos	Observación
Antes de 2001	200	Reactivación del Plan de Interdicción Aérea con Estados Unidos.
2004-2005	Decremento del 28 % en los movimientos sospechosos.	Actividades de seguimiento, presión y en ocasiones neutralización.
2003-2004	Incremento del 89 % en este mismo tipo de movimientos.	
2006	Sin datos.	Detección de desplazamiento notorio del problema del tráfico aéreo ilegal hacia fronteras (Observatorio de Drogas de Colombia, 2006, p. 111).
2008-2012	El espacio aéreo colombiano se "limpió", trasladándose de su país a la frontera con Venezuela.	Derribos en el aire y obligaciones de aterrizar que terminaron en incautaciones de las aeronaves en tierra.

Fuente: Observatorio de Drogas de Colombia (2006, p. 139).

## Caso Brasil

Entre las opciones prioritarias que adoptó Brasil para neutralizar el narcotráfico están: la transformación de sus Fuerzas Armadas, el diseño de la cooperación interinstitucional y la Ley del Abate (sancionada en 1986 y reglamentada en 2004 como medida de coerción). Esta última opción integró una política de Estado de lucha contra las drogas, con lo cual dispuso un instrumento

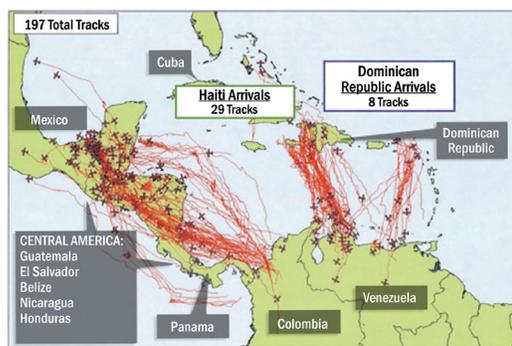


Figura 5. Situación de trazas sospechosas en Colombia, año 2003

Fuente: Drug Cartel Awareness (s. f.).

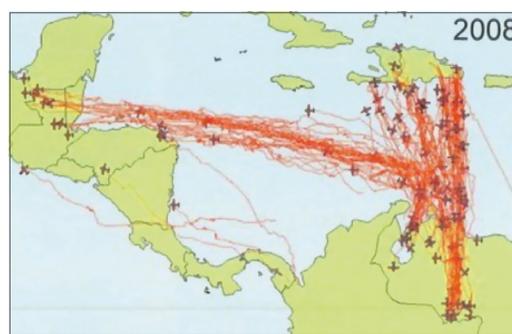


Figura 6. Trazas de tráfico aéreo ilícito, año 2008

Fuente: Drug Cartel Awareness (s. f.).

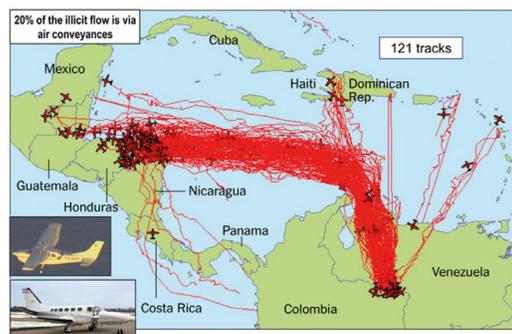


Figura 7. Trazas de rutas ilegales aéreas que parten de Venezuela, año 2009

Fuente: Drug Cartel Awareness (s. f.).

jurídico para obligar a los pilotos interceptados a acatar las indicaciones de los interceptores, y permitió obtener una variación en el cuadro de situación aéreo. En algunos sectores se dio de manera paulatina, como en la región suroeste del país en su límite con Paraguay, ya que de doce vuelos ilegales por día se pasó a ocho por día. Mientras que en determinadas zonas (por ejemplo,

en Capitán Bado) el cambio fue contundente, ya que si antes de la ley se podían visualizar de veinte a treinta vuelos diarios con cargas ilegales, desaparecieron en su totalidad. No obstante, todavía hay sectores donde los vuelos ilegales no han podido ser erradicados<sup>6</sup> (Gauch y Rauber, 2006, p. 106). Además, la Fuerza Aérea Brasileña (FAB) entre los años 2001 y 2006 destruyó un total de 85 pistas clandestinas<sup>7</sup> en la región de la Amazonía, todas con cargas de dinamita (Gauch y Rauber, 2006, p. 125).



Figura 8. Pista clandestina inutilizada por bombardeo de aviones FAF  
Fuente: Portal de noticias Diálogo Américas.

Si bien es cierto que el narcotráfico no ha podido ser exterminado, la experiencia de emplear la interdicción aérea en Colombia y Brasil evidencia la efectividad de este tipo de operaciones militares, cuyo objetivo es neutralizar la amenaza que representa el narcotráfico en estos países. El empleo del poder militar bajo el pensamiento realista de las relaciones internacionales reduce el envío y la recepción de suministros para la producción de drogas, armas y valores, afectando el desarrollo de este negocio ilícito.

<sup>6</sup> Por ejemplo, el 27 de noviembre de 2005, aviones caza de la FAB hicieron aterrizar a una avioneta monomotor, sin identificación, pero equipada con GPS y TE-Satelital, cargada con 57 kilos de cocaína, en una “pista clandestina” localizada en Tupiratins, estado de Tocantins, Brasil (Gauch y Rauber, 2006, p. 124).

<sup>7</sup> Generalmente, las pistas tienen de largo de 600 a 1000 metros y un ancho de 25 a 30 metros, la mayoría han sido abiertas en la selva por grupos de pilotos (mecánicos y jornaleros), de forma cooperativa, en unos casos destinadas para la operación y en otros para reabastecimiento de combustibles (Gauch y Rauber, 2006, p. 125).

## Caso Ecuador

La evolución de las amenazas para la seguridad de los Estados, con manifestaciones de violencia social, ha obligado en el caso ecuatoriano a que se analice el empleo de sus Fuerzas Armadas en apoyo de la Policía Nacional. Por tal razón, deberían contar con capacidades estratégicas y un marco doctrinario en el cual se establezca el modo de empleo y los medios necesarios para enfrentar al narcotráfico, considerando que los blancos no son tan visibles o identificables como en una guerra convencional. Entonces, se hace imprescindible formular una estrategia que involucre a todas las instituciones del Estado para responder a la situación actual y que cuente con el apoyo del nivel político-estratégico en su aplicación.

Dado lo complejo del proceso en el cual se desarrolla una misión de interdicción, y para la eficiente ejecución de sus etapas, se requiere un empleo sinérgico e integral entre los organismos jurisdiccionales y operacionales (Fuerzas Armadas y Policía Nacional), así como de todos aquellos que intervengan en el proceso interestatal, observando el marco de derecho positivo y adjetivo interno. En consecuencia, es fundamental que se incentive la profesionalización de expertos civiles y militares, a fin de generar las capacidades suficientes para la judicialización de los delitos configurados en el uso de aeronaves no cooperantes en el tráfico de sustancias sujetas a fiscalización. En todas las etapas de este proceso, el elemento humano se configura como el agente de empleo más importante, ya que se debe controlar, supervisar y evaluar permanentemente el desempeño individual y de equipo, teniendo presente que mientras cumplan sus funciones en la institución o una vez que se acojan al retiro no sean convencidos de formar parte de las estructuras delincuenciales organizadas transnacionales.

La estrategia a implementar debe prever la instrumentalización jurídica de un acuerdo de cooperación multinacional, mediante el cual se operacionalice un sistema de vigilancia de largo alcance y alerta temprana, que se complemente con el sistema de mediano y corto alcance establecido en el interior de las

fronteras nacionales, lo cual permite materializar el cumplimiento de las misiones de interdicción aérea que neutralicen las aeronaves no cooperantes utilizadas por el crimen organizado transnacional. Con este intercambio de información, el sistema de vigilancia y control del espacio aéreo debe contar con radares de mediano alcance en tierra o en el aire, de tipo móvil o fijo, a fin de alcanzar toda la capacidad de apoyo al cumplimiento de una misión de interceptación para su inmediata identificación y reconocimiento en vuelo. Al mismo tiempo, los funcionarios del Ministerio Público se dirigirán al lugar donde se realizó la neutralización de la aeronave en vuelo, o pista controlada o no controlada, para la aprehensión correspondiente, de acuerdo con el protocolo determinado en la norma.

Para el empleo del poder aéreo en las misiones de interdicción, se requiere la complementariedad de un sistema de inteligencia y de protocolos de cooperación organizacional nacional e internacional, definiendo los niveles de coordinación y subordinación mediante un sistema de mando y control, como se visualiza en el esquema de la Figura 9.

## Conclusiones

Pese al avance de la civilización y a la generación de instrumentos legales internacionales que permitan una convivencia pacífica, la guerra sigue asolando a la humanidad y se suma el surgimiento de conflictos no convencionales generados por nuevas amenazas. Por eso, el rol de protección del Estado sigue vigente y para ello debe emplear los instrumentos de poder de los que disponga, como el político, el económico y el militar, entre otros.

El empleo del poder militar como instrumento en la lucha contra el narcotráfico y la interdicción aérea para neutralizarlo en este dominio obedece a la voluntad política para su uso, sorteando las premisas de que las Fuerzas Armadas, acorde a los marcos constitucionales, existen solo para enfrentar conflictos convencionales en los que se dispute un grado de control del territorio, con la intención de continuar con sus operaciones ofensivas o defensivas de conformidad con el estado final deseado planteado por el estamento

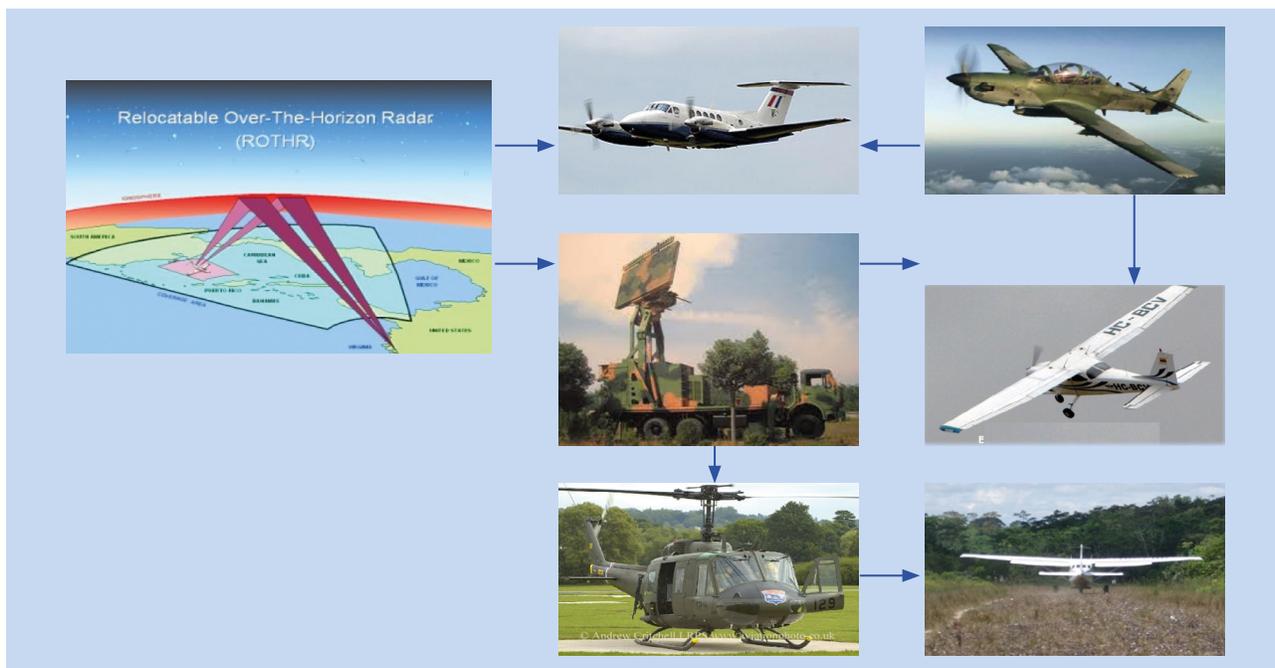


Figura 9. Estrategia operacional

Fuente: Littuma-Larrea, fotografías fuentes abiertas de la red.

político. De ahí que los limitados recursos estatales y las innovaciones que realiza el narcotráfico para llevar a cabo su empresa obligan a los Estados a modificar sus cuerpos legales, a actualizar su doctrina y a emplear sus capacidades para neutralizarlas, intensificando la cooperación internacional para ello.

La interdicción aérea en Colombia, inicialmente, se centró en el derribo de aeronaves en tránsito ilícito, aprovechando la existencia de una ley para ello, que años más tarde también sería aprobada en Brasil. Sin embargo, se determinó que el seguimiento de estas permitió la identificación de rutas y emplazamientos en tierra de almacenamiento de droga y soporte logístico para la operación aérea, lo cual también contribuyó al establecimiento de responsabilidades de los propietarios de los terrenos en las que se llevaban a cabo las actividades ilícitas.

La estrategia de interdicción aérea incluye la colaboración interinstitucional nacional y la cooperación internacional, en los ámbitos operativo, logístico, económico y legal, para que la Fiscalía, la Policía Nacional, el servicio de aduanas, el Ministerio de Salud y el servicio de migración, entre otros, junto a las Fuerzas Armadas, conformen un bloque de seguridad que procedimentalmente neutralice todas las aristas del narcotráfico.

Ecuador debe implementar las estrategias de interdicción aérea que han dado resultado en Colombia y en Brasil, así como las lecciones aprendidas de otros países de la región que comparten la problemática del narcotráfico, y que tiene como aliado principal en esta lucha a los Estados Unidos, para que este negocio ilícito no erosione las bases del Estado y destruya a su sociedad civil.

## Referencias

- Arriagada, I. y Hopenhayn, M. (2000). *Producción, tráfico y consumo de drogas en América Latina*. Publicaciones de la Cepal.
- Ayuso-Pozo, A. (2009). Dificultades para un régimen multilateral efectivo contra el narcotráfico en la zona andina. *Seguridad multidimensional en América Latina* (F. Rivera, ed.; pp. 279-306). Flacso Ecuador.
- Ayuso-Pozo, A. y Beltrán, S. (Eds.). (2007). *Construyendo una zona andina de paz: entre la cooperación y el conflicto*. Bellaterra.
- Benítez-Manaut, R. (2005). Las relaciones civiles-militares en una democracia: releendo a los clásicos. *Revista Fuerzas Armadas y Sociedad*, 19(1), 153-168.
- Buzan, B. y Waeber, O. (2003). *Regions and Powers: The Structure of International Security*. Cambridge University Press.
- Céspedes, J. (1991). *Los efectos de la interdicción en los organismos nacionales de seguridad y en la institucionalidad del Estado boliviano*. SEAMOS.
- Coimbra, L. O. (2012). El involucramiento de las Fuerzas Armadas en actividades de seguridad en las Américas. *URVIO: Revista Latinoamericana de Estudios de Seguridad*, (12), 127-140. <https://doi.org/10.17141/urvio.12.2012.1172>
- Comisión Interamericana para el Control del Abuso Drogas (Cicad) y Secretaría de Seguridad Multidimensional (SSM). (2010). *Brasil. Evaluación del progreso de control de drogas 2007-2009*. Organización de los Estados Americanos. <https://tinyurl.com/yppbdp8e3>
- Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida Sin Drogas (Devida). (2012). *Estrategia Nacional de Lucha contra las Drogas 2012-2016*. Devida. <https://tinyurl.com/y8dtr9dz>
- Dirección General de Aviación Civil Ecuador. (2012). *Reglamento DGAC. Reglas de Vuelo y Operación General*. DGAC Ecuador.
- Drug Cartel Awareness (s. f.). *South America Drug Trade* [en línea]. <https://tinyurl.com/36dzk632>
- Elster, J. (1995). *Tuercas y tornillos: una introducción a los conceptos básicos de las ciencias sociales*. Gedisa.
- Foucault, M. (2001). *Defender la sociedad*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica de Argentina.
- Foucault, M. (2009). *Seguridad, Territorio, Población*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica de Argentina. S.A
- Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC). (2006). *Programa Bilateral de Interdicción Aérea*. FAC.
- Gauch, G. G. y Rauber, G. (2006). *Anuario narcotráfico 2005*. Observatorio Provincial de Drogas.
- González, J. (1996). El narcotráfico y la participación de las Fuerzas Armadas. *Colección*, (4), 95-104. <https://tinyurl.com/3zbzr388>
- Güell, P. (2010). *Derecho internacional público*. Tecnos.
- Hobsbawm, E. (2006). *Guerra y paz en el siglo XXI*. Crítica.
- Hoffmann, S. (1987). *The Calculus of National Interest: American Foreign Policy in the Age of Realistic Diplomacy*. McGraw-Hill.

- Hoffmann, S. (1988). *Orden mundial o primacía: la política exterior norteamericana desde la guerra fría*. Grupo Editor Latinoamericano.
- Howard, S. (2011). La guerra militar contra las drogas: demasiados recursos, muy pocos resultados. *Air & Space Power Journal*, 23(1).
- Internet Flight Information Service (IFIS). (s. f.). ENR 1.12 Interceptación de Aeronaves Civiles [en línea]. <https://tinyurl.com/6uf3t8pn>
- Jiménez-Leal, G. (2012, octubre 27). Las grandes 'narcorrutas' ya no están en Colombia. *El Tiempo* [en línea]. <https://tinyurl.com/5xvd5e8v>
- Krieger, C. R. (2015). La interdicción aérea. *Air & Space Power Journal*, 27(2).
- Lamberson, E. (2007). *Transportación aérea y la industria de la cocaína*. Newsweek, (150).
- Littuma-Larrea, M. I. (2013). *Interdicción aérea en Brasil y Colombia y su incidencia en el tráfico aéreo ilícito asociado al narcotráfico 2001-2011: consideraciones para Ecuador* (tesis de maestría, Instituto de Altos Estudios Nacionales). <https://tinyurl.com/5f2uzpwc>
- Observatorio de Drogas de Colombia. (2006). *Acciones y resultados. Resultados operativos 2005*. Ministerio del Interior y de Justicia.
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). (2011). *Informe Mundial sobre las Drogas 2011*. Publicación de las Naciones Unidas. <https://tinyurl.com/4j796vjh>
- Pizarro, E. (1990). Evaluación de la cooperación internacional para combatir el narcotráfico. *Cuadernos de Política Exterior* (R. Arcos, ed.; pp. 33-52). Instituto Latinoamericano de Investigaciones Sociales. [https://doi.org/10.48713/10336\\_11777](https://doi.org/10.48713/10336_11777)
- Roncken, T. (2004). *La lucha contra las drogas y la proyección militar de Estados Unidos: centros operativos de avanzada en América Latina y el Caribe*. Abya Yala.
- Rodríguez-Morales, F. A. y Sánchez-David, R. (2005). Una aproximación al estudio de la seguridad. *Ensayos Sobre Defensa y Seguridad*, 2, 79-114. <https://tinyurl.com/958wfkdh>
- Salomón-González, M. (2002). La teoría de las Relaciones Internacionales en los albores del siglo XXI: diálogo, disidencia, aproximaciones. *Revista CIDOB d'Afers Internacionals*, (56), 7-52. <https://tinyurl.com/45mtdbhd>
- Sauquillo, F. (2010). La seguridad humana más allá de la violencia. *Los actores no estatales y la seguridad internacional: su papel en la resolución de conflictos y crisis* (Secretaría General Técnica Ministerio de Defensa, ed.; pp. 149-152). Centro de Publicaciones Ministerio de Defensa.
- Serrano, M. y Toro, M. C. (2005). Del narcotráfico al crimen transnacional organizado en América Latina. *Crimen transnacional organizado y seguridad internacional: cambio y continuidad* (M. R. Berdal y M. Serrano, coords.; pp. 233-273). Fondo de Cultura Económica.
- Soberón-Garrido, R. (2001). Corrupción asociada al tráfico ilícito de drogas (TID) y las fuerzas armadas, 1992-1996. *Revista Probidad*, (16).
- Uprimny, R. y Guzmán, D. E. (2010). Políticas de drogas y situación carcelaria en Colombia. *Sistemas sobrecargados: leyes de drogas y cárceles en América Latina* (P. Metaal y C. Youngers, eds.; pp. 40-49). Washington Office on Latin America; Transnational Institute. <https://tinyurl.com/56nh3z53>
- Vargas-Velázquez, A. (2008). Una convivencia inesperada, Fuerzas Armadas y gobiernos de izquierda en América Latina. *Nueva Sociedad*, (213), 80-94. <https://tinyurl.com/2scpk9m7>
- Vargas-Velázquez, A., Pabón-Ayala, N., Chaparro, J. C., García-Pinzón, V. y Soley-Lizarazo, N. (2008). *El papel de las Fuerzas Armadas en la política antidrogas colombiana 1985-2006*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

# 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>  
dstraslavinan@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>  
clozanot@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.

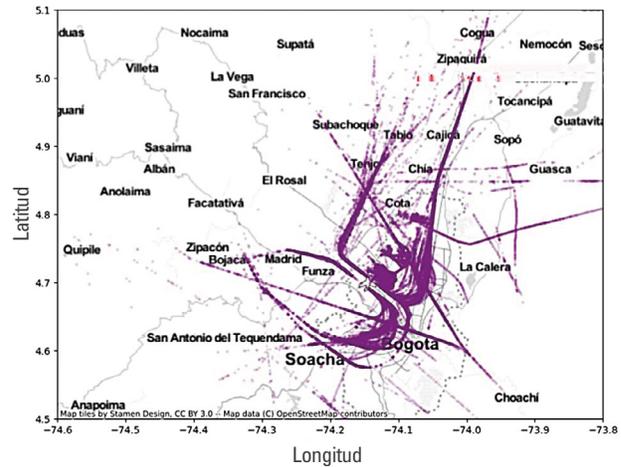


Figura 1. Trayectorias de vuelos en Bogotá y municipios cercanos  
Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

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.

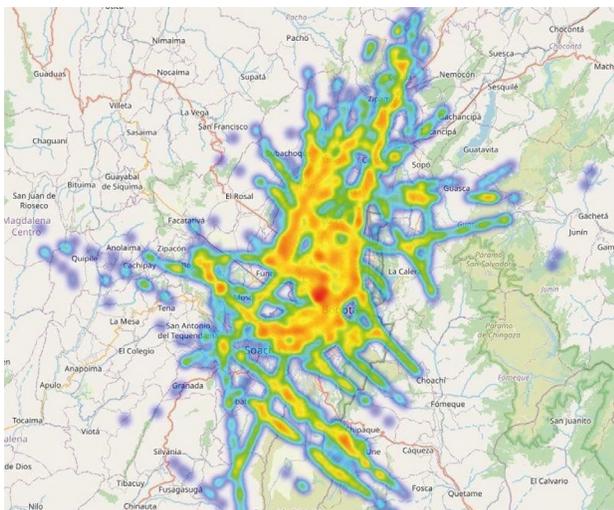


Figura 2. *Heatmap* de los vuelos en Bogotá y sus municipios cercanos  
Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

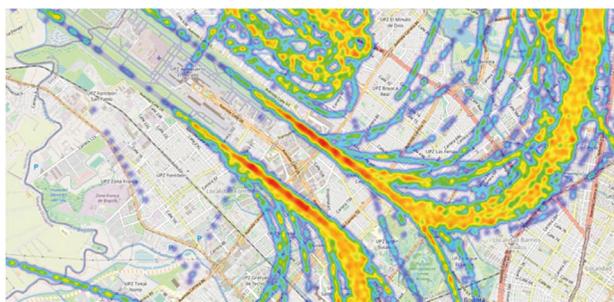


Figura 3. *Heatmap* de los vuelos en las zonas aledañas al Aeropuerto Internacional El Dorado  
Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

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 %.

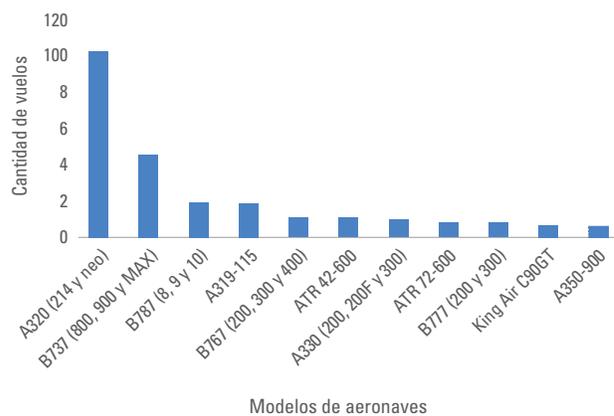


Figura 4. Número de aviones según modelo  
Fuente: Rosales, Madrid, Traslaviña.

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

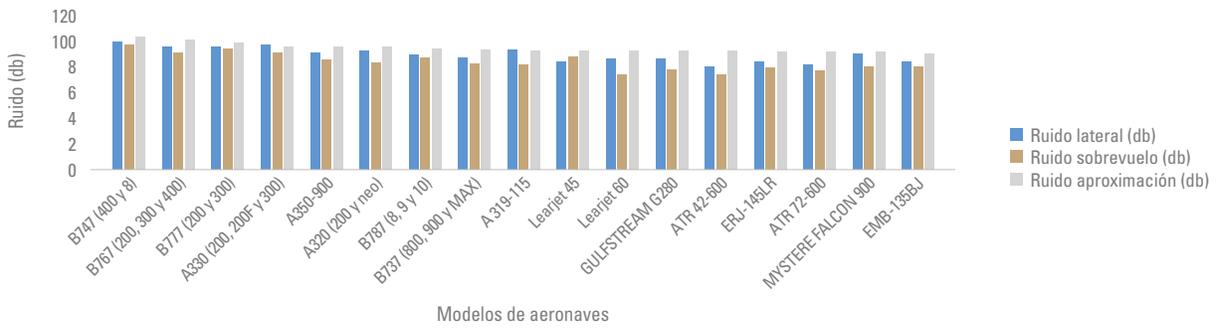


Figura 5. Ruido en dB vs. tipo de aeronave

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).

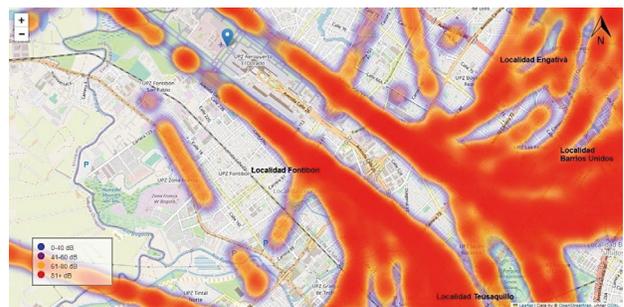


Figura 7. *Heatmap* de ruido en cercanías al aeropuerto

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.

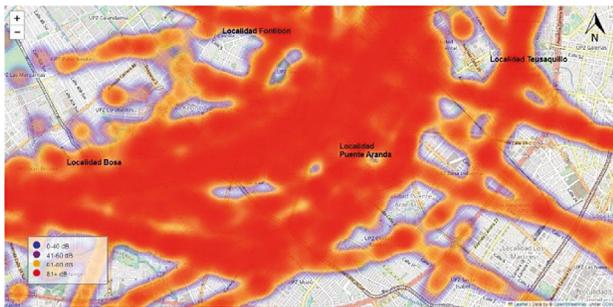


Figura 8. Heatmap de ruido al sur de Bogotá

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>

# Diseño conceptual de un banco de pruebas de inyectores para motores a reacción

Fecha de recibido: 11 de julio 2023	Fecha de aprobado: 17 de abril 2024
Reception date: July 11, 2023	Approval date: April 17, 2024
Data de recebimento: 11 de julho de 2023	Data de aprovação: 17 de abril de 2024

## Luisa Fernanda Mónico Muñoz

<https://orcid.org/0000-0002-3597-6332>  
[luisa.monico@libertadores.edu.co](mailto:luisa.monico@libertadores.edu.co)

Doctora en Sistemas Propulsivos  
en Medios de Transporte  
Docente e investigadora – Fundación Universitaria  
Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación ARESYS

Ph.D. in Propulsive Systems in Means of Transport  
Teacher and Researcher – Los Libertadores  
University Foundation, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing  
ARESYS Research Group

Doutoramento em Sistemas Propulsivos  
em Meios de Transporte  
Professora e investigadora – Fundação Universitária  
Los Libertadores, Colômbia  
Papel do investigador: teórico e escrito  
Grupo de investigação ARESYS

## Richard Giovanni Avella Sarmiento

<https://orcid.org/0000-0001-8081-7587>  
[rgavellas@libertadores.edu.co](mailto:rgavellas@libertadores.edu.co)

Doctor en Ciencias Física  
Docente e investigador – Fundación Universitaria  
Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación ARESYS

Ph.D. in Physical Sciences  
Teacher and Researcher – Los Libertadores  
University Foundation, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing  
ARESYS Research Group

Doutoramento em Ciências Físicas  
Professor e investigador – Fundação Universitaria  
Los Libertadores, Colômbia  
Papel do investigador: teórico e escrito  
Grupo de investigação ARESYS

## Nicolli Andrea Montoya Garzón

[namontoyag01@libertadores.edu.co](mailto:namontoyag01@libertadores.edu.co)

Ingeniera Aeronáutica  
Investigadora – Fundación Universitaria  
Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación ARESYS

Aeronautical Engineer  
Researcher – Los Libertadores University  
Foundation, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing  
ARESYS Research Group

Engenheiro Aeronáutico  
Investigador – Fundação Universitária  
Los Libertadores, Colômbia  
Papel do investigador: teórico e escritor  
Grupo de investigação ARESYS

**Cómo citar este artículo:** Mónico Muñoz, L. F., Avella Sarmiento, R. G., y Montoya Garzón, N. A. (2024). Diseño conceptual de un banco de pruebas de inyectores para motores a reacción. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 30-45. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderareo.821>



## Diseño conceptual de un banco de pruebas de inyectores para motores a reacción

## Conceptual design of a jet engine injector test bench

## Projeto conceitual de uma bancada de testes de injetores de motores a jato

**Resumen:** Todo desarrollo de un producto debe pasar por la etapa del diseño conceptual, el cual consiste en obtener una solución parcial a un problema planteado a partir de especificaciones, requisitos y necesidades de un cliente. En el caso de un motor a reacción, la manera como el combustible entra a la cámara de combustión tiene un impacto significativo en su funcionamiento. Los parámetros de operación como el ángulo de aspersion, la presión y la pulverización del combustible son factores determinantes que influyen de manera directa en la velocidad de combustión y en la formación de la mezcla, lo cual ocasiona una alteración de la combustión en los motores a reacción; es por esta razón que los inyectores cumplen una función importante en el sistema de inyección de combustible. De tal manera, el mantenimiento de este componente tiene una gran relevancia e impacto en el motor. La preservación del buen funcionamiento del inyector se da bajo el uso del banco de pruebas, herramienta por medio de la cual se realiza el mantenimiento de este componente, y durante el proceso se calibran, se evalúan y se parametrizan los inyectores frente a un modelo previamente establecido por el fabricante. Dado lo anterior, en el presente artículo se describirá el diseño conceptual de un banco de pruebas para los inyectores de un motor a reacción. Como punto de partida, se selecciona la metodología más adecuada, que tendrá en cuenta los requerimientos y requisitos del cliente, obtenidos por medio de una encuesta, para así generar conceptos que son evaluados por medio de la casa de la calidad. El concepto final se caracteriza por tener una estructura en acero inoxidable, un sistema de alerta avanzado y un diseño ergonómico, con una alta tecnología de elementos que lo hace el más costoso de las opciones establecidas.

**Palabras clave:** banco de pruebas; diseño conceptual; inyectores; motores a reacción; parámetros.

**Abstract:** Every product development must go through the conceptual design stage, which involves obtaining a partial solution to a problem based on the client's specifications, requirements, and needs. In the case of a jet engine, the way fuel enters the combustion chamber has a significant impact on its performance. Operational parameters such as spray angle, pressure, and fuel atomization are determining factors that directly influence combustion speed and mixture formation, leading to an alteration in combustion in jet engines. For this reason, injectors play an important role in the fuel injection system. Thus, the maintenance of this component is of great relevance and impact on the engine. The preservation of the injector's proper functioning is ensured through the use of a test bench, a tool used to maintain this component, during which the injectors are calibrated, evaluated, and parameterized against a model previously established by the manufacturer. Given the above, this article will describe the conceptual design of a test bench for jet engine injectors. As a starting point, the most appropriate methodology is selected, considering the client's requirements and needs obtained through a survey, to generate concepts evaluated through the house of quality. The final concept is characterized by having a stainless steel structure, an advanced alert system, and an ergonomic design, with high-tech elements that make it the most expensive of the established options.

**Keywords:** Test bench; conceptual design; injectors; jet engines; parameters.

**Resumo:** Todo desenvolvimento de um produto deve passar pela etapa do design conceitual, que consiste em obter uma solução parcial para um problema baseado nas especificações, requisitos e necessidades do cliente. No caso de um motor a jato, a maneira como o combustível entra na câmara de combustão tem um impacto significativo em seu desempenho. Os parâmetros operacionais, como o ângulo de pulverização, a pressão e a atomização do combustível, são fatores determinantes que influenciam diretamente a velocidade da combustão e a formação da mistura, ocasionando uma alteração na combustão dos motores a jato. Por essa razão, os injetores desempenham um papel importante no sistema de injeção de combustível. Assim, a manutenção desse componente tem grande relevância e impacto no motor. A preservação do bom funcionamento do injetor é garantida pelo uso do banco de testes, ferramenta utilizada para a manutenção desse componente, durante a qual os injetores são calibrados, avaliados e parametrizados em relação a um modelo previamente estabelecido pelo fabricante. Diante do exposto, este artigo descreverá o design conceitual de um banco de testes para os injetores de um motor a jato. Como ponto de partida, é selecionada a metodologia mais adequada, levando em consideração os requisitos e necessidades do cliente, obtidos por meio de uma pesquisa, para gerar conceitos que são avaliados pela casa da qualidade. O conceito final se caracteriza por ter uma estrutura em aço inoxidável, um sistema de alerta avançado e um design ergonômico, com alta tecnologia de elementos que o torna a opção mais cara das estabelecidas.

**Palavras-chave:** Banco de testes; design conceitual; injetores; motores a jato; parâmetros.

## Introducción

Los bancos de pruebas son herramientas que tienen como objetivo analizar componentes por medio de diversas pruebas, en donde se evalúan sus parámetros y se estudia la información obtenida para tener un informe completo del estado de este componente (Guerrero-Ángeles, 2016). Es por este motivo que los fabricantes, las empresas y las universidades han trabajado en diversos proyectos para ampliar el conocimiento en este campo. En Colombia, universidades como la San Buenaventura han desarrollado el diseño de un banco de pruebas para motores PT6T-3, a fin de realizar tareas de mantenimiento como el *overhaul* y pruebas *pos-overhaul*, cuyo objetivo era disminuir costos de mantenimiento para los operadores de este tipo de motores (Ferreira-Garzón *et al.*, 2008). Así mismo, en la Fundación Universitaria Los Libertadores se diseñó, construyó e implementó un banco de pruebas para la caja de accesorios del motor J-38 perteneciente al avión A 37-B de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC). Durante esta investigación, se desarrolló un equipo que ofreciera a la entidad mayor confiabilidad y mejores resultados durante el mantenimiento de la caja de accesorios de dicho motor, con el fin de contribuir a una necesidad de que la parte fuera sometida a condiciones de operación (Londoño-Gómez y Méndez-Tejero, 2014).

Un componente fundamental para el buen funcionamiento del motor son los inyectores, debido a que hacen parte del sistema de combustión, el cual se encarga de suministrar la cantidad correcta de combustible. Los inyectores y todo el sistema de combustión están sometidos constantemente a suciedades, residuos o impurezas que pueden afectar directamente el funcionamiento del motor. Por ello, universidades y entidades estatales han realizado investigaciones enfocadas en bancos de pruebas que contribuyan al mantenimiento de estos componentes (BARDAHL, 2020).

Un ejemplo de lo anterior fue el diseño y la construcción de un banco de pruebas para inyectores de los motores GARRETT TPE331 y PT6A-25C, desarrollado por la FAC. El estudio tuvo como objetivo disminuir costos

de mantenimiento a la entidad brindando un equipo con las capacidades técnicas para el cumplimiento completo de sus necesidades (Hernández-Rueda *et al.*, 2007). Así mismo, la investigación estuvo enfocada en el diseño y la construcción de un banco de pruebas para boquillas de inyección de combustible aplicable para los motores PW100 y PT6, cuya finalidad fue abarcar la misma problemática existente en el país, que es la rentabilidad de realizar el mantenimiento de esta clase de componentes a nivel nacional (Escobar-Garzón *et al.*, 2007). También, la FAC desarrolló una investigación sobre un banco de pruebas de inyectores para motores PT-6 A/T y PT-6-3b, que se enfocó en mejorar el mantenimiento de los motores dentro de la institución para disminuir los tiempos de inspección (Pérez y Moreno, 2009).

## Inyector

Los inyectores de un motor a reacción son los encargados de introducir una cantidad determinada de combustible a la cámara de combustión, atomizando el combustible de manera que se mezcle con el aire. El chorro que sale de los inyectores es de forma cónica y su movimiento es helicoidal, la presión de salida del combustible puede oscilar entre 30 y 70 kg/cm<sup>2</sup>, dependiendo del fabricante (Galmés-Belmonte, 2015). En la industria aeronáutica, existen dos tipos de inyectores: los de atomización y los de vaporización. Los primeros, que son los más utilizados en la aviación, se dividen en dos tipos: los de composición simple y los de composición dúplex (Rivas, 2003).

*Inyectores simple:* Fue uno de los primeros utilizados con éxito en los motores a reacción. Van rosados directamente al colector de combustible en la cámara de combustión, y una de sus características principales es que tiene un solo orificio que es por donde el combustible sale atomizado de manera cónica por medio de gotas muy finas (Rivas, 2003). Operan mejor a presiones altas, pero una de sus más grandes desventajas es que no funcionan de manera correcta a presiones bajas (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018). En la Figura 1, se pueden observar las partes de un inyector tipo simple.

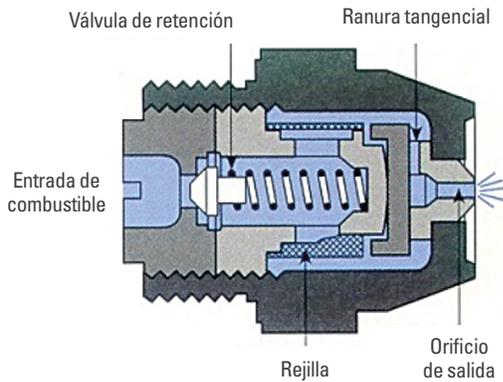


Figura 1. Inyector simplex  
Fuente: Rivas (2003).

*Inyectores dúplex:* El inyector dúplex se clasifica dependiendo del tipo de colector que tenga. En los inyectores dúplex de un solo colector, el combustible llega a este tipo de inyector a través de un colector. Tienen una válvula difusora que se encarga de permitir que el combustible se pulverice desde el orificio central a presiones bajas. El combustible que sale por este orificio se usa para el arrancar el motor (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018). Cuando la unidad de control de combustible calibra la suficiente presión, abre el difusor de flujo y es ahí donde permite el paso de combustible por medio del segundo orificio (Rivas, 2003). En la Figura 2, se pueden observar las partes de un inyector dúplex con un solo colector.

Por su parte, los inyectores dúplex de doble colector se caracterizan por tener dos entradas independientes por donde fluyen el combustible primario y el secundario. Cuando se habla de arranque y condiciones de necesidad de bajo flujo, la unidad de control de combustible incrementa la presión lo suficiente para que el combustible primario salga con un espectro de pulverización ancho (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018). Ya cuando se realiza un incremento en la velocidad, la presión aumenta, generando que la válvula se abra aún más y permitiendo que el combustible también fluya por medio del colector secundario; el flujo que proviene del colector secundario rodea al del colector primario. En el inyector, se encuentran el orificio por donde sale el flujo primario, que es el del centro, y orificios más pequeños alrededor de este que

generan un chorro cónico (Rivas, 2003). A continuación, en la Figura 3 se observan las partes correspondientes a un inyector dúplex con doble colector.

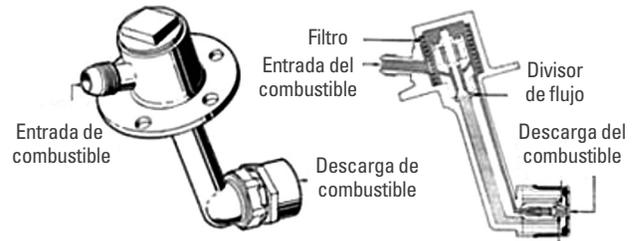


Figura 2. Inyector tipo dúplex con un solo colector  
Fuente: Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí (2018).

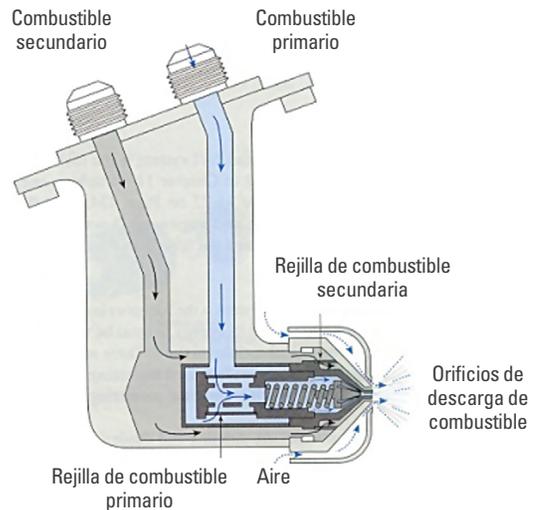


Figura 3. Inyector dúplex con doble colector  
Fuente: Rivas (2003).

## Metodología

En este trabajo, se desarrolló la metodología analítica, que abarca la descomposición de definiciones, funcionamiento y análisis de parámetros que se van a utilizando en el diseño del banco (Arzola de la Peña, 2011). El proyecto incluye una primera fase en la que se realiza la búsqueda de información sobre inyectores de motores a reacción y el diseño detallado del banco de

pruebas para estos. La segunda fase incluye un desarrollo ingenieril, en el que se realiza el diseño conceptual, compuesto por tres etapas interrelacionadas: recolección de los requerimientos del cliente, orientación de los resultados, y la casa de la calidad y la generación de conceptos.

En esta segunda etapa, se realiza el diseño y el análisis final del banco de pruebas de inyectores para motores a reacción, pero esto se hará por medio de distintas tareas. Primero, se realizará el análisis funcional del banco; en este paso, se establecen las funciones que debe tener cada uno de los aspectos seleccionados de la encuesta. Después, se realiza la generación de conceptos, teniendo en cuenta las funciones establecidas para cada requerimiento del cliente, y se establece un instrumento que pueda cumplir con estas necesidades. Luego, por medio de un proceso creativo, se da lugar a la creación de diversos conceptos globales que cumplan con las características y necesidades operativas; cada uno de estos se evaluará por medio de la casa de la calidad con el fin de obtener el concepto global final que cumpla con cada uno de los requerimientos planteados en las encuestas.

## Diseño conceptual del banco

### Requerimientos del cliente

El libro *Metodología de diseño para ingeniería* (Arzola de la Peña, 2011) plantea un procedimiento para identificar los requerimientos del cliente, los cuales se obtuvieron por medio de una encuesta. Esta encuesta estuvo dirigida a los clientes del diseño, trece personas con un amplio conocimiento en el sector aeronáutico, especialmente la parte de propulsión; entre ellas técnicos e ingenieros que dieron un enfoque más especializado en el mercado nacional y docentes que ofrecieron una perspectiva más investigativa e innovadora para el diseño. La encuesta se realizó de forma virtual, y se hicieron preguntas cerradas en las cuales las personas debían seleccionar las respuestas que consideraran más adecuadas.

En la encuesta, se evaluaron las características, los requerimientos de construcción y los parámetros de operación del banco, y los encuestados pudieron evaluar la importancia de cada una de las variables establecidas. Esta importancia fue medida de 1 (más baja) a 5 (más alta). Las respuestas llevarían a proponer opciones viables de elementos funcionales para el correcto funcionamiento del banco, como se presentará más adelante.

Los datos obtenidos en la encuesta se clasificaron según la importancia establecida por los clientes. Se tomaron en cuenta para el diseño únicamente las características y los requerimientos que tuvieran una calificación superior al 20 %, dado que al sumar en cada una de las preguntas las respuestas con un porcentaje superior al 20 %, se sobrepasaba más de la mitad de los encuestados. Las características del banco se evaluaron mediante la pregunta 1: “¿Qué características considera que son importantes para realizar el diseño de un banco de pruebas de inyectores para motores a reacción?”. Los datos obtenidos se pueden observar en la Figura 4.

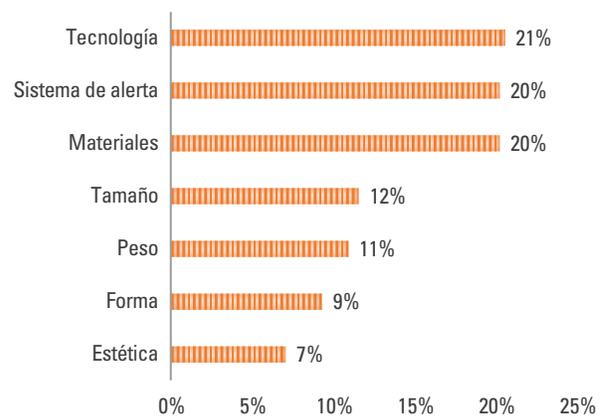


Figura 4. Características del banco de pruebas

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5, se evidencia que la tecnología es el requerimiento más importante para el cliente, dando a entender que es necesario el uso de equipos, dispositivos y sistemas avanzados que logren cumplir este requerimiento en su totalidad. De igual manera, se puede visualizar la relación que tiene el sistema de alerta con

los materiales, y se logra analizar que el cliente prioriza la construcción, la vida útil del banco de pruebas, la prevención de accidentes e incendios y el uso de conjuntos de instrumentos que faciliten la operación del banco de pruebas. Las demás características no serán tomadas en consideración debido a la baja calificación de importancia establecida por los clientes. Los requerimientos de construcción del banco fueron establecidos mediante la pregunta 2: “Califique de 1 a 5 la importancia de los siguientes requerimientos de construcción para el banco de pruebas de inyectores para motores a reacción”.

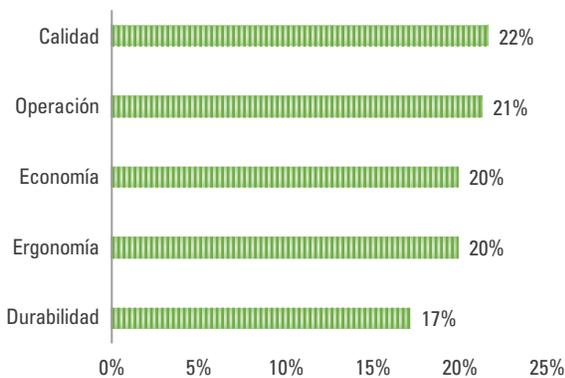


Figura 5. Requerimientos de construcción del banco de pruebas  
Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 5, para el cliente es necesario que el banco de pruebas cuente con condiciones óptimas de comodidad y seguridad para el operador, y que contribuya con sistemas ergonómicos para que su operación sea sencilla e intuitiva, pero que este conjunto de instrumentos, equipos y sistemas sean de fácil adquisición y económicos. Finalmente, se analiza que el cliente busca que el banco cumpla con todos los requisitos dejando como principal requerimiento de construcción la calidad del producto.

La tercera pregunta: “¿Qué parámetros considera que debe de evaluar el banco de pruebas para inyectores de un motor a reacción para que pueda cumplir con las necesidades técnicas y de mantenimiento?” tiene como fin establecer los parámetros de operación del banco. Los resultados de esta pregunta se pueden ver en la Figura 6.

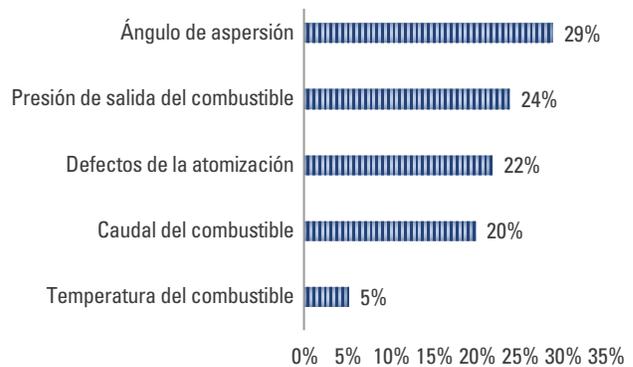


Figura 6. Parámetros de operación del banco de pruebas  
Fuente: elaboración propia.

Como resultado de esta última pregunta, se obtuvo que la centralización de los clientes es buscar que el banco esté en la capacidad de evaluar el ángulo de aspersión, considerándolo el parámetro más importante a tener en cuenta al momento de realizar la inspección de los inyectores. Los clientes, en su mayoría, estuvieron de acuerdo y resaltan la importancia de la presión de salida del combustible, los defectos de atomización y el caudal de combustible como parámetros esenciales de este banco de pruebas. Por último, se concluye que los parámetros de operación del banco que son importantes para el cliente coinciden con los parámetros de operación de los inyectores que tienen mayor impacto en el motor, exceptuando la temperatura del combustible, dado que tan solo el 5% de los trece encuestados tomó en cuenta ese parámetro como importante; por tal motivo, no se realizará el análisis de conceptos para este parámetro.

## Orientación de los resultados al proceso de diseño conceptual

Para satisfacer los requerimientos del cliente, es importante entender uno por uno, así se podrá obtener la necesidad exacta del cliente. El libro propone un análisis inicial donde se dividen los requerimientos iniciales en cinco requisitos, a saber:

### a) Requisitos de seguridad:

Se distinguen por brindarle las respectivas herramientas de apoyo al operador de un equipo, máquina o elemento, como pueden ser: señalizaciones,

sensores de sirenas, alarmas, avisos, etc. (Taco-Álvaro, 2015). Para este diseño, se va a considerar el sistema de alerta como un requisito de seguridad.

**b) Requisitos de funcionalidad:**

Es una declaración de cómo debe comportarse un producto o sistema y se pueden detectar como: rangos de operación, cálculos, detalles técnicos, manipulación de datos y otras funcionalidades específicas que deba cumplir el sistema (Visure, s. f.). El ángulo de aspersión, la presión de salida de combustible, los defectos de atomización, el caudal de combustible y la operación se van a considerar como requisitos de

funcionalidad de este diseño. Para comprender la función de cada parámetro operativo, y así mismo lograr satisfacer las necesidades iniciales de diseño, se realizó una recolección de información en diferentes empresas del sector aeronáutico, con cuya experiencia se logró obtener rangos de operación de los inyectores de diferentes motores operados en Colombia. Se debe tener en cuenta que estos rangos son aproximaciones técnicas, ya que su correcta información se encuentra en manuales del fabricante. A continuación, en la Tabla 1 se pueden apreciar los rangos de operación de los inyectores.

Tabla 1.  
Rangos técnicos de operación de los inyectores

Aeronave	Tipo de motor	Presión flujo primario (PSI)	Caudal (PPH)	Ángulo de aspersión presiones bajas	Ángulo de aspersión presiones altas
<b>Pratt &amp; Whitney</b>					
Boeing 727-200	JT8D-17	110-215	7,05-41,8	70°-90°	45°-50°
Hawker 400A	JT15D-5	98-160	5,01-35,6		
Gulfstream G200	PW306A	99,67-187,03	5,32-37,09		
ATR 42	PW100 - Series	100-190	5,4-38,02		
ATR 72					
Casa C-295					
Dash-8					
Embraer EMB 120					
Embraer 314					
Beechcraft T-6					
Basler BT-67	PT6A - Series	20-60	1,09-12,3		
Beechcraft 1900					
King Air					
Embraer 312					
Embraer 110					
Cessna208					
<b>Rolls-Royce</b>					
Boeing 787-8 / Boeing 787-9V	Trent 1000	120-230	7,23-42,32	70°-90°	45°-50°
Embraer ERJ-145	AE 3007	105-210	5,5-40,07		
<b>Honeywell</b>					
Jetstream 3201	TPE331-12UHR-702H	100-175	5,45-36,1	70°-90°	45°-50°
Learjet 45	TFE731-20				
Casa C-212	TPE331-10R-513C				
King Air	TPE331-6-251B				

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla anterior, los rangos de presión varían entre los 20 psi y los 230 psi. Ahora, se analiza que los rangos de presión son directamente proporcionales a los rangos de caudal; si la presión disminuye, el caudal lo hará de la misma manera, y si la presión aumenta, igualmente aumentará el caudal. Pero el ángulo de aspersión es inversamente proporcional a estos dos parámetros; si la presión aumenta, el ángulo de aspersión va a tender a disminuir.

#### c) Requisitos de apariencia:

Es considerado un requisito no funcional, y se refiere a los aspectos visuales y los atributos de un producto, como tamaño, forma, color, textura etc. (Ferrero *et al.*, s. f.). Para este diseño, se van a considerar tecnología, ergonomía y materiales como requisitos de apariencia.

#### d) Requisitos de manufactura:

Son aspectos que integran todos los recursos de fabricación, ofreciendo información de costos, calidad, herramientas y mano de obra de un producto (Visure, s. f.). Se va a considerar la calidad como requisito de manufactura.

#### e) Requisitos de costos:

Es el conjunto de bienes y servicios que se deben consumir para obtener un producto terminado en condiciones de ser vendido o para prestar algún servicio. Se va a considerar la economía como requisito de costos. Para brindar un mejor enfoque en el tema de costos, se realizará un análisis y se presentará un balance de costos iniciales del diseño conceptual al finalizar este capítulo. Luego de obtener un concepto global dominante, solo se tendrán en cuenta los costos de los conceptos generados en el transcurso del diseño conceptual.

## Casas de la calidad

El despliegue de función de calidad o QFD (Quality Function Deployment) es un método utilizado en la metodología de diseño para el desarrollo de productos o servicios que interactúa con la voz del cliente y la traduce mediante pasos sucesivos en especificaciones más claras. Como herramienta principal del QFD, se encuentra la denominada ‘matriz de calidad’ para representar datos e información, con lo cual se permite relacionar la voz del cliente con requerimientos de

componentes, características, procesos de construcción, planes de operación e informes de calidad; la apariencia de esta matriz ha llevado a que se conozca como ‘casa de la calidad’ (Arzola de la Peña, 2011). La casa de la calidad cuenta con seis módulos principales:

- Voz del cliente: En este primer módulo, se relacionan los requerimientos del cliente, previamente identificados, y se deben organizar según su importancia y jerarquía (Vega-Muñoz, 2019).
- Requerimientos técnicos: En este módulo, se resalta la importancia de identificar cómo se van a satisfacer los requerimientos del cliente bajo requisitos de diseño apropiados que cumplan con la necesidad y con la función adecuada del producto (Vega-Muñoz, 2019).
- Relaciones: Luego de haber identificado los dos primeros módulos, se tiene el tercer módulo que hace referencia a las relaciones entre los requerimientos del cliente y los requerimientos técnicos (Vega-Muñoz, 2019).
- Ponderación del mercado: Este módulo hace referencia a la competencia de mercado que va a tener el producto creado, y es implementado únicamente en la tercera casa de la calidad para analizar una oportunidad de mejora antes de realizar el producto final. Normalmente, esto se revisa en la última fase del diseño, la cual detalla específicamente estos puntos (Vega-Muñoz, 2019).
- Prioridades de los requerimientos técnicos: En este módulo, se suman los valores obtenidos en el módulo de relaciones y se ordenan los requerimientos técnicos de manera jerárquica (Vega-Muñoz, 2019).
- Interrelaciones: Este módulo es el “techo” de esta matriz, en donde interactúan todos los requerimientos técnicos y se relacionan unos con otros; entre mayor relación tengan, mayor será la calificación, teniendo en cuenta su prioridad, y al final los requerimientos técnicos con la calificación más alta serán los escogidos para pasar a la siguiente casa de la calidad, y de esta manera cumplir y darle respuesta a la voz del cliente (Vega-Muñoz, 2019).

La primera casa de la calidad (Figura 7) relaciona y califica los requerimientos del cliente con los requisitos técnicos, los cuales fueron escogidos y analizados para transformar la voz del cliente en aspectos más simplificados. Por ejemplo, como requisito técnico del ángulo de aspersión y de los defectos de atomización, se escogió un sistema fotográfico, ya que ayudará en las tomas fotográficas y de video, en las que se podrán analizar las imágenes para una correcta inspección de los inyectores. De igual manera, con

los requisitos técnicos de presión de salida de combustible y caudal de combustible, donde se escogieron aspectos técnicos para satisfacer la necesidad del cliente, como instrumentos capaces y acoplados para medir cada uno de estos parámetros descritos. Todos los requerimientos técnicos van a brindar un análisis y la capacidad de entender qué componentes y qué se necesita para implementar en el banco de pruebas cuyas características cumplan con los requerimientos del cliente.

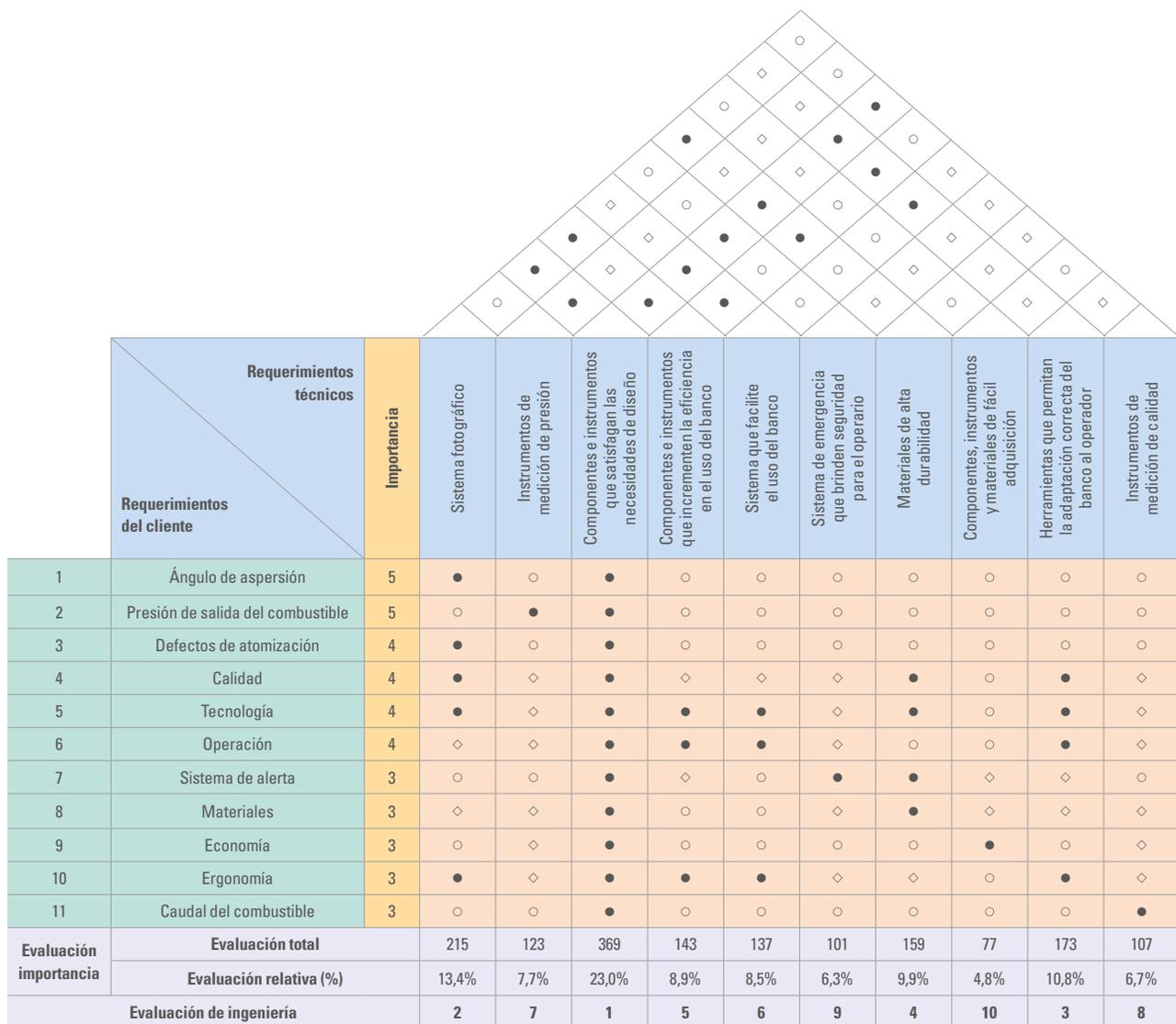


Figura 7. Primera casa de la calidad  
Fuente: elaboración propia.

En la primera casa de la calidad, se visualiza que el requerimiento técnico de mayor importancia, dada su evaluación de ingeniería y análisis de evaluación relativa, es el requerimiento: componentes e instrumentos que satisfagan las necesidades de diseño, ya que se especifica que todo componente que se utilice para el banco de pruebas debe cumplir con los estándares de calidad y de función del banco de pruebas. Segundo del requerimiento técnico, un sistema fotográfico que va cumplir con cinco requerimientos del cliente de manera directa, brindándole al banco todos los estándares de calidad y tecnología. El tercer requerimiento técnico más fuerte, con una calificación de 173, son las herramientas que permitan la adaptación correcta del banco al operador, proporcionando funciones técnicas al banco en cuanto a operación y ergonomía.

Todos los requerimientos técnicos dan una idea de la calidad y la función que deben tener los componentes a utilizar en el banco de pruebas. Es por esta razón que el requerimiento con puntaje más bajo es: componentes, instrumentos y materiales de fácil adquisición. Si bien los componentes pueden llegar a ser de fácil adquisición en el mercado, no se garantiza que sean asequibles económicamente, ya que muchos de los equipos de medición y sistemas pueden llegar a ser bastante costosos.

Después, se desarrolló la segunda casa de la calidad, que describe las características exactas de los componentes. Por ejemplo, para los requerimientos técnicos que relacionan instrumentos de medición se tuvieron en cuenta los rangos de operación relacionados al comienzo de este capítulo. El componente de medición de presión tendrá una característica que debe poder medir entre rangos de 0 a 250 psi, y para el componente de medición de caudal, un rango de 0 a 40kg/h. Se debe tener en cuenta que este último rango se tomó realizando la conversión de unidades de Lb/h a kg/h, ya que los datos técnicos encontrados se especifican en Lb/h y las herramientas de medición se comercializan en kg/h. La segunda casa de la calidad se observa en la Figura 8.

Como se puede observar en la Figura 8, la característica principal de los componentes es que sean confiables. Tuvo una evaluación total de 336 y una

evaluación de ingeniería de 1, debido a que los componentes deben funcionar perfectamente, deben tener un ciclo de vida adecuado y deben tener la capacidad de trabajar en las condiciones ambientales de uso habitual del banco de pruebas, como lo pueden ser las altas presiones y las altas temperaturas. De igual manera, se puede analizar que una característica que resalta mucho es que debe ser cómodo para el operador, con una calificación de 208, siendo la segunda característica más importante. El banco debe ser bastante ergonómico, dado que puede ser operado por largos periodos de ejecución y esto puede causar lesiones más adelante para el operador del banco de pruebas. Otra característica como los controles mecánicos y eléctricos tiene la misma calificación, pues si los componentes cuentan con estos sistemas, va producir que el banco de pruebas sea mucho más sencillo de operar.

Si bien todas las características están enfocadas en funcionalidad y vida útil de los componentes, una de las que más se destacan es la modernización, dado que se busca que el banco de pruebas no solo sea funcional, sino que además tenga una alta gama tecnológica, buscando innovar en el mercado. Pero este es un enfoque costoso, lo cual se puede demostrar revisando que la característica de bajo costo tiene una calificación demasiado baja.

## Generación de conceptos globales

La creación de conceptos globales es un proceso que trae como consecuencia el desarrollo de diversos prototipos que se encargan de integrar soluciones parciales para dar cumplimiento a los requerimientos del cliente (Arzola de la Peña, 2011). Un concepto global es lo que resulta del proceso de organizar todos los conceptos y subconceptos establecidos en la etapa anterior para formar un único producto. Es importante crear diferentes conceptos globales con el fin de evaluar y seleccionar el más adecuado que se adapte a las necesidades del cliente, siendo este el diseño conceptual final (Arzola de la Peña, 2011).

Para el desarrollo de los conceptos globales del banco de pruebas de inyectores para motores a reacción, se escogió la tabla de combinación, que es el

método creativo más interactivo y fácil de entender, el cual permite crear diversos prototipos asociando los conceptos generados en la fase anterior.

A continuación, en la Tabla 2 se observa el proceso de combinación de conceptos y se representa la creación de cuatro prototipos globales. Es importante aclarar que para los cuatro productos creados se hará uso del sistema de visualización artificial, debido a que esta tecnología permite realizar inspecciones y

detectar las deformaciones que se puedan presentar en el cono de aspersión, analizando el fluido en movimiento de manera automática. Este sistema de visualización artificial se divide en el sistema de formación de imágenes y el de procesamiento; el primero está compuesto por los siguientes subsistemas: de iluminación, de identificación de imagen y de recepción de señal en dispositivos digitales (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018).

Características de los componentes		Importancia	Requerimientos técnicos									
			Confiability	Velocidad de grabación mayor a 30 fps	Combo para el operador	Resistentes a la corrosión	Modernización	Controles mecánicos y eléctricos	Rangos mecánicos o 250 psi	Rango de indicación o 40 Kg/hr	Prevención y alerta	Costo bajo
1	Componentes e instrumentos que satisfagan las necesidades de diseño	5	●	◇	●	●	◇	●	◇	◇	◇	○
2	Sistema fotográfico	5	●	●	◇	○	●	○	○	○	○	○
3	Herramientas que permitan la adaptación correcta del banco al operador	5	●	○	●	○	◇	●	○	○	◇	○
4	Materiales de alta durabilidad	4	●	○	○	●	◇	○	○	○	○	○
5	Componentes e instrumentos que incrementen la eficiencia en el uso del banco	4	●	●	●	○	●	◇	○	○	○	○
6	Sistema que facilite el uso del banco	4	●	◇	●	○	●	●	○	○	○	○
7	Instrumentos de medición de presión	4	●	○	◇	○	○	○	●	○	○	◇
8	Instrumentos de medición de caudal	3	●	○	◇	○	○	○	○	●	○	◇
9	Sistemas de emergencia que brinden seguridad para el operario	3	●	○	○	○	◇	●	○	○	●	◇
10	Componentes, instrumentos y materiales de fácil adquisición	3	○	◇	○	◇	○	●	○	○	○	●
Evaluación importancia	Evaluación total		336	136	208	118	184	208	82	74	84	84
	Evaluación relativa (%)		22,2%	9,0%	13,7%	7,8%	12,2%	13,7%	5,4%	4,9%	5,5%	5,5%
Evaluación de ingeniería			1	4	2	5	3	2	7	8	6	6

Figura 8. Segunda casa de la calidad

Fuente: elaboración propia.

El uso del sistema de visualización artificial va a garantizar que cada uno de los conceptos globales pueda automatizar las inspecciones realizadas a los inyectores; además, gracias a su configuración que consta de una cámara digital, permite procesar y capturar la imagen, con una inspección más detallada en comparación con los métodos convencionales que solo hacían uso de la visión humana. Así, se cumple con los requisitos del cliente, como los parámetros operativos: ángulo de aspersión y defectos de atomización, y se satisface con el requerimiento de calidad, ya que se está garantizando una doble verificación y así evitar errores en las inspecciones de los inyectores (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018).

## Concepto 1

El sistema de visualización artificial logrará que todos los conceptos generales tengan un procesador de imagen, un sistema de iluminación de diodos led y un módulo de digitalización, cuya principal función será convertir la señal análoga que proporciona la cámara en una señal digital (Ocaña-Sánchez y López-Velasteguí, 2018). Para este concepto, se optó por el uso de un tubo Pitot, ya que son herramientas confiables, muy fáciles de instalar, adecuar y utilizar, pues vienen en diferentes modelos que ofrecen una gran variedad de condiciones ambientales, incluyendo temperaturas extremadamente altas y una amplia

Tabla 2.  
Creación de conceptos

Conceptos generados			1	2	3	4
Funciones principales	Ángulo de aspersión	Sistema de visión artificial				
		Barómetro				
	Presión de salida del combustible	Manómetro				
		Tubo Pitot				
	Defectos de atomización	Sistema de visión artificial				
		Caudalímetro ultrasonido				
Caudal del combustible	Caudalímetro de inserción	Caudalímetro electromagnético				
		Caudalímetro de inserción				
		Caudalímetro de inserción				
Funciones secundarias	Almacenamiento de datos	Tarjeta de almacenamiento				
		Disco mecánico				
		Disco de estado sólido				
		Almacenamiento en nube				
Funciones terciarias	Generación de informes	Excel				
		Matlab				
		Python				
Funciones técnicas	Tecnología	Pantallas digitales				
		Computadores portátiles				
		Computadores con torre CPU				
	Materiales	Aceros inoxidables				
		Hierro				
		Aleaciones de metales				
Funciones de uso o manejo	Ergonomía	Aceros estructurales				
		Botones				
		Perillas				
		Palancas				
		Pedales				
		Switches				
Funciones de seguridad	Sistema de alerta	Señalizaciones				
		Sistema contra incendios				
		Botón de emergencia				

Fuente: elaboración propia.

escala de presiones. Por otro lado, es una herramienta de fácil adquisición y económica (IQR Ingeniería Química, 6 de marzo de 2021).

Para este concepto, se seleccionó un caudalímetro electromagnético, el cual toma medidas de alta fiabilidad y estabilidad. El sensor no tiene piezas móviles, esto permite que su instalación sea simple y que los gastos de mantenimiento sean mínimos (Silver Automation Instruments, s. f.). El prototipo cuenta con un computador como sistema tecnológico de adquisición de datos, que a su vez estará equipado con una tarjeta de almacenamiento y de Excel como herramienta clave de optimización de datos.

El hierro, al ser un material maleable, va a permitir la construcción del banco y le brindará ventajas como resistencia al esfuerzo y ductilidad, garantizando excelentes prestaciones en cuanto a ciclos de vida del banco de pruebas<sup>1</sup>. Para este concepto, se escogió el uso de pedales y *switches*, ya que su operación es muy sencilla para el operador y permite cumplir el requerimiento de operación establecido por el cliente. Por último, el botón de emergencia será muy útil en caso de que el sistema de operación del banco falle y sea necesario finalizar el proceso de inmediato sin poner en riesgo la integridad del operador.

## Concepto 2

En este caso, el concepto general cuenta con un barómetro, instrumento que es muy útil, práctico y sencillo de operar, cuya simpleza y baja tecnología permite que sea un componente de bajo costo y de fácil accesibilidad (Eltiempo.es, s. f.). El caudalímetro ultrasónico es capaz de hacer mediciones muy exactas brindando datos más claros, y su fácil instalación permite reducir tiempos de construcción y ensambles en el banco, además de tener resistencia a la corrosión para garantizar aún más su vida útil (SmartMeasurement, s. f.).

El uso de un computador portátil le ofrecerá mayor comodidad al operador y así se reducirá el espacio al ser una herramienta más pequeña que un

computador de escritorio, además de que su almacenamiento se da por medio de disco de estado sólido, lo que posibilita cinco veces más la velocidad en la administración de datos. Este equipo tendrá instalado Python, cuyo lenguaje de alto nivel permitirá una programación estructurada, funcional y orientada a la generación de cada informe de las diferentes inspecciones realizadas a los inyectores (KeepCoding, 22 de septiembre de 2022).

La aleación de metales le suministra a este concepto la resistencia a los golpes y a las altas temperaturas, y esto le contribuirá al banco de pruebas tener una mayor durabilidad. Al buscar que el banco sea bastante ergonómico para el operador, se optó por el uso de perillas, pues presentan diferentes funciones de entradas y salidas, dándole uso en cualquier disposición que se tenga para la interacción y operación con el banco. Finalmente, para la selección del sistema de alerta se tuvo en cuenta las señalizaciones que ayudarán y limitarán las áreas donde el operador deberá tener precaución al operar el banco de pruebas, junto con un botón de emergencia para evitar cualquier riesgo de mala manipulación o fallas en el instrumento.

## Concepto 3

A diferencia de los demás conceptos, este cuenta con un manómetro, una herramienta más resistente a las vibraciones y a los cortes de presión; a su vez, proporciona una lectura de presión instantánea y precisa, es una herramienta fácil de operar, muy versátil y sus costos de mantenimiento son muy bajos (Renting Finders, s. f.). La selección de un caudalímetro de inserción se da debido a que este tiene un microprocesador de señal, ofreciendo una variedad de posibilidades en cuestiones de medidas y registros; este instrumento puede ser instalado como equipo fijo o portátil, además tiene la ventaja de contar con una gran autonomía (Mejoras, s. f.).

Para este prototipo, se optó por computadores de torre CPU que tienen un sistema mayor de almacenamiento de datos, discos de estado sólido y almacenamiento en la nube. Esto proporcionará un doble almacenamiento para todos los informes y registros,

<sup>1</sup> Consultar: <https://tinyurl.com/yc626shn>

ocasionando una mayor confiabilidad para la administración de los datos. El computador de este concepto contará con Matlab, dado que permite construir modelos simples para testear y analizar datos, con cálculos y simulación de sistemas.

El acero inoxidable le brindará al banco una alta resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, y resistencia al impacto, a las ralladuras y a las variaciones térmicas, y gracias a sus propiedades, proporcionará una apariencia estética (Servinox, 14 de marzo de 2014). La combinación de perillas, botones y *switches* como sistema ergonómico le ofrecerá al banco de pruebas una operación bastante sencilla e intuitiva. Cumpliendo con las funciones de seguridad, se seleccionó una combinación de los tres conceptos generados: la señalización, el sistema de incendios y el botón de emergencia, ya que cada concepto puede presentar funciones diferentes, pero igual ayudan a que el diseño general logre ser innovador, representando un alcance a los requerimientos iniciales<sup>2</sup>.

#### Concepto 4

Este concepto se destaca por el uso de palancas, ya que se utilizan en operaciones que requieran altas velocidades, y se caracteriza por tener de dos a tres posiciones de operación<sup>3</sup>. La selección de materiales como el acero estructural para este concepto se dio porque puede soportar grandes esfuerzos y dar mayor seguridad a la estructura, brindando ductilidad y tenacidad; además, el acero estructural representa una ventaja al hacer uniones y conexiones por medio de soldaduras, característica a tener en cuenta para la instalación de componentes externos a la estructura (Ferros Texar, s. f.).

El uso de un almacenamiento de datos por medio de disco mecánico cumplirá con un requisito importante para los clientes: la “economía”, pues discos de este tipo brindan una gran capacidad para retener información y son muy económicos en el mercado nacional. Por último, el banco cuenta con la inclusión de

un sistema contraincendios para prevenir accidentes y proteger la integridad del operador.

#### Concepto final

Este concepto se destaca por tener una relación funcional fuerte en el requerimiento material: su estructura en acero inoxidable, lo cual hace que el banco de pruebas pueda resistir varias alteraciones que se den en la estructura, como la corrosión. La tecnología y la operación también cuentan con una relación fuerte, ya que este prototipo utiliza gran variedad de equipos que facilitan la operación, con lo que le ofrecen comodidad al operador.

El prototipo 3 tiene un sistema de alerta avanzado, esto es, un sistema integrado de tres diferentes conceptos, logrando así que este requerimiento cuente con una relación fuerte. El uso de perillas, botones y *switches* lo hace un diseño bastante ergonómico. Los conceptos de complemento enriquecen mucho este requerimiento de ergonomía, con lo que logra cumplir en su totalidad con los requerimientos del cliente.

Al ser un concepto que cuenta con diferentes sistemas, componentes, piezas y herramientas, lo hace un prototipo bastante costoso y lo lleva a tener una relación débil con el requerimiento económico. Sin embargo, los altos costos de los elementos proporcionarían contar con un sistema que permita evaluar los inyectores de forma más segura, precisa y eficiente, brindando una mayor viabilidad de contar con elementos cien por ciento aeronavales. El diseño final del concepto 3, con cada uno de los conceptos generados, se puede ver en la Figura 9.

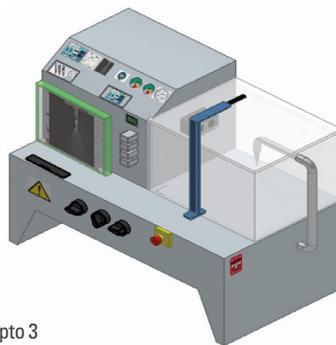


Figura 9. Concepto 3

Fuente: elaboración propia.

<sup>2</sup> Consultar: <https://tinyurl.com/5n88nber>

<sup>3</sup> *Id.*

El diseño propuesto, a diferencia de los bancos o diseños existentes, tiene la ventaja de que puede ser útil para diversos tipos de motores; no como se presentó en la introducción de este trabajo, que los que se han desarrollado solo responden a las necesidades de un motor en específico. Es decir, el concepto 3 es un diseño de banco que permite evaluar inyectores empleados en las múltiples aeronaves que operan a nivel nacional, ya que brinda la oportunidad de moverse en un amplio rango de presiones de flujo primario, caudal y ángulo de aspersión.

## Conclusiones

A partir del presente trabajo, se puede concluir que la encuesta permitió seleccionar, identificar y definir los parámetros operativos requeridos por el cliente para el diseño del banco de pruebas para inyectores. Por medio de las técnicas de creatividad, como el diagrama de descomposición funcional, se facilitó la generación de ideas, comprendiendo las funciones de cada requerimiento del banco de pruebas. La tabla de combinación de conceptos fue una técnica que permitió analizar diferentes conceptos, proporcionando la selección adecuada de componentes, materiales y dispositivos tecnológicos que cumplieran con las necesidades del cliente.

Así mismo, el uso de la casa de la calidad estableció una fuente de información clave para poder comprender las funciones, la operación y las características de los componentes a tener en cuenta para el desarrollo conceptual del banco de pruebas, proporcionando un sistema fiable y asegurando cumplir a cabalidad con los requerimientos del cliente, y logrando satisfacer la necesidad inicial. A partir de este proceso, se desarrolló el diseño conceptual de un banco de pruebas para inyectores de motores a reacción, cumpliendo con la caracterización y parametrización de datos de una manera eficiente, disminuyendo los tiempos en la toma de datos gracias a su capacidad tecnológica avanzada; además, ofrece un alto margen de seguridad al operario y satisface las necesidades del cliente.

El concepto final tiene una estructura en acero inoxidable, un sistema de alerta avanzado y un diseño ergonómico. Incluye a su vez una alta tecnología de elementos, lo cual lo hace el más costoso entre las opciones establecidas. Por último, es importante para un diseño detallado del banco de pruebas realizar un análisis, un estudio y una comprensión de los costos, con el fin de tener una mayor claridad y exponerle al cliente qué tan costoso saldría el desarrollo de este.

## Referencias

- Arzola de la Peña, N. (2011). *Metodología de diseño para ingeniería*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- BARDAHL. (2020). *La importancia del inyector*. <https://tinyurl.com/mt9p47vr>
- Eltiempo.es (s. f.). *Barómetro* [en línea]. <https://tinyurl.com/3uz2f8vn>
- Escobar-Garzón, A., Villanueva, N., Pérez, G. y Hernández, T. E. (2007). Diseño y construcción de un banco de pruebas para las boquillas de inyección de combustibles de los motores PW100 y PT6. *Ciencia y Poder Aéreo*, 2(1), 41-44. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.82>
- Ferreira-Garzón, R. A., Jurado-Ballesteros, E. R. y Ayala-González, J. A. (2008). *Diseño de un banco de pruebas para motores PT6T-3* (trabajo de grado, Universidad de San Buenaventura). <https://tinyurl.com/2ewpk8aa>
- Ferrero, A., Huertas, R., Perales, E., Huraibat, K. y Santafé-Gabarda, P. (s. f.). Medida de la apariencia. *E-medida: Revista Española de Metrología* [en línea]. <https://tinyurl.com/2fmm42w4>
- Ferros Texar. (s. f.). *Acero estructural: ¿qué es y para qué se utiliza?* [en línea]. <https://tinyurl.com/t9rnwhay>
- Hernández-Rueda, J. A., Gómez-Lugo, J. H., Gutiérrez-Nieto, D. O., Díaz-Gaviria, J. H. y Casallas-Moreno, E. A. (2007). Banco de prueba de inyectores para motores GARRETT TPE331-10R-513C y PT6A-25C. *Ciencia y Tecnología Aero-náutica* [en línea]. <https://tinyurl.com/2ys2d4b9>
- Galmés-Belmonte, B. (2015). *Motores de reacción y turbina de gas* (2.ª ed.). Paraninfo.
- Guerrero-Ángeles, V. R. (2016). *Banco de montaje para motores a reacción*. Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo.
- IQR Ingeniería Química. (2021, marzo 6).  *tubo de Pitot: ¿qué es y cómo funciona?* [en línea]. <https://tinyurl.com/nhxyndsc>

- KeepCoding. (2021, septiembre 22). *Ventajas y desventajas de Python* [en línea]. <https://tinyurl.com/98y7um6p>
- Londoño-Gómez, C. D. y Méndez-Tejero, D. A. (2014). *Diseño, construcción e implementación de un banco de prueba para la caja de accesorios del motor J-85 del avión A 37-B de la Fuerza Aérea Colombiana* (trabajo de grado, Fundación Universitaria Los Libertadores). Repositorio institucional. <https://tinyurl.com/yeyms2sn>
- Mejoras. (s. f.). *Hydrins. Caudalímetro de inserción electromagnético para medida de caudal* [en línea]. <https://tinyurl.com/7x54f84t>.
- Pérez, J. J. y Moreno, W. L. (2009). *Banco de prueba de inyectores para motores PT-6 A/T y PT-6/T-3b*. TecnoESUFA.
- RACE. (2022, noviembre 16). *Problemas con los inyectores: síntomas y fallos* [en línea] <https://tinyurl.com/yz4a5ujj>
- Renting Finders. (s. f.). *Manómetro* [en línea]. <https://tinyurl.com/vb92yz9r>
- Rivas, A. G. (2003). *Motores de turbina de gas* [en línea]. <https://tinyurl.com/2rrvnh6v>
- Ocaña-Sánchez, C. F. y López-Velasteguí, D. A. (2018). *Repotenciación del banco de pruebas para los inyectores del motor PT6 A-68C del avión A-29B Súper Tucano perteneciente al grupo logístico No. 232 de la Fuerza Aérea Ecuatoriana* (trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Repositorio institucional ESPOCH. <https://tinyurl.com/dee8nxua>
- Servinox. (2014, marzo 14). *Hablemos sobre el acero inoxidable* [en línea]. <https://tinyurl.com/4scf2fed>
- Silver Automation Instruments. (s. f.). *Ventajas y desventajas del medidor de flujo electromagnético* [en línea]. <https://tinyurl.com/4x7yt25x>
- SmartMeasurement. (s. f.). *Ultrasonic Flow Meters: Revolutionizing Industry Standards* [en línea]. <https://tinyurl.com/2pj56m4e>
- Taco-Álvaro, D. (2015, agosto 12). *Normas de seguridad de un operador industrial* [en línea]. <https://tinyurl.com/ya7xh338>
- Vega-Muñoz, A. (2019). Herramientas para incrementar la Innovación Tecnológica de productos en Latinoamérica. *Latin American Journal of International Affairs*, 2(1). <https://www.lajia.net/lajia/article/view/4>
- Visure. (s. f.). *Qué son los requisitos funcionales: ejemplos, definición, guía completa* [en línea]. <https://tinyurl.com/mtbpsdem>

# Dynamic analysis of rounded projectiles: Software solution development

| Fecha de recibido: 28 de julio 2023 | Fecha de aprobado: 17 de abril 2024 |

| Reception date: July 28, 2023 | Approval date: April 17, 2024 |

| Data de recebimento: 28 de julho de 2023 | Data de aprovação: 17 de abril de 2024 |

## Juan David Roa Camargo

<https://orcid.org/0009-0004-0756-464X>  
roa\_juan@javeriana.edu.co

Estudiante de Ingeniería Mecánica  
Investigador – Pontificia Universidad  
Javeriana, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Mechanical Engineering Student  
Researcher – Pontificia Universidad  
Javeriana, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing

Engenharia Mecânica Estudante  
Investigador – Pontificia Universidad  
Javeriana, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escritor

## Juan Pablo Ruiz Puente

<https://orcid.org/0009-0005-0995-5836>  
juanruizp@javeriana.edu.co

Estudiante de Ingeniería Mecánica  
Investigador – Pontificia Universidad  
Javeriana, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Mechanical Engineering Student  
Researcher – Pontificia Universidad  
Javeriana, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing

Engenharia Mecânica Estudante  
Investigador – Pontificia Universidad  
Javeriana, Colômbia

Função do investigador: Teórico e escritor

## Camilo Andrés Bayona Roa

<https://orcid.org/0000-0001-9508-1779>  
ca\_bayonar@javeriana.edu.co

Doctor en Ingeniería  
Docente e investigador – Pontificia  
Universidad Javeriana, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación: BASPI

Dh. D. in Engineering  
Professor and researcher – Pontificia  
Universidad Javeriana, Colombia

Researcher's role: theorist and writer  
Research Group: BASPI

Doutoramento em Engenharia

Docente e investigador – Pontificia  
Universidad Javeriana, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escritor  
Grupo de investigação: BASPI

**Cómo citar este artículo:** Roa Camargo, J. D., Ruiz Puente, J. P. & Bayona Roa, C. A. (2024). Dynamic analysis of rounded projectiles: Software solution development. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 46-57. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.822>



## Dynamic analysis of rounded projectiles: Software solution development

## Análisis dinámico de proyectiles redondeados: desarrollo de soluciones con *software*

## Análise dinâmica de projéteis arredondados: Desenvolvimento de solução de *software*

**Abstract:** The study of object motion has intrigued scholars for centuries, yet grasping the underlying physics and mathematics has remained a challenge. However, recent advancements in computational methods and the utilization of mathematical models from the 18<sup>th</sup> century have enabled a profound understanding of motion and accurate approximations of real-life object movements. By harnessing tools such as MATLAB and engineering analytical methods, we can create applications that simulate the motion of spherical projectiles. This provides valuable insights into real-world object motion and the associated forces and physics. Dynamic analysis, encompassing both kinematics and kinetics, allows for a detailed exploration of motion dynamics. Inspired by the concept of an ‘Olympic goal,’ (Clayfield, n. d.), our developed application allows users to visualize the impact of aerodynamic forces on objects. It demonstrates concepts like drag, lift, and the ‘Magnus effect,’ offering initial insights into object motion in fluid environments (Mody, 2015). This understanding acts as a foundation for modeling more intricate systems, including airplanes, rockets, and aerospace components. Notably, the application’s graphical representations of essential modeling elements provide a significant advantage. Furthermore, by emphasizing the motivations behind these phenomena, the application fosters curiosity and encourages users to delve deeper into these captivating events.

**Keywords:** Drag; kinematics; kinetics; lift; Magnus effect; mathematical modelling.

**Resumen:** El estudio del movimiento de los objetos ha intrigado a los académicos durante siglos, pero comprender la física y las matemáticas subyacentes ha sido un desafío. Los avances recientes en métodos computacionales y el uso de modelos matemáticos del siglo XVIII permitieron comprender el movimiento y aproximaciones precisas de los movimientos reales de los objetos. Al aprovechar herramientas como MATLAB y métodos analíticos de ingeniería, podemos crear aplicaciones que simulen el movimiento de proyectiles esféricos. Esto brinda valiosos conocimientos sobre el movimiento real de los objetos y las fuerzas y la física asociadas. El análisis dinámico, que abarca tanto la cinemática como la cinética, permite una exploración detallada de la dinámica del movimiento. Inspirada en el concepto de un ‘gol olímpico’, nuestra aplicación desarrollada permite a los usuarios visualizar el impacto de las fuerzas aerodinámicas en los objetos. Demuestra conceptos como la resistencia, la sustentación y el ‘efecto Magnus’, ofreciendo ideas iniciales sobre el movimiento de los objetos en entornos fluidos. Esta comprensión sienta las bases para modelar sistemas más complejos, como aviones, cohetes y componentes aeroespaciales. Es importante destacar que las representaciones gráficas de los elementos esenciales de modelado de la aplicación ofrecen una ventaja significativa. Además, al enfatizar las motivaciones detrás de estos fenómenos, la aplicación despierta la curiosidad y anima a los usuarios a profundizar en estos eventos cautivadores.

**Palabras clave:** arrastre; cinemática; cinética; sustentación; efecto Magnus; modelización matemática.

**Resumo:** O estudo do movimento de objetos tem intrigado estudiosos há séculos, no entanto, compreender a física e matemática subjacentes tem sido um desafio. No entanto, os avanços recentes em métodos computacionais e a utilização de modelos matemáticos do século XVIII permitiram uma compreensão profunda do movimento e aproximações precisas dos movimentos reais dos objetos. Ao utilizar ferramentas como MATLAB e métodos analíticos da engenharia, podemos criar aplicações que simulam o movimento de projéteis esféricos. Isso proporciona insights valiosos sobre o movimento de objetos no mundo real e as forças e a física associadas. A análise dinâmica, que abrange tanto a cinemática quanto a cinética, permite uma exploração detalhada da dinâmica do movimento. Inspirada pelo conceito de um ‘gol olímpico’, nossa aplicação desenvolvida permite que os usuários visualizem o impacto das forças aerodinâmicas nos objetos. Ela demonstra conceitos como arrasto, sustentação e o ‘efeito Magnus’, oferecendo insights iniciais sobre o movimento de objetos em ambientes fluidos. Essa compreensão serve como base para modelar sistemas mais complexos, incluindo aviões, foguetes e componentes aeroespaciais. É importante destacar que as representações gráficas dos elementos essenciais de modelagem da aplicação proporcionam uma vantagem significativa. Além disso, ao enfatizar as motivações por trás desses fenômenos, a aplicação desperta a curiosidade e incentiva os usuários a se aprofundarem nesses eventos cativantes.

**Palavras-chave:** Arrasto; cinemática; cinética; elevação; efeito Magnus; modelagem matemática.

## Introduction

Projectiles have played a significant role throughout human history, serving purposes ranging from hunting and defense to space exploration. The study of projectile motion is crucial in achieving these objectives, with its analysis dating back several centuries. Beginning with Aristotle in the classical period of Greece during the 4th century, the study of motion evolved into more practical methodologies, notably exemplified by Isaac Newton in the 17th century (Dixit *et al.*, 2017). This branch of study, known as dynamics, encompasses two main areas: kinematics, which focuses on movement without considering forces, and kinetics, which investigates the forces responsible for object motion. Understanding these phenomena has been of great interest, particularly due to the inherent challenges in modeling such systems. Complex interactions with fluids, such as lift and drag forces, significantly influence an object's motion through the air, enabling the use of airplanes to overcome gravity.

Gaining a comprehensive understanding of how objects respond to these forces allows us to decipher their motion. Beginning with the modeling of a sphere or rounded projectile, which may appear simple at first glance but progressively becomes more challenging as we consider variables and equations that change over time, we encounter additional elements that influence their behavior. For instance, rotational effects, such as the 'Magnus effect,' explain why rotating objects in fluids alter their direction due to a force orthogonal to both the object's velocity and rotation vectors (Kray *et al.*, 2013). Parameters like the Reynolds number indicate the level of fluid turbulence (Blevins, 1985), while the drag and lift coefficients vary over time based on changes in velocity. Given the complex nature of these forces, which are also instrumental in understanding accelerations, we employ computational tools such as MATLAB.

Utilizing MATLAB's app designing tool, MATLAB App Designer, we can develop a user-friendly and intuitive software that predicts the movement of rounded projectiles using computational and numerical methods.

This interactive software enables users to manipulate variables and observe the progression of forces, accelerations, velocities, positions, and other essential data required to model the projectile's trajectory. The resulting trajectory is visualized in a three-dimensional plane, providing a comprehensive and vivid understanding of the projectile's motion, enriching the user's conceptual grasp.

The primary objective of this work extends beyond the mere development of this tool; it aims to communicate the underlying computational approach and its implementation to the academic community. By doing so, we seek to not only showcase the versatility and power of MATLAB in solving complex mechanical problems, but also to offer this software as a valuable educational resource. We envision its application in academic settings to facilitate a deeper understanding of projectile motion, offering a practical teaching-learning tool that bridges theoretical knowledge with real-world application. Furthermore, this initiative opens the door for its adaptation and utilization in a broader range of mechanical problems, encouraging exploration, innovation, and a hands-on approach to learning in the fields of physics and engineering. Through this dissemination, we aim to inspire further research, collaboration, and development of educational tools that leverage computational methods for enhanced understanding and innovation in various scientific domains.

## Objectives

*Main objective:* To construct a sophisticated yet user-friendly software that accurately simulates the trajectory of a spherical projectile. The core aim is to utilize vector mechanics to create a computational model that not only reflects real-life movements but also demonstrates the application of fundamental physical laws in a way that resonates with real-world observations.

*Secondary objectives:*

- demonstrate the applicability of the computational model by simulating a real-life scenario,

integrating authentic values and measurements derived from actual events.

- To design an intuitive interface within the software that enables users to effortlessly explore and manipulate key variables influencing projectile motion, such as forces, accelerations, and velocities, thereby fostering a deeper understanding of the dynamics at play.
- To communicate the computational approach to the academic community, such that it can be exploited in other mechanic problems and teaching-learning opportunities.

## Methodology

We will formulate first the model in its most illustrative expression, later on we will continue with the development of the mathematical modeling, finally our application or solution will be held by the explanation of how the code works, and with this we will give a final answer to our problem, which — as said before — it is based on the understanding of how motion works on projectiles with a software solution approach.

## Understanding the Problem

Grasping the principles of mathematics and physics in practice is notably challenging. This challenge intensifies when we attempt to map these theoretical concepts into real-world scenarios. A key issue we face is the translation of these theories into applications that are intuitive and relatable. In our context, the movement of spherical projectiles offers a prime example of this problem. We will examine the ‘Olympic Goal’ in soccer to highlight the complexities involved. This scenario encapsulates the pivotal characteristics of projectile motion, demonstrating the intricate interplay of forces that govern the flight of a rounded projectile. The problem lies in distilling these multifaceted principles into a format that is easily understood and visualized, providing a clear model that mirrors the real behavior of round projectiles in a comprehensible manner.

## Physical and Mathematical Modeling

### Part I – Space

Before delving into further detail, it is essential to establish a frame of reference. In physics, the choice of reference frame is arbitrary and largely dependent on the observer’s perspective; there is no singular ‘ideal’ frame of reference. For our purposes, we have selected a reference system that provides the most clarity and relevance for interpreting our specific problem, we will be using the following:

- $z$  will be used for height
- $y$  will be used for depth
- $x$  will be used for length

In our soccer field, this can be visualized as given in Figure 1.

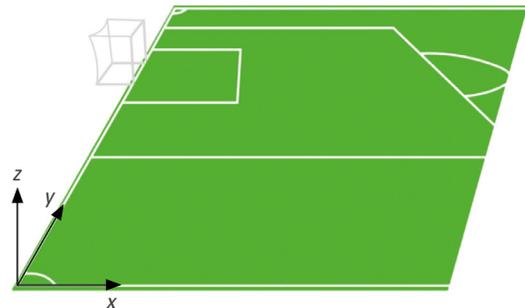


Figure 1. Illustration of soccer field with system of reference  
Source: Own elaboration.

### Part II – Dynamics Approach

Firstly, to describe the dynamics of a spherical projectile, we used the Newton’s Dynamics Principle (Meriam & Kraige, 2012), which establishes that all the forces acting in the object (projectile) of mass  $m$  are proportional to its acceleration  $a$ . This is:

$$\Sigma \mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1)$$

For convenience, bold notation is used for vectors and tensors in the present work. For a spherical projectile, if the external disturbances caused by its

movement through a fluid are considered, then the following forces act on the sphere: its weight  $\mathbf{W}$ , the buoyant force  $\mathbf{F}_B$ , the Magnus force  $\mathbf{F}_M$  (being a sort of lift) and the drag force  $\mathbf{F}_D$ . Hence:

$$\mathbf{F}_D + \mathbf{F}_M + \mathbf{F}_B + \mathbf{W} = m\mathbf{a} \quad (2)$$

Furthermore, to properly describe how these forces act on the sphere, we must compute the magnitude of each force. For this reason, a Cartesian reference system is used as follows:

**Table 1.**  
General description of the dynamic equations

**On x-axis**

$$F_{D_x} + F_{M_x} = ma_x \quad (3)$$

**On y-axis**

$$F_{D_y} + F_{M_y} = ma_y \quad (4)$$

**On z-axis**

$$F_{D_z} + F_{M_z} + F_B + W = ma_y \quad (5)$$

Once our dynamic equations have been defined, we identify the parameters and variables of the problem. In this case, the mass of the projectile is known, as well as the forces at each instant of the flight. Our only unknown is the acceleration, which describes the kinematics of the projectile (Cook, 2007). The magnitude of the drag force is defined for each -axis as follows:

$$F_{D_i} = -C_D A \frac{\rho V_i^2}{2} [N] \quad (6)$$

where:

- $C_D$ : Drag coefficient
- $A$ : Cross-sectional area [ $m^2$ ]
- $\rho$ : Density of the fluid [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
- $V_i$ : Magnitude of the projectile's relative velocity to the fluid in the -axis [ $\frac{m}{s^2}$ ]

Here, the drag force is *negative* as it opposes to the velocity of the object (contrary to the direction of

movement) and hence, it varies for each axis with the respective velocity (Sarafian, 2015). Also, the drag coefficient is given by the following non-linear approximated function (Figure 2) of the Reynolds number  $\Re$ , which is defined as follows:

$$\Re = \frac{VL}{\nu} \quad (7)$$

where:

- $V$ : Magnitude of the projectile's velocity [ $\frac{m}{s}$ ]
- $L$ : Characteristic length of the object (in this case, the diameter) [ $m$ ]
- $\nu$ : Kinematic viscosity of the fluid [ $\frac{m^2}{s}$ ]

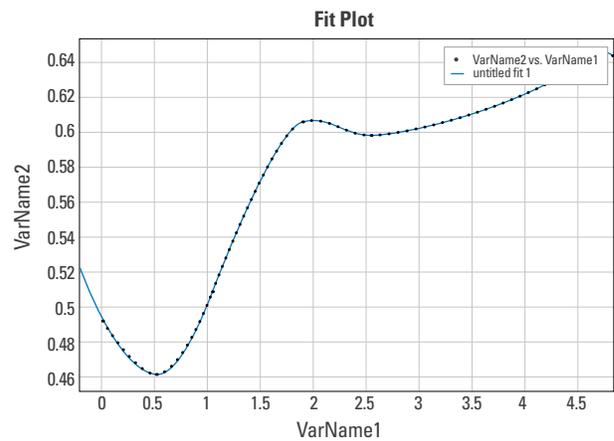


Figure 2. Non-linear approximation of the drag coefficient for a sphere in terms of the Reynolds Number<sup>1</sup>. The resulting approximation is:

$$C_D = 0.5195 * \sin(2.718e - 6\Re + 0.1875) + 0.2265 * \sin$$

Source: Own elaboration.

Meanwhile, the Magnus force on each axis depends on the lift coefficient, the angular velocity  $\omega$  and the velocity of the projectile  $\mathbf{v}$ . Its direction is given by  $\omega \times \mathbf{v}$  (Robinson y Robinson, 2013), so that for each axis the magnitude is defined as:

$$F_{M_x} = C_{L_x} A \frac{\rho V_y^2}{2}, F_{M_y} = C_{L_y} A \frac{\rho V_z^2}{2}, F_{M_z} = C_{L_z} A \frac{\rho V_x^2}{2} [N] \quad (8)$$

<sup>1</sup> This was taken from Cengel & Cimbala (2010) and numerically interpolated with <https://apps.automeris.io/wpd/>.

Here, the lift coefficient, similarly to the drag coefficient, is also given by a non-linear approximated function (Figure 3), but in this case it depends on a *rotation ratio* defined for each axis as:

$$Ratio_x = \frac{\omega_x L}{2v_y}, Ratio_y = \frac{\omega_y L}{2v_x}, Ratio_z = \frac{\omega_z L}{2v_z} \quad (9)$$

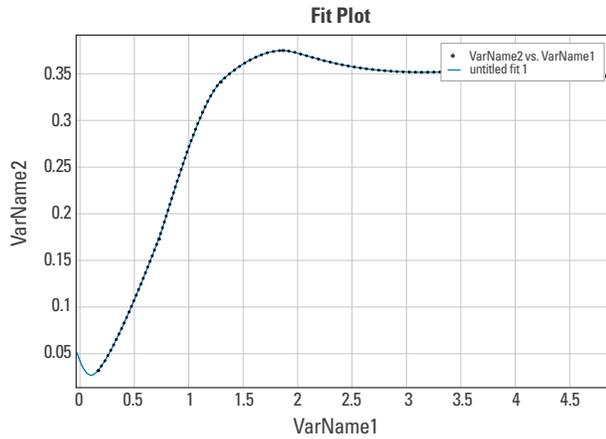


Figure 3. Non-linear approximation of the lift coefficient for a sphere in terms of the rotation ratio<sup>2</sup>. For example, the  $C_{Lx}$  is  $C_{Lx} = 0.2944 + (-0.1077 * \cos(Ratio_x * w1)) + (-0.03208 * \sin(Ratio_x * w1)) + \dots$   
Source: Own elaboration.

The buoyant force is defined by the Archimedes Principle as follows:

$$F_B = \rho g V \quad (10)$$

where:

$\rho$ : Density of the fluid  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$g$ : Gravitational acceleration  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$V$ : Displaced (submerged) volume of the object  $[m^3]$

It is important to mention that the buoyant force can be either a negative, positive, or neutral buoyancy. Specifically, it's negative if its effect is negligible and other forces like the weight have a far-reaching

impact. If the buoyancy is positive, then it's the opposite: the biggest force is the buoyant. So, if its neutral, that means that the buoyant force is in equilibrium with other forces along its axis of action. And the weight if the projectile is  $W = mg$ . Variables such as air density, kinematic viscosity and gravity change with altitude, yet the change is very subtle, and it is considerable once we have high altitudes such as 1000 m and above.

Rewriting out the forces, we have the complete dynamic equations from where we can solve for each component of the acceleration. This is:

$$a = a_x i + a_y j + a_z k \quad (11)$$

$$a_x = \frac{A\rho}{2m} (-C_D v_x^2 + C_{Lx} v_y^2) \quad (12)$$

$$a_y = \frac{A\rho}{2m} (-C_D v_y^2 + C_{Ly} v_x^2) \quad (13)$$

$$a_z = \frac{A\rho}{2m} (-C_D v_z^2 + C_{Lz} v_x^2) + \frac{g}{m} (\rho V - m) \quad (14)$$

With  $i, j, k$  being the unit vectors of the Cartesian reference system.

### Part III – Kinematics

Now, as the lift coefficient vary through time (depending on the velocity), the use of numerical methods is necessary to integrate the previous equation for each time instant of the flight. Several possibilities can be adopted here, such as the family of high-order Runge-Kuta schemes. For simplicity and clearness of our numerical formulation, we use the Euler's method to integrate the numerical solution for velocities and positions of the projectile at each time instant. A thorough analysis of the numerical accuracy and stability is presented at the results section to clarify the numerical integrator choice.

We know that if an object moves with a varying acceleration, then its velocity and position will greatly change. The acceleration is integrated in time, obtaining the velocity of the object defined as:

<sup>2</sup> This was taken from Cengel & Cimbala (2010) and numerically interpolated with <https://apps.automeris.io/wpd/>.

$$\mathbf{v}(t + \Delta t) = \mathbf{v}(t) + \mathbf{a}(t)\Delta t \quad (15)$$

$$\mathbf{v}(t + \Delta t) = v_x(t + \Delta t)\mathbf{i} + v_y(t + \Delta t)\mathbf{j} + v_z(t + \Delta t)\mathbf{k} \quad (16)$$

where:

$t$ : Time instant [s]

$\Delta t$ : Time increment [s]

$\mathbf{v}(t)$ : Projectile velocity at  $(t)$   $\left[\frac{m}{s}\right]$

$\mathbf{v}(t + \Delta t)$ : Projectile velocity at  $(t + \Delta t)$   $\left[\frac{m}{s}\right]$

If the acceleration is integrated twice, we obtain the position of the object defined as:

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = \frac{1}{2}\mathbf{a}(t)\Delta t^2 + \mathbf{v}(t)\Delta t + \mathbf{r}(t) \quad (17)$$

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = x(t + \Delta t)\mathbf{i} + y(t + \Delta t)\mathbf{j} + z(t + \Delta t)\mathbf{k} \quad (18)$$

where:

$\mathbf{r}(t)$ : Projectile position at  $(t)$  [m]

$\mathbf{r}(t + \Delta t)$ : Projectile position at  $(t + \Delta t)$  [m]

It is important to mention that both the final position and the complete flight time are known parameters of the problem. Finally, using equations 11-18 we can simulate the complete kinematics of the spherical projectile.

## Coding process

We developed our main code by using all our variables and equations, and we integrated them by using the Euler method, which is a way to solve such problems involving differential equations. The use of this method is applied through a loop that resembles that of an iteration step by step, choosing our minimum value of time that is related to the computational power we have available. The coded algorithm follows the steps to be explained next:

- 1. Initialization:** The code first sets up the necessary physical constants, such as gravity, drag, and Magnus coefficients. It also initializes arrays to store the projectile's positions, velocities, and accelerations.
- 2. Defining forces:** The forces acting on the projectile are defined as functions to be used during the Euler's method loop. This includes gravitational force, drag force (which depends on the velocity and drag coefficient), and Magnus force (which depends on the rotation velocity of the projectile).
- 3. Euler's method loop:**
  - **Forces calculation:** Forces are computed as functions of the actual velocities.
  - **Acceleration calculation:** Forces are divided by mass to obtain acceleration.
  - **Velocity update:** The current acceleration is added to the current velocity, multiplied by the time step, to obtain the new velocity.
  - **Position update:** The current velocity is added to the current position, multiplied by the time step, to obtain the new position.
  - **Terminal velocity check:** If the projectile reaches terminal velocity, it sets the velocity to the terminal velocity.
  - **Stop condition:** The loop checks whether the projectile has hit the ground, signaling that the simulation should stop.
- 4. Storage of parameters:** Throughout the simulation, various parameters such as drag force, lift coefficients, and Reynolds number are stored at each time step.
- 5. Termination:** The simulation ends when the stop condition is met.

We used MATLAB App Designer to build up an interface where we could change the projectiles and fluids parameters and where we could analyze the position, velocities, and accelerations of the projectile. But also, the software interface is designed to report the nondimensional coefficients and calculated forces along the projectile flight.

## Simulation and results

It's important to mention that the Eulers method was used to compute the accelerations, as it provides a

minimum error by calculating the values with an iterating differential, we developed an UI (user interface) that allows the user to easily use all the important variables that could get measured with utensils in real life. In this regard, we use several sources of data for real life measurements of a flying soccer ball and its properties, between them we can find that we have:

- Velocities: less than 211 km/h or less than 58.6 m/s. (Clayfield, n. d.).
- Mass of a ball: 450g aprox. (TheFA, n. d.).
- Diameter of a ball: 22 cm or 0.22 m (RSS).
- Air density (at 273 kelvin and 101.325 kPa):  $1.293 \text{ kg/m}^3$  (Earth Data Open Access for Open Science, n. d.).
- Air kinematic viscosity:  $1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  (Cadence CFD Solutions, n. d.)
- Gravity acceleration:  $9.803 \text{ m/s}^2$  (Meyers, 2001).

The following screen (Figure 4) shows the initial conditions used for the software interface.

Under those conditions, we run the simulation and obtain a trajectory that is visualizable in three dimensions, a trajectory that is constructed by using the Euler's method point by point, and resolves into an actual parabola like trajectory, as seen in Figure 5.

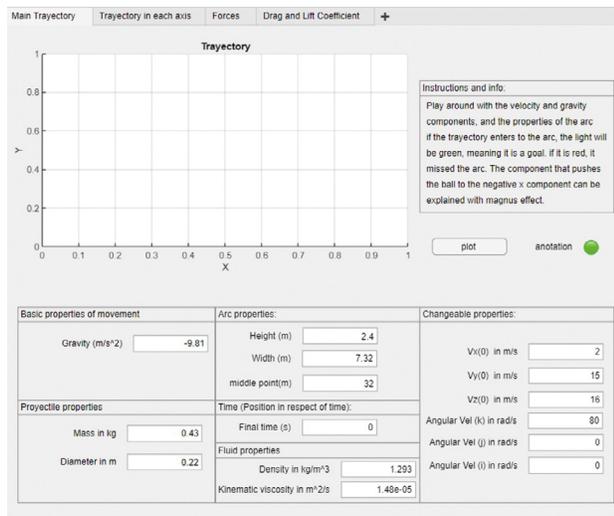


Figure 4. User interface: Initial conditions and parameters  
Source: Own elaboration.

Reports are also available for the trajectory visualization in two-dimensional planes, together with calculated forces and drag and lift coefficients through the projectile's flight. This has been designed to report that most of the accelerations dynamically depend on the calculated forces. This is observed in a separated graph: forces and accelerations actually change not being completely linear nor completely parabolic, showing how in real life we approximate these complex results as a parabola. Our position, velocities and accelerations results are shown in Figure 6.

As we can see, there are components that change over time, and by clicking on the interface graph, the exact value is deployed (red for positions, green for velocities and blue for accelerations). The drag forces (which are the forces of air resistance due to the friction and pressure of air), the Magnus force, and/or the gravity are depicted. On the z-axis or vertical axis, the acceleration tends to be the common gravity acceleration measurement when the ball is in its maximum height, where the velocities are small and only the gravity is considerable at all (in such axis at least).

We consider that the distance between the center of the Earth and the ball is considerable enough to even see a change of 1% of the gravity value. Yet if we want to consider such changes, we can make a difference

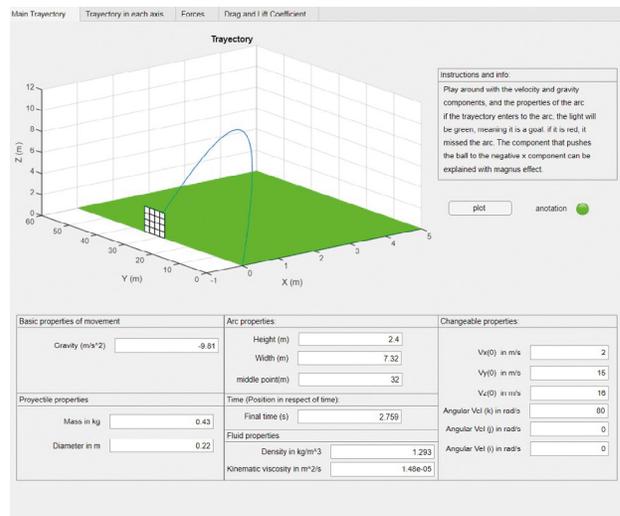


Figure 5. Trajectory result of the simulation  
Source: Own elaboration.

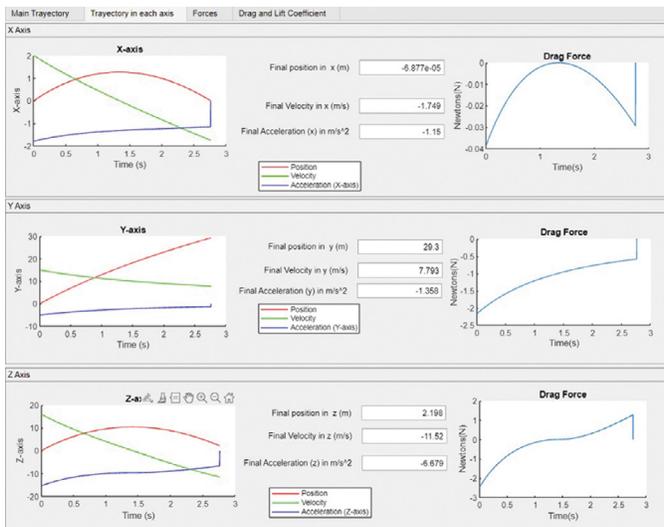


Figure 6. Developed trajectory and forces in each direction  
Source: Own elaboration.

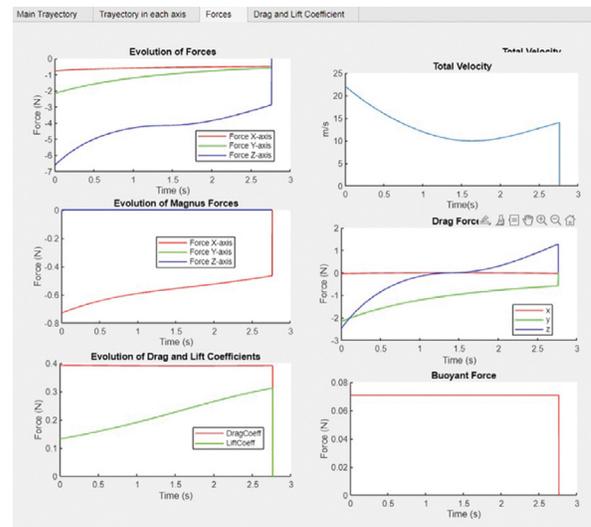


Figure 7. Developed forces in each direction  
Source: Own elaboration.

between our local gravity, air density and air viscosity, and the ones considered through formulas. Remember that such considerations are not only negligible by chance, but also because it requires more computing processing power, which is one of the reasons we use numerical methods that do not resemble less than 1 millisecond (to generate more precision), yet the one we used is enough to particular problems and more refined methods would actually show a similar behavior (such as Runge-Kutta of 4th order).

We can see the development of the Magnus force, the drag coefficient and lift coefficient, and other properties in Figure 7. We can observe that the buoyant force (which is considered if the ball would be weighted in a vacuum) is constant and really minimal, showing how little of an impact it actually has in a projectile (unless it is submerged in a denser liquid like water).

The Reynolds number and the lift and drag coefficients are depicted in Figure 8. On the drag coefficient, we can establish that we reach a plateau, where no noticeable variation is seen, this is due to the surface of the sphere (which is considered as a smooth ball). This is also the cause of the Figure 7 drag force constant behavior.

The Reynolds number result validates our model, since most of literature refer to the drag coefficient of a ball a number around 0.4, which is what we observed

in our simulation. Also notice that the lift coefficient changes over time, which also explains how the air resistance has an impact on how the projectile moves with the Magnus effect, and as we can see, the lift force actually decreases (because it is imparting less negative acceleration), and thus we see that the acceleration on the x-axis actually decreases. Remember that also the ratio between the velocity of rotation in rad/s and the velocity of an axis affect how the forces are developed, consider we also just have rotation in an axis that allows force on the x-axis, but the user can add different rotation directions.

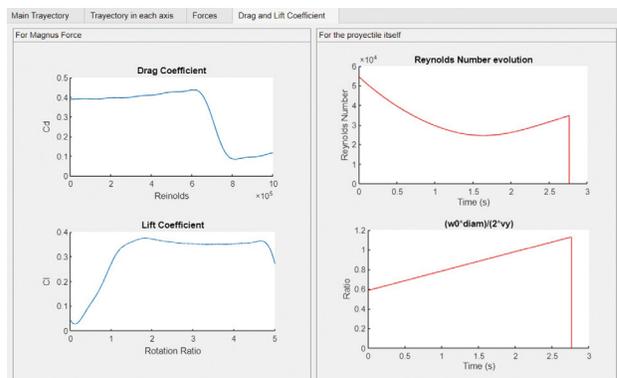


Figure 8. Developed non-dimensional coefficients  
Source: Own elaboration.

A further investigation is performed over the time step used in the Euler method. This is important in order to validate the use of the present software. In that regard, results for several time steps (0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 0.5, 1) is used to create comparative graphs that show the sensitivity of the simulation results to different time step sizes. These graphs shown in Figure 9 are important in numerical methods, like Euler's method, because they can show how a smaller time step can lead to more accurate results, although at the cost of increased computation time.

In the provided log-log plots of the Euler method's results, we observe a consistent trend towards stabilization of solutions with decreasing time step sizes. This indicates convergence of the method, which is a desired attribute in numerical simulations. The plots reveal a distinct proportional relationship between the logarithm of the time step size and the logarithm of the solution's differences, suggesting a power-law behavior characteristic of convergent processes.

Euler's method, being a first-order technique, should exhibit linear convergence. This is substantiated by the log-log plots where the relationship between the log of the time step size and the log of the error approximates a straight line with a slope of -1 for the position and -1 for the velocity. This slope indicates that the Euler method's error is directly proportional to the time step size, confirming its linear order of convergence. Such linear convergence is typical for Euler's method and serves as a validation of its implementation.

The plots do not show any indication of numerical instability within the computed time scales. Numerical instability typically manifests as divergent solutions when the time step size is too large, which is not observed here. The absence of instability within these human-scale computational times indicates that the chosen time step sizes are within the method's stability limits. This is a positive indication of the robustness of Euler's method for the simulated scenarios.

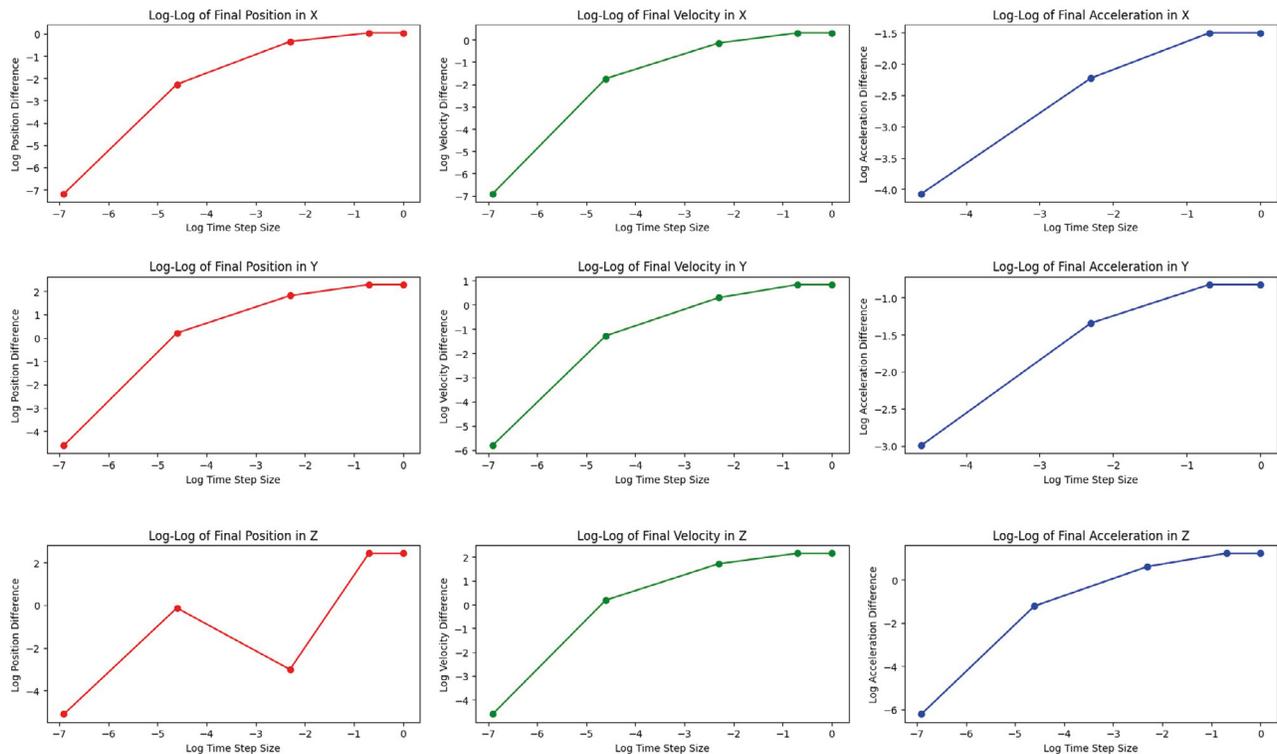


Figure 9. Convergence analysis of the Euler's method against the time step size. Log-log scales in all variables  
Source: Own elaboration.

While Euler's method has shown stable convergence, higher-order methods like Runge-Kutta offer the potential for more accurate solutions with fewer computational steps. The Runge-Kutta method, for example, can provide superior accuracy and stability, particularly for stiff equations or more complex dynamics. This could be a consideration for future work, where computational overhead allows for the use of more sophisticated algorithms to achieve better precision without proportionately increasing the computational cost.

## Conclusions

- We have a versatile and user-friendly application that allows us to understand in a more enjoyable way how forces exerted by a fluid on an immersed solid object work. This method can be applied to any form of projectile, yet we have encountered that it is the best example of the underlying mechanical concepts. For example, by approximating the complex fluid flow solution of the Navier-Stokes, by using solely the Newton's 2nd law and nondimensional coefficients.
- We also understand that its development is genuine and realistic as it can complete the trajectory using real data. Furthermore, the investigation here exposed is a demonstration of basic fluid simulation in an integral manner, which is the most comprehensive and functional in the experimental field. Besides, the only 'limit' of the simulation is under extreme situations, where in some cases thermodynamics would need to be applied to account for changing viscosity and density of the fluid based on altitude and temperature reached by the projectile in motion. However, it works as an immediate analysis, and we can confidently say that it could be applied in real life in different fields giving an appropriated and complete description of motion, such as scoring an Olympic goal in a soccer game.

- Other numerical integration methods, such as the Runge-Kutta of 4th order, may be a future line of research, improving the accuracy of the velocity and position of the projectile in our software. The conducted sensitivity analysis underscores the reliability of Euler's method for the range of time steps considered. However, for applications demanding higher precision or those involving more complex dynamics, the implementation of higher-order methods such as Runge-Kutta could be beneficial. The choice of the numerical method must balance the computational cost with the required accuracy, and our analysis provides a solid foundation for making an informed decision in this regard.

## References

- Anderson, J. D. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics* (5th ed.). McGrawHill.
- Ang, D. G. (2013). Shape and Size Matter for Projectile Drag. *The Journal of Advanced Undergraduate Physics Laboratory Investigations*, 2. <https://tinyurl.com/4k9uckwp>
- Blevins, R. D. (1985). *Applied Fluid Dynamics Handbook*. Van Nostrand Reinhold.
- Cadence CFD Solutions (n. d.). *The Relationship Between the Kinematic Viscosity of Air and Temperature*. Cadence System Analysis. <https://tinyurl.com/mtkpttn6>
- Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. (2010). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. McGrawHill.
- Clayfield, B. (n. d.). *How Fast is a Soccer Ball Kicked?* [online]. <https://tinyurl.com/3jm8mwmu>
- Cook, M. J. (2007). *Flight Dynamics Principles: A Linear Systems Approach to Aircraft Stability and Control*. Elsevier.
- Dixit, U. S., Hazarika, M. & Davim, J. P. (2017). *A Brief History of Mechanical Engineering (Materials Forming, Machining and Tribology)*. Springer.
- Earth Data Open Access for Open Science. (n. d.). *Air Mass/Density*. NASA. <https://tinyurl.com/mpfh3f8>
- Goldstein, S. (1938). *Modern Developments in Fluid Dynamics: An Account of Theory and Experiment Relating to Boundary Layers Turbulent Motion and Wakes*. Oxford University Press.

- Kray, T., Franke, J. & Frank, W. (2014). Magnus Effect on a Rotating Soccer Ball at High Reynolds Numbers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 124, 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.10.010>
- Meriam, J. L. & Kraige, L. G. (2012). *Engineering Mechanics: Dynamics* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Meyers, R. A. (Ed.). (2001). *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (3rd ed.). Academic Press.
- Mody, V. (2015). *High School Physics: Projectile Motion*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Robinson, G. & Robinson, I. K. (2013). The Motion of an Arbitrarily Rotating Spherical Projectile and its Application to Ball Games. *Physica Scripta*, 88(1). <https://doi.org/10.1088/0031-8949/88/01/018101>
- TheFA. (n. d.). *Law 2: The Ball*. IFAB Laws of the Game 2023-24 [online]. <https://tinyurl.com/4kut4smy>
- Said, A. A., Mshewa, M. M., Mwakipunda, G. C., Ngata, M. R. & Mohamed, E. A. (2023). Computational Solution to the Problems of Projectile Motion under Significant Linear Drag Effect. *Open Journal of Applied Sciences*, 13(4), 508-528. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2023.134041>
- Sarafian, H. (2015). Impact of the Drag Force and the Magnus Effect on the Trajectory of a Baseball. *World Journal of Mechanics*, 5(4), 49-58. <https://doi.org/10.4236/wjm.2015.54006>

# Comparative study of six antenna designs for receiving APT images from NOAA-19 in urban environments

| Fecha de recibido: 31 de enero 2024 | Fecha de aprobado: 17 de abril 2024 |

| Reception date: January 31, 2024 | Approval date: April 17, 2024 |

| Data de recebimento: 31 de janeiro de 2024 | Data de aprovação: 17 de abril de 2024 |

## Hernán Paz Penagos

<https://orcid.org/0000-0002-2692-1989>  
hernan.paz@escuelaing.edu.co

Doctor en Educación

Docente e investigador – Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación ECITRONICA, Semillero de investigación AstroSpace

Ph.D. in Education

Teacher and Researcher - Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia  
Researcher's role: theorist and writer

Researcher's role: theorist and writer ECITRONICA Research Group, AstroSpace research group

Doutoramento em Educação

Docente e investigador - Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colômbia  
Papel do investigador: teórico e escritor

Grupo de investigação ECITRONICA, grupo de investigação AstroSpace

## Esteban Morales Mahecha

<https://orcid.org/0009-0003-3897-0002>  
esteban.morales-m@mail.escuelaing.edu.co

Ingeniero Electrónico

Investigador – Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación ECITRONICA, Semillero de investigación AstroSpace

Electronic Engineering

Researcher – University Colombian School of Engineering Julio Garavito, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing ECITRONICA Research Group, AstroSpace research group

Engenheiro eletrônico

Investigador - Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colômbia  
Papel do investigador: teórico e escrito

Grupo de investigação ECITRONICA, grupo de investigação AstroSpace

## Alejandro Páez Avendaño

<https://orcid.org/0009-0005-8486-1952>  
ruben.campos@mail.escuelaing.edu.co

Ingeniero Electrónico

Investigador – Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación ECITRONICA, Semillero de investigación AstroSpace

Electronic Engineering

Researcher – University Colombian School of Engineering Julio Garavito, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing ECITRONICA Research Group, AstroSpace research group

Engenheiro eletrônico

Investigador - Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colômbia  
Papel do investigador: teórico e escrito

Grupo de investigação ECITRONICA, grupo de investigação AstroSpace

## Rubén Campos Riaño

<https://orcid.org/0009-0004-0119-9928>  
alejandropaez@mail.escuelaing.edu.co

Ingeniero Electrónico

Investigador – Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación ECITRONICA, Semillero de investigación AstroSpace

Electronic Engineering

Researcher – University Colombian School of Engineering Julio Garavito, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing ECITRONICA Research Group, AstroSpace research group

Engenheiro eletrônico

Investigador - Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colômbia  
Papel do investigador: teórico e escrito

Grupo de investigação ECITRONICA, grupo de investigação AstroSpace

**Cómo citar este artículo:** Paz Penagos, H., Morales Mahecha, E., Páez Avendaño, A., y Campos Riaño, R. (2024). Comparative study of six antenna designs for receiving APT images from NOAA-19 in urban environments. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 58-68. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.810>



## Comparative study of six antenna designs for receiving APT images from NOAA-19 in urban environments

## Estudio comparativo de seis diseños de antenas para la recepción de imágenes APT NOAA-19 en entornos urbanos

## Estudo comparativo de seis projetos de antenas para recepção de imagens APT NOAA-19 em ambientes urbanos

**Abstract:** The objective of this article is to design, build, test, and compare the performance of six antennas (Turnstile, QHF, double-cross, Moxon, V-dipole, and Eggbeater) used for receiving APT meteorological images transmitted from the NOAA-19 satellite in an urban environment. The process follows a four-phase methodology: research, tuning system development, design and simulation, construction, and testing. During the research phase, fundamental concepts such as RTL-SDR, NOAA satellites, and the APT format for image transmission are explored. Subsequently, the development of the tuning system involves the use of programs such as SDRsharp and WXtoImg to receive and decode the APT signal. The next phase encompasses the design, simulation, and construction of the antennas, with the selection of NOAA satellites. Virtual tools are employed to calculate dimensions and parameters, followed by the assembly of the antenna designs. Tests are conducted in open spaces, aligning with the satellite orbits, to receive images. Finally, the results are evaluated in terms of image resolution and audio power to determine the most suitable antenna arrays for this type of communication. The Moxon antenna emerged as the best-performing, recovering images with resolutions of 1.94 megapixels, while the QHF antenna exhibited the highest power reception at 1.9 W. The V-dipole, QHF, and Eggbeater antennas demonstrated the best coupling with the transmission line, achieving low reflection coefficients of 0.16. In conclusion, it is established that in urban environments, the Moxon and QHF antennas effectively receive APT images.

**Keywords:** APT, NOAA-19 satellite, meteorological images, RTL-SDR.

**Resumen:** El objetivo de este artículo es diseñar, construir, probar y comparar el rendimiento de seis antenas (Turnstile, QHF, double-cross, Moxon, V-dipole y Eggbeater) utilizadas para recibir imágenes meteorológicas APT transmitidas desde el satélite NOAA-19 en un entorno urbano. El proceso sigue una metodología de cuatro fases: investigación, desarrollo del sistema de sintonización, diseño y simulación, construcción y prueba. Durante la fase de investigación, se exploran conceptos fundamentales como RTL-SDR, satélites NOAA y el formato APT para la transmisión de imágenes. Posteriormente, el desarrollo del sistema de sintonización implica el uso de programas como SDRsharp y WXtoImg para recibir y decodificar la señal APT. La siguiente fase abarca el diseño, simulación y construcción de las antenas, con la selección de satélites NOAA. Se emplean herramientas virtuales para calcular dimensiones y parámetros, seguidas por el ensamblaje de los diseños de las antenas. Se realizan pruebas en espacios abiertos, alineándose con las órbitas de los satélites, para recibir imágenes. Finalmente, los resultados se evalúan en términos de resolución de imagen y potencia de audio para determinar las matrices de antenas más adecuadas para este tipo de comunicación. La antena Moxon surgió como la de mejor rendimiento, recuperando imágenes con resoluciones de 1.94 megapíxeles, mientras que la antena QHF exhibió la mayor recepción de potencia a 1.9 W. Las antenas V-dipole, QHF y Eggbeater demostraron el mejor acoplamiento con la línea de transmisión, logrando coeficientes de reflexión bajos de 0.16. En conclusión, se establece que, en entornos urbanos, las antenas Moxon y QHF reciben eficazmente imágenes APT.

**Palabras clave:** APT, satélite NOAA-19, imágenes meteorológicas, RTL-SDR.

**Resumo:** O objetivo deste artigo é projetar, construir, testar e comparar o desempenho de seis antenas (Turnstile, QHF, double-cross, Moxon, V-dipole e Eggbeater) usadas para receber imagens meteorológicas APT transmitidas do satélite NOAA-19 em um ambiente urbano. O processo segue uma metodologia de quatro fases: pesquisa, desenvolvimento do sistema de sintonia, design e simulação, construção e teste. Durante a fase de pesquisa, são explorados conceitos fundamentais como RTL-SDR, satélites NOAA e o formato APT para transmissão de imagens. Posteriormente, o desenvolvimento do sistema de sintonia envolve o uso de programas como SDRsharp e WXtoImg para receber e decodificar o sinal APT. A próxima fase abrange o design, simulação e construção das antenas, com a seleção dos satélites NOAA. Ferramentas virtuais são empregadas para calcular dimensões e parâmetros, seguidas pela montagem dos designs das antenas. Testes são conduzidos em espaços abertos, alinhando-se com as órbitas dos satélites, para receber imagens. Finalmente, os resultados são avaliados em termos de resolução de imagem e potência de áudio para determinar as matrizes de antenas mais adequadas para esse tipo de comunicação. A antena Moxon destacou-se como a de melhor desempenho, recuperando imagens com resoluções de 1,94 megapixels, enquanto a antena QHF exibiu a maior recepção de potência, com 1,9 W. As antenas V-dipole, QHF e Eggbeater demonstraram o melhor acoplamento com a linha de transmissão, atingindo coeficientes de reflexão baixos de 0,16. Em conclusão, estabelece-se que, em ambientes urbanos, as antenas Moxon e QHF recebem efetivamente imagens APT.

**Palavras-chave:** APT, satélite NOAA-19, imagens meteorológicas, RTL-SDR.

## Introduction

Receiving images from meteorological satellites has become indispensable for various fields, ranging from weather forecasting to natural disaster management. Satellites operated by the United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) play a crucial role in providing these valuable images globally. NOAA, a United States scientific agency, primarily focuses on the global monitoring of oceans and the atmosphere through its satellites. The satellites used in this study, namely NOAA-15, 18, and 19, are positioned in low polar orbits between 800 and 1500 km above the Earth's surface. They utilize high-frequency transmitters in the 137 MHz band to transmit collected data. Employing the APT (Automatic Picture Transmission) transmission format, these satellites encode captured images in amplitude modulation (Bosquez, 2016). With the RTL-SDR module, the carrier frequencies are tuned, and the WXtoImg software facilitates the decoding of APT signals into PNG images (Velasco & Tipantuña, 2017). SDR technology provides a cost-effective solution for tracking small satellites, thereby reducing ground station development and implementation costs (Peralta *et al.*, 2018).

A critical factor influencing the reception of NOAA satellite signals is the choice of antenna. The selection of an appropriate antenna significantly impacts the quality of received images. While the literature includes publications on antennas utilized for receiving images from NOAA satellites, analyzing their performance compared to one or two other antennas, it does not comprehensively cover a larger number of antennas, as noted by the authors (Bosquez, 2016; Velasco & Tupantuña, 2017). This article aims to answer the

question: What is the most suitable design for a low-cost, quickly constructible antenna that can be easily implemented and operated by university students for effective reception of images from NOAA satellites in urban environments? To address this inquiry, we compare various antennas and evaluate the results to determine the optimal choice for this application.

## Methodology

For the Transmission Media course (METX) within the study plan of the Electronic Engineering program, the instructor assigned a laboratory project to the students. This project involved assigning the study, characterization, and construction of a different type of antenna to each group in the course. Ten laboratory groups, each consisting of three members, worked on the design of the following antennas: Turnstile antenna, QHF antenna, double-cross antenna, Moxon antenna, V-dipole, and Eggbeater.

The following flowchart in Figure 1 illustrates the methodological design of the laboratory practice divided into specific phases.

In the research phase (Figure 2), each laboratory group consulted and studied the most relevant concepts related to RTL-SDR and its operation, the set of NOAA satellites, and their utilization for the study of data transmission. Additionally, the definition of the format through which the satellites transmit analog images (APT) was explored.

After acquiring the relevant information and comprehending the concepts, the groups proceeded to configure the receiving system for tuning, as shown in Figure 3.

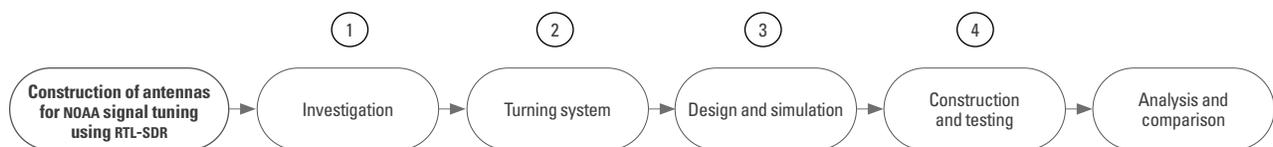


Figure 1. General flow diagram of the method followed

Source: Own elaboration.

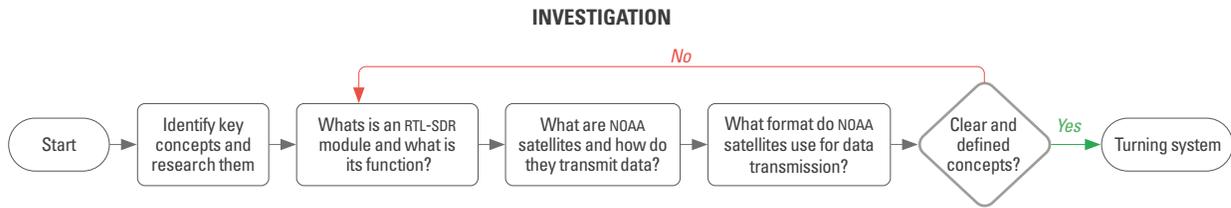


Figure 2. Flow diagram of the investigation  
Source: own elaboration.

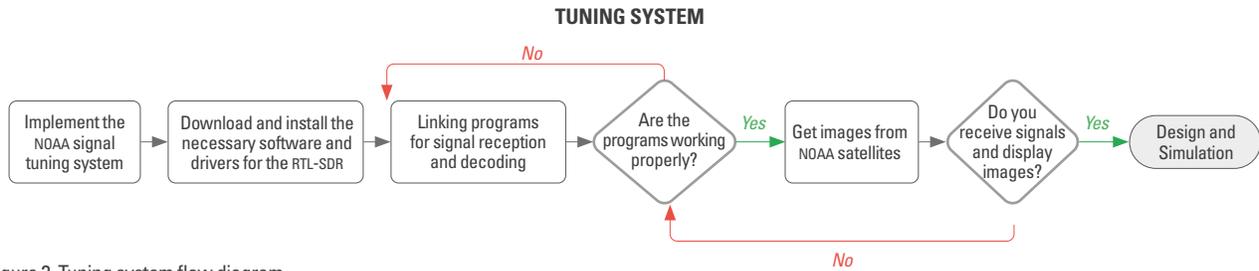


Figure 3. Tuning system flow diagram  
Source: Own elaboration.

To enable the tuning system, it is necessary to install and link the SDRsharp and WXtoImg programs for receiving and decoding the audio signal in APT format. Since the receiver is designed on a software-defined radio (RTL-SDR), it is essential to download the required drivers for its operation. This design aims to visualize the carrier signal on a computer using the SDRsharp software, thus confirming the functionality of the signal tuning system. Subsequently, the WXtoImg software is employed to demodulate and recover the received audio or image. Phase three, shown in Figure 4, consisted of the design and simulation of the antennas mentioned.

For this phase, the students selected the NOAA satellite to tune, as each satellite operates on a specific

frequency for data transmission, forming the basis for antenna design. Due to the course's nature, students possessed prior theoretical knowledge of antenna design. Consequently, they conducted a comprehensive review of the theory for each antenna type, identifying and determining the corresponding parameters for the design. Utilizing virtual design tools, the students calculated the dimensions and specifications of the antenna. In the case of simpler antennas, some students proceeded directly to construction. They verified the radiation pattern, directivity, and impedance of their designed antennas using the collected data through simulation.

Figure 5 shows the construction and testing phase of the receiving antenna for NOAA signal tuning using an RTL-SDR module.

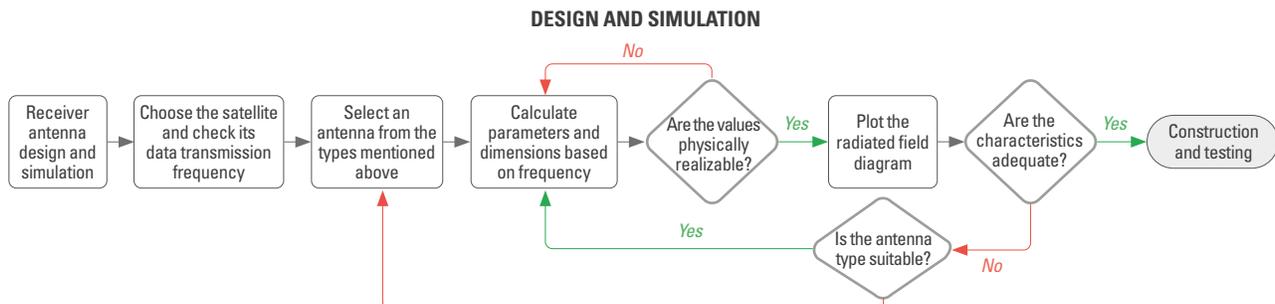


Figure 4. Design and simulation flow diagram  
Source: Own elaboration.

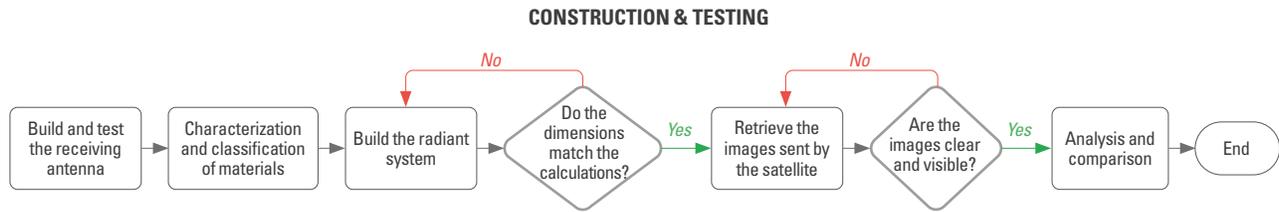


Figure 5. Construction and testing flow diagram

Source: Own elaboration.

Using their theoretical designs as a basis, the students classified and identified the recyclable materials intended for constructing their radiant system. They utilized recycled low-gauge copper pipes, wood, PVC (polyvinyl chloride) pipes, and joints for the antenna. The transmission line and tuning system were constructed using coaxial cable, SMA (Subminiature version A) connectors, a computer, and an RTL-SDR module. The selection of these materials adhered to specific criteria: recyclability, easy accessibility, and low cost.

Then, they consulted the schedules in which the satellites performed their respective orbits, and which coincided with the coordinates of Bogota ( $4^{\circ}46'56''\text{N}$   $74^{\circ}02'38''\text{O}$  / 4.78222, -74.0439), where the tests were carried out. The laboratory groups looked for open and clear spaces, with acceptable weather conditions to obtain better results.

In this phase, researchers identify both successes and failures resulting from the precision or lack thereof in antenna construction. Deviating too far from the theoretical measurements directly impacts the antenna's resonance frequency, leading to inadequate reception of NOAA signals. Additionally, poor impedance coupling between the antenna and the transmission line negatively influences data reception.

To ensure rigor and quality in the design and manufacturing of the antennas, uniform specifications and recyclable materials were employed for all antennas, utilizing the same manufacturing elements (aluminum, PVC, and  $75\ \Omega$  coaxial cable). Likewise, all antennas were specifically designed for reception at the 137.1 MHz frequency of the NOAA-19 satellite. To enhance data comparability, tests were conducted simultaneously at a single geographic site, under the same environmental conditions.

Each working group compared the data received based on criteria such as image resolution and peak audio power. This comparison aimed to inform a decision regarding the most suitable type of antenna for receiving this type of communication.

## Results

As mentioned above, the evaluation of the images was performed taking into account the resolution in megapixels, which was calculated using the number of pixels in the vertical and horizontal dimensions. A higher number of megapixels and pixels was interpreted as better image reception.

On the other hand, the audio of the carrier signal, which contained the transmitted image information, was analyzed through SDRsharp and Python COLAB software. The Fourier function was studied and the power spectrum of the audio was examined. The peak power of the audio was used as an indicator of the quality of the received signal. Higher peak power was considered as a better quality signal. The captured images are shown in Figure 6.

Figure 1a shows the image taken by the Turnstile antenna; Figure 1b shows the image corresponding to the QHF antenna, while Figure 1c shows the image captured by the double-cross antenna. The image obtained by the Moxon antenna is shown in Figure 1d, with the V-dipole antenna the image presented in Figure 1e. Finally, Figure 1f shows the image received by the Eggbeater antenna. The information on the resolution and peak power of the audio corresponding to the six antennas is shown in Table 1.

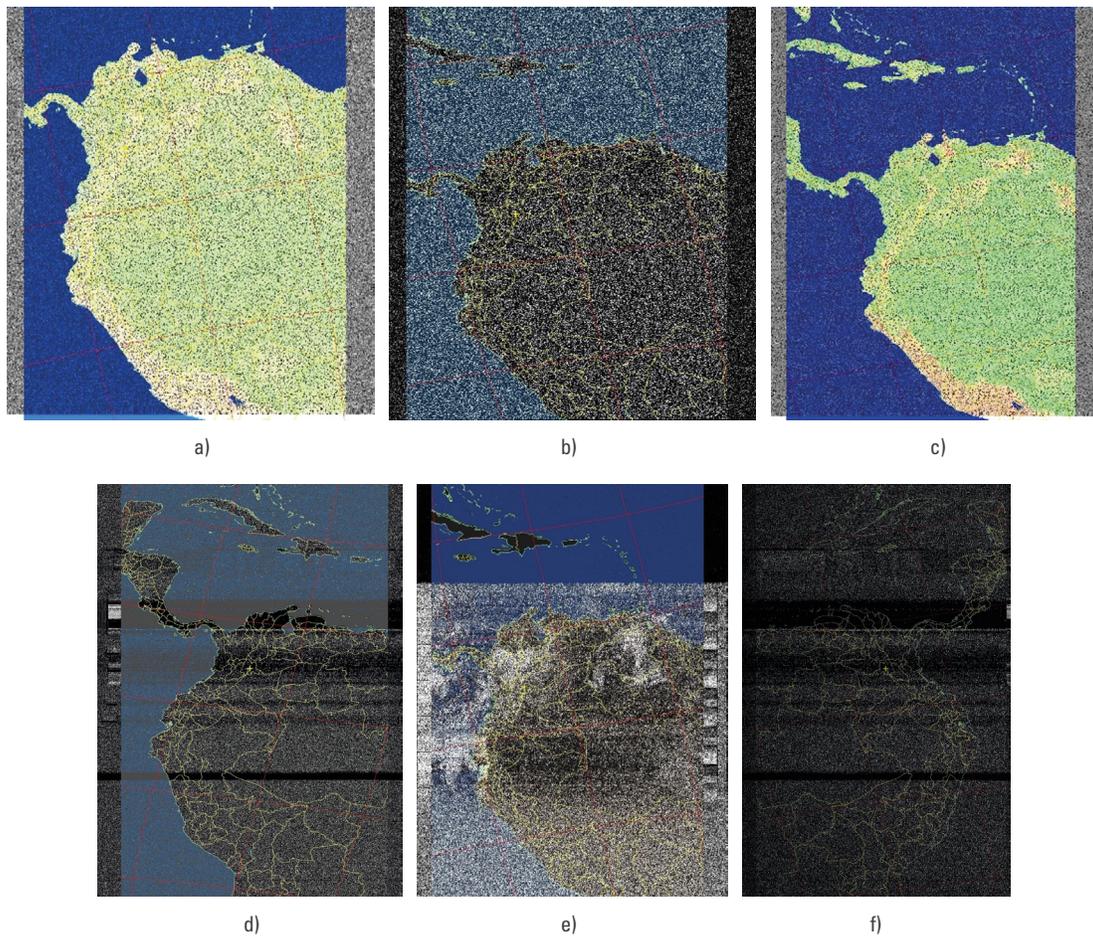


Figure 6. Images captured by the different antennas  
Source: Own elaboration.

Table 1.  
Comparative table of results obtained by each antenna

Image	Resolution (megapixels)	Pixels on vertical axis	Pixels on horizontal axis	Recovered signal peak power (mW)
1a	1,41544	1361	1040	863,23
1b	1,08056	1039	1040	1920,3
1c	1,4612	1405	1040	3,33
1d	1,93648	1862	1040	2,47
1e	1,43832	1383	1040	1264
1f	1,515544	1556	974	141,63

Source: Own elaboration.

Image 1d, captured using the Moxon antenna, stands out as the highest resolution image, reaching 1.93648 megapixels. This suggests that the Moxon

antenna is suitable for obtaining detailed and clear images. In contrast, image 1b, from the QHF antenna, stands out as exhibiting the highest carrier audio power, registering 1.9 W. Despite having a slightly lower resolution, the QHF antenna proves to be adequate in receiving weak signals. These findings highlight the particularities of the antennas in question.

## Analysis of results

NOAA satellites orbit in a polar orbit, so they appear in azimuth and elevation directions from any terrestrial location. Consequently, to receive APT signals

originating from these satellites, it is recommended to use receiving antennas with right-hand circular polarization (RHCP) and terrestrial radiation patterns with a minimum of nulls within the hemisphere, and a maximum in all directions in the horizontal plane. For this reason, antennas such as double-cross, QHF, Turnstile in axial mode, Moxon, V-dipole, and Eggbeater were selected, as shown in the following figures.

Delving into the topic, the Turnstile antenna in axial mode consists of a set of two half-wavelength dipoles aligned at right angles to each other; the currents in the dipoles have equal magnitude and are phase-shifted by  $90^\circ$ . The antenna is supported by a mast. The radiation pattern is omnidirectional with a null along the X-axis. To further enhance the shape of the horizontal pattern, additional elements are placed in a vertical array; with this type of antenna, the bandwidth can be expanded, gain improved, and polarization controlled; in addition to its ease of installation. See Figure 7 to learn about its radiation pattern.

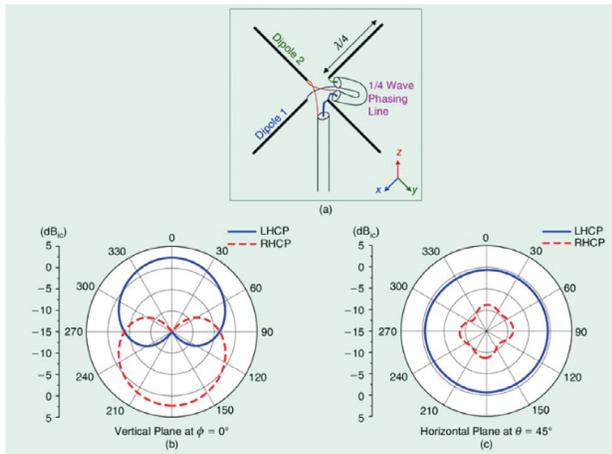


Figure 7. Radiation pattern of a Turnstile antenna  
Source: Ta *et al.* (2015).

In contrast to the Turnstile, the QHF antenna has circularity in its entire reception area; it is formed by two linear conductors forming a helix, this shape is made to achieve circular polarization. The quality of the antenna reception depended largely on the quality of the joints and the symmetry that this antenna maintained in its final arrangement. The diameter-to-height ratio of the antenna was 0.44; however, if it is built

taller and narrower, the directivity of the antenna can be improved, thus receiving better signals from satellites near the horizon. The radiation pattern can be appreciated in the following image (Figure 8).

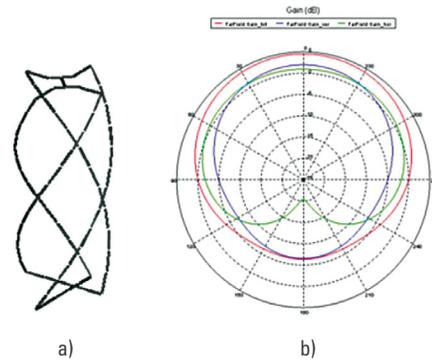


Figure 8. The geometry with wire segments a) and simulated radiation patterns b) of QHA  
Source: Blazevic and Skiljo (2011).

On the other hand, the double-cross antenna consists of two sets of two half-wavelength dipoles aligned at right angles to each other. The omnidirectional pattern, which can be seen in Figure 9, has characteristics of circularly symmetric radiation (almost isotropic: 0 dBi is maintained in almost all directions in the entire 3-D space) and with greater horizontal directivity. This behavior is attributed to the fact that the two dipoles of each cross perform an omnidirectional pattern in the horizontal plane; while the set of the two crosses leads to a radiation pattern expanded to the vertical plane, due to their separation by a quarter wavelength. Field tests with this antenna indicate that it produces very little radiation pattern nulling within the hemisphere.

The Moxon antenna consists of two squares crossed at right angles and electrically phased  $90^\circ$  to obtain circular polarization. This antenna differs from the Turnstile in the shape of its radiation lobe; generally it is presented that for elevation angles between  $90^\circ$  and  $70^\circ$  the Turnstile outperforms the Moxon, between  $70^\circ$  and  $40^\circ$  they perform similarly, and for elevation angles less than  $40^\circ$  the Moxon outperforms the Turnstile. The radiation pattern of the same can be seen in Figure 10.

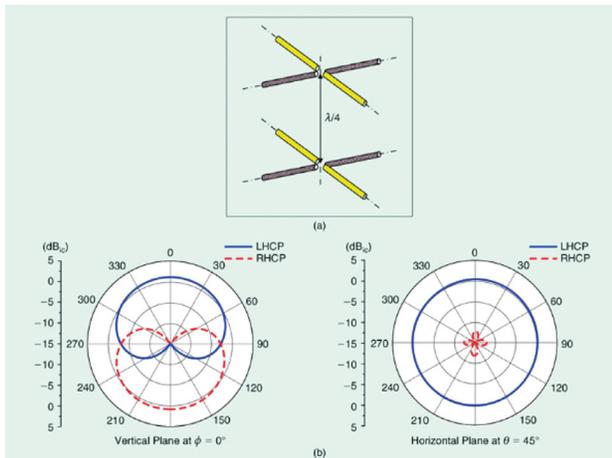


Figure 9. A double-Turnstile antenna in free space. (a) The 3-D view and (b) its radiation pattern at the resonant frequency  
 Source: Ta *et al.* (2015).

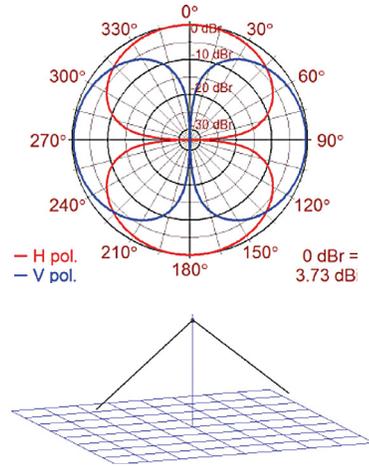


Figure 11. Hemisphere polarization graph of the inverted vee half-wave dipole antenna at a height of  $0.21 \lambda$ , and inverted vee half-wave dipole antenna, requiring only one support. Apex height is  $0.21 \lambda$ , end height is  $0.05 \lambda$   
 Source: Witvliet *et al.* (2015).

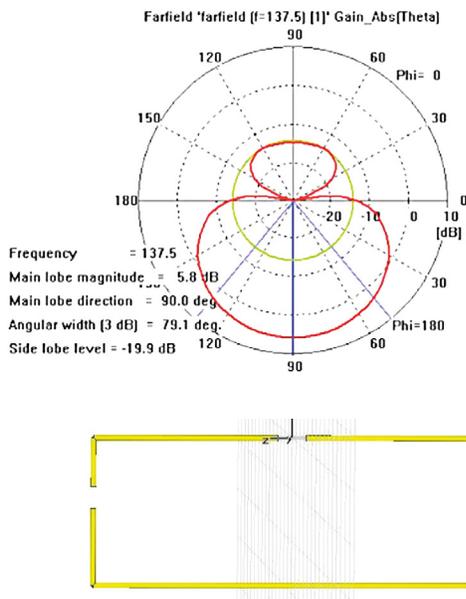


Figure 10. Image edited. Radiation pattern diagram for 137MHz and BW = 2.4GHz of a Moxon antenna, and Moxon antenna simulation in CST  
 Source: Cimino-Quiñones (2015).

The V-dipole antenna is formed by two linear conductors with a half-wavelength length and separated by  $120^\circ$ . It has a low gain of 2.15 dBi and an omnidirectional radiation pattern, which can be seen represented in Figure 11, its polarization is linear, so it presents losses due to polarization since the APT signal has RHCP polarization.

Finally, the Eggbeater antenna consists of two loops phased  $90^\circ$  and the reflector elements that form the ground plane; its radiation pattern is omnidirectional, and can be appreciate in Figure 12, and its performance is good for receiving LEO satellite signals, although it does not reach the gain of the QFH; below  $20^\circ$  elevation, better performance is achieved than with the QFH. From  $20^\circ$  elevation, a better signal is usually obtained with the QFH.

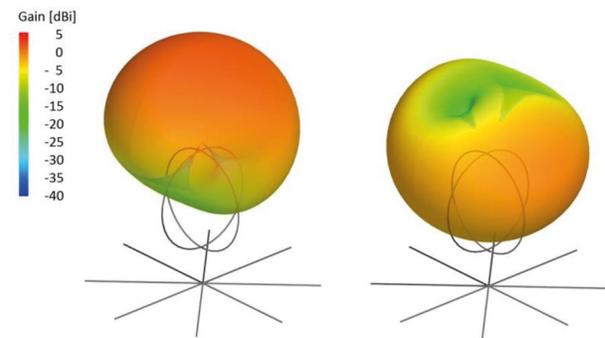


Figure 12. Calculated radiation patterns with Antenna Magus. Left: RHCP, right: LHCP  
 Source: Jain *et al.* (2018) and Hauer *et al.* (2018).

Taking the above into account, analyzing the performance results of the six antennas presented in Table 1, the values of the compared parameters enable

the identification of the Moxon antenna as the most effective antenna for NOAA signal reception, as indicated in Table 2.

In comparison, the Moxon antenna demonstrated the best performance, recovering images with resolutions of 1.94 megapixels. The QHF antenna exhibited the highest power reception at 1.9 W. The V-dipole, QHF, and Eggbeater antennas displayed the best coupling with the transmission line, achieving low reflection coefficients of 0.16. All antennas adhered to the transmission line length of  $\lambda/4$ .

All antennas, except the Moxon, evidenced circular polarization, which generally has an extra 3 dB loss due to polarization mismatch. Some disadvantages of the Turnstile antenna are: poor performance near the horizon, high image quality in a  $\pm 30^\circ$  approximately vertical field of view, and its radiation power is about 3 dB less compared to the maximum of a half-wave dipole radiating the same power.

When using reception antennas that are sensitive only to RHP fields, the reception of electromagnetic waves reflected on the ground and suggesting left-hand circular polarization (LHCP) is not taken into account,

particularly in the reception of all electromagnetic waves coming from the horizontal direction.

The receiving antennas studied were all mounted in the same fixed azimuthal position and with the same pointing (at the satellite) to be able to track the satellite during its pass. However, the appearance of the satellite in the azimuthal and elevation direction did not always coincide with what was budgeted. In one of the tests, it was observed that when the satellite was located at the highest and closest point, where the antennas should have a minimum of 12 dB towards the zenith, since theoretically the satellites are 12 dB stronger when they are high compared to their strength when they are on the horizon due to path loss, the Moxon antenna performed the best during the satellite pass, because it had lower gain at the most favorable moment (high and close satellite) and higher gain at the most unfavorable moment (low and distant satellite).

In addition, NOAA satellites orbit at an average altitude of 800 km, which provides between 12 and 15 minutes of signal reception on the ground; however, the range of best signal reception is approximately 8 minutes.

Table 2.  
Comparative table of technical characteristics of the antennas

Antenna type	Comparison parameter					
	Input impedance	Bandwidth	Radiation pattern	Recommended operating band	Level of difficulty in design and construction	Polarization of the electromagnetic wave
Turnstile Antenna (axial mode)	36 $\Omega$ . This value produces an SWR between 1.3:1 and 1.4:1 at the feed point.	Broadband	Omnidirectional, no nulls along the axial direction (boresight).	Used for VHF communications, FM and TV transmissions, military and satellite communications.	The axial mode is of medium complexity, consisting of a combination of two orthogonal dipoles fed with equal amplitudes and phase in quadrature.	Circular
QHF Antenna	At resonance from 50 to 75 $\Omega$	Narrow band	Omnidirectional	The QHF is an excellent antenna for meteorological satellites.	Complex	Circular
Antenna Double-Cross Antenna	73+42.5 $\Omega$	Narrow band	Omnidirectional	VHF communications	High (complex)	Circular
Antenna Moxon	75 $\Omega$ , no Balun required	Narrow band	With a directive gain of up to 9.7 dBi at 28 MHz, the antenna can be achieved	VHF communications	Low complexity	Circular
V-Dipole	51.6 $\Omega$	Broadband	Directive	Ham Radio	Low (simple)	Linear vertical or horizontal
Eggbeater	50 $\Omega$	Narrow band	Omnidirectional	Receives VHF and UHF signals, ham radio.	Medium complexity	Circular

Source: Own elaboration.

## Conclusions

In urban environments, the Moxon and QHF antennas excel in the reception of APT images sent from the NOAA-19 satellite. The Moxon antenna exhibits adequate performance in the resolution of the received signals, managing to recover images with a quality of 1.94 megapixels, while the QHF antenna tunes the highest power of 1.9 W.

For optimal reception of polar satellites, non-directional antennas with large capture area and circular polarization are required, such as the Turnstile, QHF and double-cross antennas. Although the Turnstile has good performance, it has limitations at the horizon and elevations outside  $\pm 30^\circ$ . Most are omnidirectional in azimuth, but some like the Turnstile perform better at low elevations. In general, the non-directional ones like QHF and double-cross are better choices for polar satellite reception without the need to adjust angles.

Although the antennas utilized in this study were not constructed to the highest standards, they offer a clear comparison under the same criteria of the performance of each antenna. It is acknowledged that each antenna has the potential for improvement to minimize noise, distortions, etc.

After conducting a thorough literature review, it is evident that our study presents a novel approach and scope not previously addressed. While some similar information exists in other articles, these works focus on different aspects or use different antenna configurations. For instance, one study developed a meteorological monitoring prototype using a different antenna and Raspberry Pi 3, while our study compares six types of antennas for receiving NOAA signals. Similarly, another study focused on a ground station prototype using different technology. Therefore, our study makes a significant contribution to the field by evaluating antennas under specific conditions. This highlights the originality and relevance of our work, offering new insights into antenna effectiveness in urban environments for receiving NOAA signals. Further research in this area is warranted.

## References

- Álvarez-Busani, C. (2012). *Diseño y construcción de una antena double cross para recepción de imágenes procedentes de satélites de órbita polar* (master dissertation, Universidad Politécnica de Cataluña). <https://tinyurl.com/mwdv2mye>
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design* (3rd ed.). Wiley.
- Blazevic, Z. & Skiljo, M. (2011). Helical Antennas in Satellite Radio Channel. *Advances in Satellite Communications* (M. Karimi & Y. Labrador, eds.). InTechOpen. <https://doi.org/10.5772/21833>
- Bosquez, C. (2016). System for Receiving NOAA Meteorological Satellite Images using Software Defined Radio [paper]. *2016 IEEE ANDESCON*. Arequipa, Perú, 19-21 October 2016. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2016.7836233>
- Cimino-Quiñones, L., Stable-Sánchez, Y. & Valdés-Abreu, J. C. (2015). Antena MOXON para estaciones terrenas de satélites meteorológicos de órbita polar. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 36(1), 79-94.
- Hauer, L.-C., Fexer, S., Smolko, A., Struss, M., Solmaz, P., Munzel, T. & Thienel, T.-H. (2018). *Mobile Ground Station for CubeSat Operations* [en línea]. <https://tinyurl.com/3vpvysnz>
- Jain, A., Chavan, P., Maradiya, P. & Rathod, K. (2018). Performance Investigation of Dipole and Moxon Antennae for VHF Communication. *Progress in Advanced Computing and Intelligent Engineering* (K. Saeed, N. Chaki, B. Pati, S. Bakshi & D. Prasad Mohapatra, eds.). Springer.
- Mahmood, S., Mushtaq, M. T. & Jaffer, G. (2016). Cost Efficient Design Approach for Receiving the NOAA Weather Satellites Data. *2016 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, Montana, USA, 05-12 March 2016. <https://doi.org/10.1109/AERO.2016.7500854>
- Martes, G. (2008). *Double Cross — A NOAA Satellite Downlink Antenna*. <https://www.qsl.net/py4zbx/DCA.pdf>
- Patil, C., Chavan, T. & Chaudhari, M. (2016). Hardware and Software Implementation of Weather Satellite Imaging Earth Station. *2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*. Jaipur, India, 21-24 September 2016. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2016.7732122>
- Peralta, D. J. M., Dos Santos, D. S., Tikami, A., Dos Santos, W. A. & Pereira E. W. R. (2018). Satellite Telemetry and Image Reception with Software Defined Radio Applied to

- Space Outreach Projects in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 90(3), 3175-3184. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170955>
- Ramos-Rosero, A. G. & Noboa-Cabrera, L. N. (2017). *Diseño e implementación de un prototipo para recepción de señales satelitales para obtención de imágenes meteorológicas del sistema de satélites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) usando radio definido por software* (tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana). Repositorio institucional. <https://tinyurl.com/ykjdh8a5>
- Rojas Molina, R.D. (2019). *Diseñar un prototipo para recepción de imágenes APT (Automatic Picture Transmission) del sistema satelital NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) usando RTL-SDR* (tesis de maestría, Universidad Israel). Repositorio institucional UIsrael. <https://tinyurl.com/jmjh8j7v>
- Suarez-Fajardo, C.A., Ariza-Pulido, J. J., Mejía-Serrano, S. E. & Puerto-Leguizamón, G. A. (2017). Antena de placa suspendida con polarización circular y sentido de giro configurable. *INGE CUC*, 16(1), 156-170. <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.1.2020.011>
- Ta, S. X., Park, I. & Ziolkowski, R. W. (2015). Crossed Dipole Antennas: A Review. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 57(5), 107-122. <https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2470680>
- Tsai, L. C., Tien, M. H., Chen, G.H. & Zhang, Y. (2014). HF radio angle-of-arrival measurements and ionosonde positioning. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 25(3), 401-413. [https://doi.org/10.3319/TAO.2013.12.19.01\(AA\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2013.12.19.01(AA))
- Velasco, C. & Tipantuña, C. (2017). Meteorological Picture Reception System using Software Defined Radio (SDR). *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. Salinas, Ecuador, 16-20 October 2017. <https://doi.org/10.1109/ETCM.2017.8247551>
- Witvliet, B. A., van Maanen, E., Bentum, M. J., Slump, C. H. & Schiphorst, R. (2015). A novel Method for the Evaluation of Polarization and Hemisphere Coverage of HF Radio Noise Measurement Antennas. *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*. Dresden, Germany, 6-22 August 2015. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256174>

# Dynamics of production of greenhouse gases in the sectors of steel production and vehicle production

| Fecha de recibido: 31 de enero 2024 | Fecha de aprobado: 8 de abril 2024 |

| Reception date: January 31, 2024 | Approval date: April 8, 2024 |

| Data de recebimento: 31 de janeiro de 2024 | Data de aprovação: 8 de abril de 2024 |

## Roberto Alfonso Montenegro Robles

<https://orcid.org/0000-0002-2860-0564>

[roberto.montenegro@profesores.uamerica.edu.co](mailto:roberto.montenegro@profesores.uamerica.edu.co)

Magíster en Economía

Profesor Asociado – Universidad de América, Colombia

Rol del investigador: teórico, experimental y escritura

Grupo de Investigación Desarrollo y Equidad

Master's Degree in Economics

Associate Professor – University of America, Colombia

Researcher's role: theoretical, experimental and writing.

Development and Equity Research Group

Mestrado em Economia

Professor Associado – Universidade da América, Colômbia

Função do investigador: Teórica, experimental e escrita

Grupo de Investigação sobre Desenvolvimento e Capital Próprio

## Mayda Alejandra Calderón Díaz

<https://orcid.org/0000-0001-6591-7184>

[mayda.calderon@profesores.uamerica.edu.co](mailto:mayda.calderon@profesores.uamerica.edu.co)

Ph.D en Ciencias Económicas

Profesora Asociada – Universidad de América, Colombia

Rol del investigador: teórico, experimental y escritura

Grupo de Investigación Desarrollo y Equidad

Ph.D in Economics

Associate Professor – University of America, Colombia

Researcher's role: theoretical, experimental, and writing.

Development and Equity Research Group

Doutoramento em Economia

Professor Associado – Universidade da América, Colômbia

Papel do investigador: teórico, experimental e escrito

Grupo de Investigação sobre Desenvolvimento e Capital Próprio

**Cómo citar este artículo:** Montenegro Robles, R. A. & Calderón Díaz, M. A. (2024). Dynamics of production of greenhouse gases in the sectors of steel production and vehicle production. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 69-80. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.813>



## Dynamics of production of greenhouse gases in the sectors of steel production and vehicle production

**Abstract:** The foundry sector and the automotive sector are a source of greenhouse gas emissions. Understanding the relationships and dynamics between the two sectors allows designing better strategies that seek to reduce greenhouse gas emission levels and thus achieve mitigation of climate change. Given that the dynamics of a sector are influenced by its own dynamics and the dynamics of the other, also subject to growth limits, the objective of this document is to design a system that represents the interaction between the steel foundry sector and the automotive sector, which allows to identify the dynamics in terms of generation of greenhouse gases.

The results show interdependence between the sectors, which is determined by the dynamics of economic growth and has an impact on higher CO<sub>2</sub> levels. In addition, the dynamic hypothesis proposed is true, which allows us to establish that economic growth can be associated with higher levels of CO<sub>2</sub> emission. Modeling with complex dynamics is essential to understand the dynamics and interrelationships between sectors and their impact on the levels of greenhouse gases, which allows a better design of the measures that seek to reduce the levels of greenhouse gas emissions and mitigate climate change.

**Keywords:** Dynamic systems; greenhouse gases; modeling; steel production; vehicle production.

## Dinámicas de producción de gases de efecto invernadero en los sectores de acero y de vehículos

**Resumen:** El sector de fundición y el sector automotriz son fuente de emisiones de gases de efecto invernadero, entender las relaciones y dinámicas entre ambos sectores permite diseñar mejores estrategias que busquen reducir los niveles de emisión de gases de efecto invernadero y así lograr la mitigación del cambio climático. Dado que la dinámica de un sector está influenciada por la dinámica propia y la del otro, sujeto también a límites de crecimiento, el objetivo de este documento es diseñar un sistema que represente la interacción entre el sector de la fundición de acero y el sector de la automoción lo que permite identificar la dinámica en términos de generación de gases de efecto invernadero.

Los resultados muestran una interdependencia entre los sectores, que está determinada por la dinámica del crecimiento económico y tiene un impacto en niveles más altos de CO<sub>2</sub>. La modelación con dinámicas complejas es fundamental para comprender la dinámica e interrelaciones entre sectores y su impacto en los niveles de gases de efecto invernadero, lo que permite un mejor diseño de las medidas que buscan reducir los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático.

**Palabras clave:** sistemas dinámicos; gases de invernadero; modelado; producción de acero; producción de vehículos.

## Dinâmica de produção de gases de efeito estufa nos setores de produção de aço e de produção de veículos

**Resumo:** O sector da fundição e o sector automóvel são uma fonte de emissões de gases do efeito estufa, compreender as relações e dinâmicas entre os dois sectores permite desenhar melhores estratégias que procurem reduzir os níveis de emissões de gases do efeito estufa e assim alcançar a mitigação das alterações climáticas. Dado que a dinâmica de um sector é influenciada pela sua própria dinâmica e pela dinâmica do outro, também sujeita a limites de crescimento, o objectivo deste documento é desenhar um sistema que represente a interacção entre o sector da fundição de aço e o sector automóvel, o que permite identificar a dinâmica em termos de geração de gases do efeito estufa.

Os resultados mostram a interdependência entre os setores, que é determinada pela dinâmica do crescimento económico e tem impacto em níveis mais elevados de CO<sub>2</sub>. A modelação com dinâmicas complexas é essencial para compreender a dinâmica e as inter-relações entre os setores e o seu impacto nos níveis de gases do efeito estufa, o que permite um melhor desenho das medidas que procuram reduzir os níveis de emissões de gases do efeito estufa e mitigar as alterações climáticas.

**Palavras-chave:** Sistemas dinámicos; gases efeito estufa; modelagem; produção de aço; produção de veículos.

## Introduction

The foundry sector and the automotive sector have been identified as an important source of greenhouse gas (GHG) emissions, especially carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022). For the foundry sector, the work of Vogl *et al.* (2018) establishes that steel production represents approximately 7% of global carbon dioxide emissions. For Hasanbeigi *et al.* (2014), the iron and steel industry accounts for around a quarter of global industrial sector GHG emissions, and around 8% of global final energy demand and 7% of CO<sub>2</sub> emissions from the energy sector, including process emissions (Shatokha, 2015). For its part, for the vehicle sector, works by Wallington *et al.* (2008) and Şanlı *et al.* (2021) identify volumes of CO<sub>2</sub> emitted by vehicles and its effect on climate change.

To analyze emission dynamics, different models have been developed using a wide range of level of detail in order to represent or predict the level of emissions (Ramin & Huhtanen, 2012; Giltrap *et al.*, 2010; Powlson *et al.*, 1996; Del Prado *et al.*, 2011; Chianese *et al.*, 2009 and Del Prado *et al.*, 2011). However, the existing models are generally simple models that range from considering both emission factors in isolation to empirical relationships. However, to fully represent the dynamics of a system and its influence, models must integrate the combined effects and their interrelationships. In this sense, the objective of this document is to design a complex dynamics model that allows identifying the interrelationships, and main components, in this case, between the foundry sector and the automotive sector and their influence on CO<sub>2</sub> emission levels. The purpose of this document is to build a model that allows simulating said dynamics through system dynamics.

As a dynamic hypothesis, it is established that if income increases, the demand for vehicles increases, leading to an increase in the demand for steel as an input, as well as an increase in the production of vehicles that, when used, increase the emission and therefore accumulation of GHG (greenhouse effect).

It is proposed that the production dynamics of the steel foundry sector is influenced by its own dynamics and by the dynamics of the automotive sector, given that vehicle production is fed by the steel industry. But the steel sector is subject to growth limits based on the natural limit of raw material availability and that the recycled steel used in production is losing quality. This creates a dynamic between both populations, especially in the accumulation of GHG, whose behavior we seek to describe through system dynamics.

According to the United Nations Organization in relation to climate change, there is an upward trend related to the emission of GHG, which in the period 2000-2022 has reached a peak of 37,490,000,074 tons reached in 2022. However, there was a decrease for the period 2019-2020, due to confinements during the pandemic period, and in the period 2009-2010, which responds to the global financial crisis that began with the bursting of the real estate bubble in the United States (Figure 1).

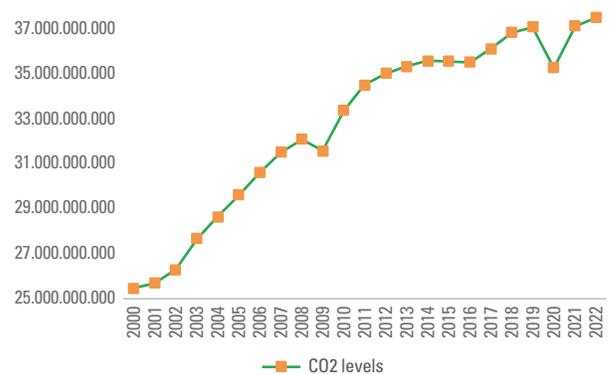


Figure 1. Accumulated CO<sub>2</sub> levels (in tons) in the period 2000 to 2022

Source: Own elaboration based on <https://ourworldindata.org>.

Figure 2 shows the world production of vehicles on the right axis and the world production of steel on the left axis in the period 2009 to 2020. Based on Rietmann *et al.* (2020) in relation to the world production of vehicles, a growing trend can be seen, as well as a contraction since the beginning of 2018 due to economic conditions and a contraction in the pandemic period.

For its part, according to Ravazzolo & Vespignani (2020), steel production in the automotive sector has high demand due to the mechanical and physical

properties of steel, which is used in the production of parts such as engines (crankshafts, shafts, cams, pistons), brake system (discs), and bodies (chassis and parts to support the doors), among others.

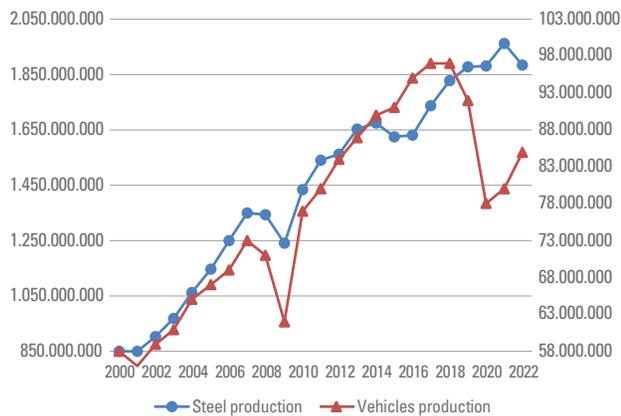


Figure 2. Tons of steel produced (left) and number of vehicles produced (right) in the period 2000 to 2022

Source: Own elaboration based on worldsteel.org and <https://www.statista.com>.

Globally, production in the period 2009-2020 presents an increasing trend, despite the drop in the period 2015-2016 explained by the global drop in production due to economic conditions in China and Brazil; however, production recovered its upward trend.

This document is divided into three parts, the first presents the introduction, where a characterization of the foundry sector, vehicle production, and CO<sub>2</sub> emission levels is made. In the second part, a description of the complex dynamics model to be implemented is made, where the variables, equations and parameters are described and represented by the Forrester Diagram. In the third part, the results and discussion of these are presented in the context of the literature, where the hypothesis is confirmed, and finally the conclusions are presented.

## Methodology

The complex dynamics model developed in this section is based on the work of Ding *et al.* (2016), Aracil and Gordillo (1997), Ibarra-Vega (2016), and Bayer

(2004). The complex dynamics model is a representation of the dynamic behavior of a system, where it seeks to transfer the characteristics of the real system to an artificial representation. This allows us to conceive the production structures of steel production and vehicle production as a set of elements that interact with each other, assuming that there is a mutual influence between their elements. To completely describe the system, it is necessary to know its elements (structure) and interactions, its states and its transitions (dynamics), through flow diagrams.

As a first step, the elements that condition the behavior of both sectors will be identified and organized together with their relationships. This is necessary because the dynamics of each sector will be represented not in isolation, on the contrary, showing the interaction, but mainly identifying the feedback of the sectors, which form feedback loops that can be key when establishing solutions to mitigate the emission of GHG. Subsequently, a flow diagram will be drawn (Figure 3) identifying levels, flows and auxiliary variables to be able to carry out the simulation. As a first step, the elements that condition the behavior of both sectors will be identified.

Figure 3 presents the Forrester Diagram on the dynamics and interdependence between the sectors of steel production, vehicle production and CO<sub>2</sub> accumulation, where an interdependence between the sectors is presented given that the inputs of one are the base of the production of the other. But there are natural limits depending on the available production, which creates a dynamic between both populations that ultimately end up increasing CO<sub>2</sub> levels.

Natural capacity refers to the natural limit that exists based on the stock of iron available in nature to obtain steel, that is, a natural limit given that the iron from which steel is obtained is a finite resource, according to the United States Geological Survey. Gross iron ore reserves are estimated at 180 billion metric tons by 2022. This figure will be the initial value in the model for the Natural Capacity variable.

According to Kirschen *et al.* (2011) and Da Silva *et al.* (2008), iron is taken from the mine (which contains pure iron ore or ore, as well as impurities or gangue)

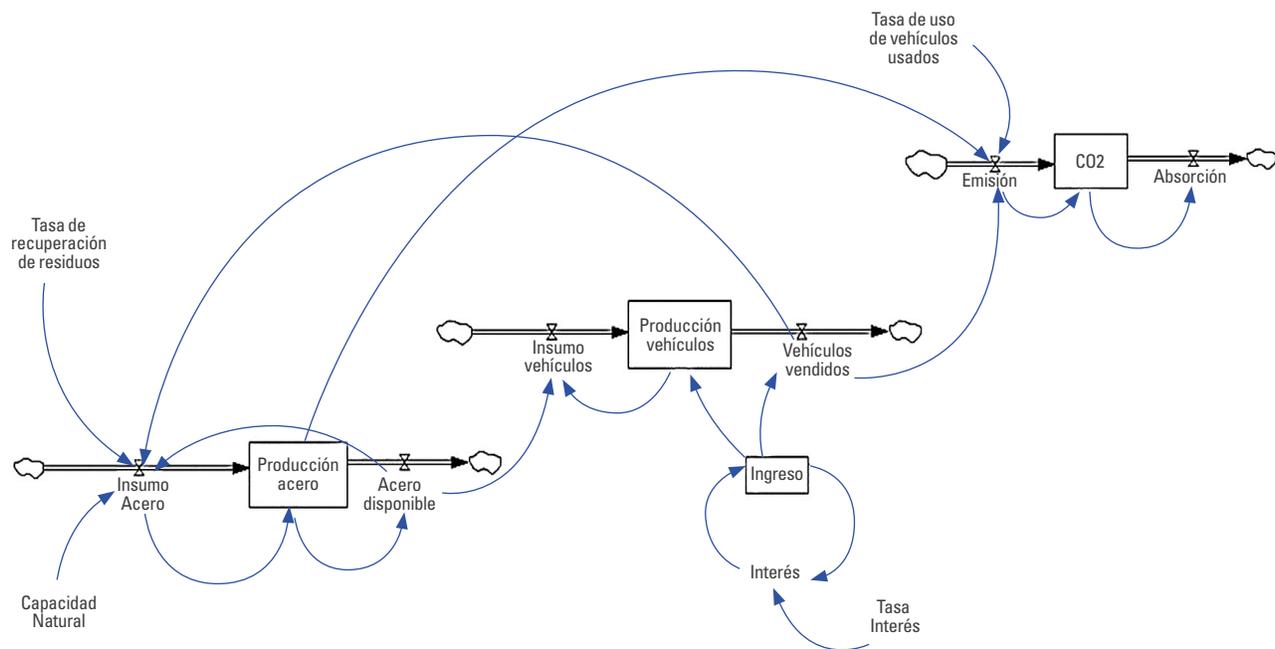


Figure 3. Forester diagram of the dynamics and interdependence between the sectors of steel production, vehicle production and CO<sub>2</sub> accumulation. Source: Own elaboration.

to make steel, and together with the fuel called ‘cok’ are processed in a blast furnace, with the aim of eliminating impurities. Since steel scrap can also be added in this process, in order to reuse it, in this combustion process the carbon joins the steel and the ‘cok’, and liquid steel is formed, which goes to the molding process. According to Araújo and Schalch (2014), 98% of steel scrap is recycled, therefore, the waste recovery rate will initially be 98%.

The dynamics of steel production is taken as a stock variable formed by two flows that are: i) the availability of inputs, and ii) the flow of steel available for sale to productive sectors such as construction. The relationship between these two systems is given because the production of vehicles depends on the availability of steel for steel parts for vehicles. But the development of vehicles will depend on the dynamics of production worldwide; so, the greater the growth, the more employment and greater resources to acquire goods and services.

This dynamic will be influenced not only by the natural dynamics of production and sales, but also due

to the dynamics of the economy in general. The greater the growth and the expectation of future growth, the greater the demand for vehicles, therefore, the greater the demand for the steel necessary for their production.

Likewise, the dynamics of CO<sub>2</sub> production is taken as a stock variable formed by two flows that are the emission of CO<sub>2</sub> and the absorption flow of CO<sub>2</sub>. Based on Van Marle *et al.* (2022), it is estimated that approximately 65% of gas emissions are carbon dioxide and that this comes from industrial sectors such as cement, steel and transportation production. Absorption is understood as a process where molecules of one substance are trapped or retained on the surface of another. According to Terrer *et al.* (2021), this process is carried out by terrestrial ecosystems by 30%, especially forests, plants through photosynthesis and the oceans through plankton.

Table 1, Table 2 and Table 3 present the model equations, as well as the auxiliary variables and the values of the parameters with which the model simulation was carried out.

Table 1.  
Model equations

Variable	Initials	Unit	Equation
Steel production	PnAc	Ton	$PnAc = IA - AD$
Vehicule production	PnVh	Ton	$PnVh = IV - VV$
CO <sub>2</sub> production	PnCO <sub>2</sub>	Ton	Production of CO <sub>2</sub> = Emission - Absorption
Steel input	IA	Ton	$IA = CapNat + AD * TasRecRes + VV * TasRecRes + AD * TasAceOtro$
Steel available	AD	Ton	$AD = PnAc$
Vehicle inputs	IV	Ton	$IV = AD * 0.3$
Vehicles sold	VV	Ton	$VV = PnVh$
CO <sub>2</sub> emission	ECO <sub>2</sub>	Ton	$ECO_2 = VV * 0.3$
CO <sub>2</sub> stock	SCO <sub>2</sub>	Ton	$SCO_2 = ECO_2 - ACO_2$
CO <sub>2</sub> absorption	ACO <sub>2</sub>	Ton	$ACO_2 = TasAbsCO_2 * NCO_2$

Source: Own elaboration.

Table 2.  
Auxiliary variables

Variable	Initials	Unit	Source
Waste recovery rate	TasRecTes	Ton/Month	Average actual data
Used vehicle usage rate	TasUsoRes	Ton/Month	Time
Rate of vehicles sold	TasVehVen	Ton/Month	Average actual data
Available steel rate other sectors	TasAceOtros	Ton/Month	Average actual data
CO <sub>2</sub> absorption rate	TasAbsCO <sub>2</sub>	Ton/Month	Time
Income	Ingre	Ton/Month	Increasing function

Source: Own elaboration.

Table 3.  
Model parameters

Variable	Initials	Unit	Value
Natural iron supply capacity for steel	CapNat	Ton	1,639,333,333
CO <sub>2</sub> level	NCO <sub>2</sub>	Ton	37,490,000,074

Source: Own elaboration.

## Results

A period of 100 years has been simulated between  $t = 0$  and  $t = 100$  using the fourth order Runge-Kutta as a numerical approximation method and with a weight of  $h = 0.015625$ . To better approximate the model, we start from levels and growth rates obtained from historical data.

The first strategy consisted of varying the rate of economic growth. To develop this strategy, the variable growth rate was implemented in the model since it is assumed that economic growth is associated with the living standards of modern society, where technology and the consumption of certain goods such as health, education, housing, etc., are synonymous with well-being. This condition is incorporated into the model assuming that an increase in income implies generation of employment. Higher income leads to an increase in the demand for goods among these vehicles, which leads to an increase in the demand in the steel production sector for material for the production of parts, and to higher emission levels. Likewise, an increase in demand for vehicles implies greater pollution due to the emission generated by the combustion of vehicles.

Movements in the economic growth rate were made from values close to 0, then values close to 0.5 and subsequently values close to 1. The CO<sub>2</sub> emission curve was expected to have a positive slope as the rate of economic growth increases. This is because an improvement in economic conditions leads individuals to consume goods such as personal vehicles, which impacts CO<sub>2</sub> emissions. On the one hand, the demand for steel inputs and materials to produce vehicles increases, and in the steel production process CO<sub>2</sub> emissions are generated in the blast furnaces; and on the other hand, when the vehicles are used CO<sub>2</sub> emissions are generated in engine combustion.

The results allow us to verify the hypothesis and are presented in Figure 4. It is found that the CO<sub>2</sub> levels start from an initial level given by exogenous factors. However, as the economic growth rate increases, its trend is increasing, depending on the emission generated in the production of parts for vehicles; likewise, the combustion generated by vehicles increases, which means that the rate of economic growth plays a role in CO<sub>2</sub> emission levels.

The second strategy consisted of implementing the usage rate of used vehicles. For the development of this strategy, the variable ‘usage rate of used vehicles’ was implemented in the model, which indicates an emission level given the increase in the extension of the useful life of vehicles. Especially in low-income regions, these vehicles do not incorporate technological advances that achieve lower combustion and therefore lower emissions.

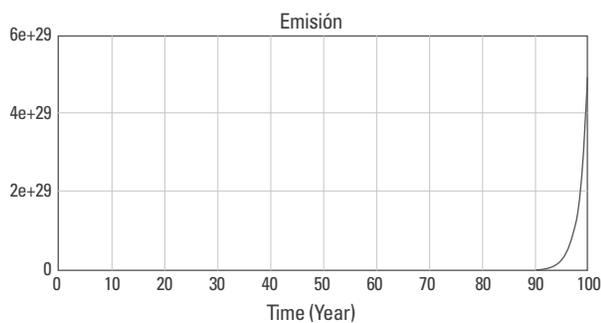


Figure 4. Results of the analysis of movements in the economic growth rate and its impact on the system in general  
Source: Own elaboration.

Movements were made in the usage rate of used vehicles from values close to 0, then values close to 0.5 and subsequently values close to 1. It was expected that the CO<sub>2</sub> emission curve would have a positive slope as the usage rate increases the use of used vehicles. This is because the engines of old vehicles do not incorporate technologies that achieve greater power and performance from lower consumption of fossil energy, and their emission volumes are higher compared to electric, hybrid, or hydrogen engines.

The results allow us to verify the hypothesis, and indicate that the CO<sub>2</sub> levels start from an initial level given by exogenous factors. This level can be observed close to 150 million tons in the model (in Figure 5, the level of the red line). However, as the usage rate of used vehicles increases the level rises to 150 million tons (in Figure 5, the level of the blue line). This can be explained by the increase in combustion generated by vehicles with less efficient engines, which means that the usage rate of used vehicles plays a role in CO<sub>2</sub> emission levels after modeling. Subsequently, it can be observed that in Figure 5 both the red and blue lines present a decreasing trend, which can be explained by the obsolescence of the vehicles that would be no longer used, for which they would no longer generate CO<sub>2</sub> emissions.

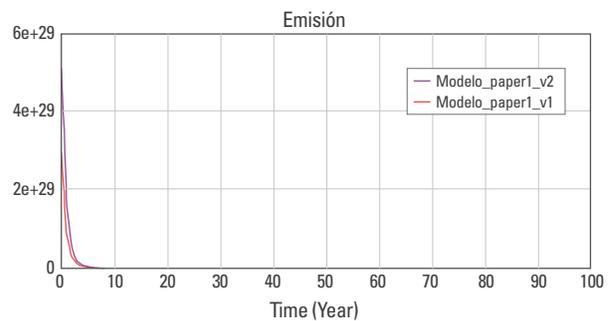


Figure 5. Movement analysis results on the usage rate of used vehicles and its impact on the overall system  
Source: Own elaboration.

The third strategy consisted of the implementation of the steel recovery rate. To develop this strategy, we implemented in the model the steel recovery rate variable, which indicates the recycling level of recycled steel that comes from waste generated in other industries.

Movements of the steel recovery rate were made from values close to 0, then values close to 0.5 and subsequently values close to 1. It was expected that the CO<sub>2</sub> emission curve would have a negative slope as the recovery rate of steel increases; this, because it reduces the need to process ore and generate gas emissions as a result of the combustion generated in the blast furnaces.

The underlying logic is that CO<sub>2</sub> levels start from an initial level given by exogenous factors. However, as the steel recovery rate increases, its trend is decreasing, depending on the decrease in pressure due to the need to process more iron material to produce steel, which means that the steel recovery rate plays a role in the CO<sub>2</sub> emission levels. After doing the modeling, we can determine that as the steel recovery rate values increase, the GHG emission levels are reduced (Figure 6).

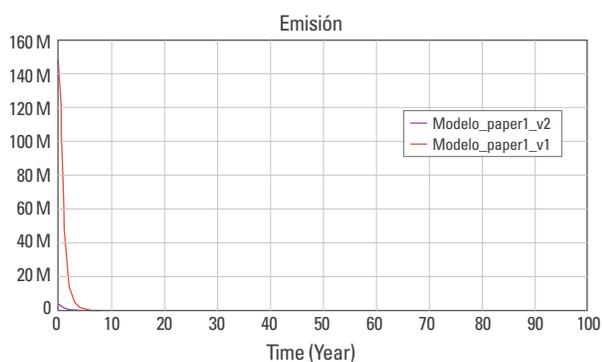


Figure 6. Results of the movement analysis on the steel recovery rate and its impact on the overall system

Source: Own elaboration.

## Discussion

After carrying out the modeling, in relation to the economic growth rate, based on the results the hypothesis can be corroborated. The analysis starts from identifying the natural or initial behavior of the system, the levels of the variable 'economic growth rate' were initially analyzed, taking values close to 0, and it was observed that the CO<sub>2</sub> emission values remained at levels close to 160 million tons (in Figure 6, red line).

Subsequently, the levels of the economic growth rate were increased by 50%, the CO<sub>2</sub> emission rates also increased, and subsequently the economic growth rates were located at values close to 1, where it is observed that the CO<sub>2</sub> emission values decreased to around 5 million tons of CO<sub>2</sub> (in Figure 6, blue line).

In general, after analyzing the three scenarios, we can determine that the dynamic hypothesis is confirmed. The strategy for the implementation of complex dynamics allows us to identify relationships and fundamental variables that help the design of strategies to guide the reduction of GHG. In this case, the economic growth variable determines the dynamics of vehicle consumption, and in this way both sectors are energized, because with more income, the demand for vehicles increases, and so the demand for steel increases with the consequence of an increase in emission levels from both steel smelting and vehicle use.

Based on the analysis of Abramovitz (1989), Ding (2012), Jackson and Marks (1999, and Yeh and Hartmann (2021), the behavior exhibited can be associated with the fact that the variable rate of economic growth is associated with the living standards of modern society, where technology and the consumption of certain goods is synonymous with well-being. Therefore, this condition is incorporated into the model assuming that an increase in income implies greater demand on the part of individuals, which leads to an increase in the demand for workers. This way, we would have more jobs with a reasonable salary that can lead to an increase in the demand for goods, including vehicles, which implies an increase in demand from the steel production sector for materials for the production of parts, and, therefore, higher emission levels. Likewise, an increase in demand for vehicles implies greater pollution due to the emission generated by the combustion.

Additionally, the used vehicle usage rate strategy indicates an emission level given the increase in the extension of the useful life of vehicles, which is in line with what was established by Köne & Büke (2010). Especially in low-income regions, these vehicles do not incorporate technological advances that achieve better combustion that reduces emission levels. This is

because the engines of old vehicles do not incorporate technologies that achieve greater power and performance from lower consumption of fossil energy, and the emission volumes are higher compared to electric, hybrid, or hydrogen engines. Therefore, not taking action with the stock of used vehicles implies maintaining high CO<sub>2</sub> emission levels that do not allow us to mitigate global warming.

Therefore, taking into account that strategies 1 and 2 are based on the use of personal vehicles, with the objective of seeking to reduce CO<sub>2</sub> emissions, the variables play a fundamental role, since the personal vehicle consumption dynamics associated with higher levels of income generated by economic growth must be reduced by having a greater offer of more sustainable mobility.

In this context, and following Canals-Casals *et al.* (2016) and Rietmann *et al.* (2020), alternative actions to the use of individual vehicles are necessary. Strategies such as promoting sustainable public mobility, or the increase of the useful life of used environmentally friendly vehicles, reduce the demand for personal vehicles and therefore the demand for steel products. In this way, it is necessary to design parts that require recycled components, as well as the design of more efficient vehicles that contain other types of materials with a greater component of recycled plastic, which reduces weight and the need for strength and combustion.

For its part, the analysis of the third scenario increases the recovery rates of steel waste. Following Terrer *et al.* (2021), the variable steel recovery rate indicates the recycling rate of surplus or recovered steel, which comes from steel waste generated in other industries. Based on Xu and Cang (2010), Holappa (2020) and Da Silva *et al.* (2008), by increasing the waste recovery rate the need to process ore and generate gas emissions as a result of the combustion generated in the blast furnaces is reduced. However, as indicated by Araújo & Schalch (2014), steel recovery levels are around 98%, so this variable would already be at its optimal maximum. Therefore, other alternatives must be sought to reduce demand of raw materials to avoid the melting of blast furnaces.

In general, the relationship associated with the fact that the steel production sector is linked to the automotive production sector is confirmed through the offer of material manufactured in the form of parts to be molded, according to the requirements in the automotive sector. However, there are other links that go from the supply of waste from the automotive sector to the steel production sector to be recycled in the foundry sector. This is essential because by increasing the disposal of material the need for extraction of iron would be reduced, both with its smelting process, which reduces the emission of GHG.

Another feedback process is generated by automotive demand towards the steel production sector. Since there is a demand for environmentally friendly vehicles, including vehicles with materials that use recycled plastic, the demand for steel products is reduced, which reduces production and therefore the emission of GHG resulting from the foundry.

## Conclusions

The socio-economic system described to analyze the CO<sub>2</sub> emissions from the dynamics of the steel and vehicle production sectors, described from the complex dynamics, allows the analysis of causal relationships and shows how in their natural or initial state they are generated, considering CO<sub>2</sub> emissions due to factors exogenous to the model.

Based mainly on the growth of the economy, CO<sub>2</sub> emission levels increase significantly, which is why it is established that the dynamic hypothesis proposed is true, which allows us to establish that economic growth can be associated with higher levels of CO<sub>2</sub> emission.

In this context, alternative actions to the use of individual vehicles are necessary, in which promoting sustainable public mobility, or the increase in the useful life of used environmentally friendly vehicles, reduces the demand for personal vehicles and therefore the demand for steel products. In this way, it is necessary to design parts that require recycled components,

as well as the design of more efficient vehicles that contain other types of materials with a greater component of recycled plastic, which reduces weight and the need for strength and combustion.

Likewise, from the analysis of the impact on the system of the usage rates of used vehicles, it is evident that they have a positive impact on the increase in CO<sub>2</sub> emissions. This is why it is established that the dynamic hypothesis proposed is true, which allows us to establish that the usage rates of used vehicles can be associated with CO<sub>2</sub> emission levels.

When analyzing the strategy aimed at reducing CO<sub>2</sub> emissions such as the recycling of steel materials, from the analysis of the recovery rates of steel waste, it is evident that they have a positive impact on the reduction of CO<sub>2</sub> emissions. The latter occurs due to lower pressure on the production of new steel, which reduces the processes in the blast furnaces. Therefore, it is established that the dynamic hypothesis proposed is true, which allows us to establish that the recovery rate of steel waste can be associated with CO<sub>2</sub> emission levels.

Finally, it was evident that the production dynamics of the steel foundry sector are influenced by its own dynamics and by the dynamics of the automotive sector, given that vehicle production is fed by the steel industry. But the steel sector is subject to growth limits based on the natural limit of raw material availability and that the recycled steel used in production is losing quality. This creates a dynamic between both populations, especially in the accumulation of GHG, whose behavior can be described through system dynamics.

This study has relevance in terms of sustainability, expressed in identifying variables that allow policy actions to be taken in search of mitigating global warming. Also, since it identifies the variables that generate dynamics between the two sectors such as economic growth and its impact on increasing emission levels. This study increases existing knowledge, strengthens methods and supports existing studies. Its use is general and can be applied at a particular level. Likewise, it has great methodological utility by innovating in methods that allow the dynamics of a system to be thoroughly represented; their interrelationships

and influence in different contexts, and allow their modeling to evaluate various possible scenarios.

According to the conclusions, the variable 'economic growth' energizes the steel and vehicle production sectors. It is necessary to analyze the impact of policies such as changes in mobility towards mass transportation systems, and the design of efficient and compact cities.

The socio-economic system described to analyze CO<sub>2</sub> emissions from the dynamics of the steel and vehicle production sectors underscores the intricate web of causal relationships that govern environmental impact. Initially, both sectors exhibit substantial CO<sub>2</sub> emissions driven by factors external to the model, primarily linked to economic growth. This reinforces the validity of the dynamic hypothesis, affirming the correlation between economic expansion and heightened CO<sub>2</sub> emissions.

In addressing this challenge, alternative strategies are imperative to mitigate individual vehicle usage. Promoting sustainable public transportation and extending the lifespan of environmentally friendly vehicles can curtail the demand for personal automobiles and subsequently reduce the need for steel products. To further alleviate the environmental strain, the design of vehicle components should prioritize recyclable materials, such as recycled plastics, thereby minimizing weight and reliance on combustion.

Moreover, the analysis highlights the positive correlation between the utilization rates of pre-owned vehicles and CO<sub>2</sub> emissions, affirming the dynamic hypothesis. Policies targeting CO<sub>2</sub> reduction, such as steel recycling initiatives, demonstrate tangible benefits. Higher rates of steel waste recovery alleviate pressure on new steel production, thereby diminishing CO<sub>2</sub> emissions associated with manufacturing processes. This bolsters the notion that the recovery rate of steel waste directly influences CO<sub>2</sub> emission levels.

Furthermore, the study elucidates the intertwined dynamics between the steel and automotive sectors. While vehicle production drives demand for steel, the steel industry faces constraints due to finite raw material availability and diminishing quality of recycled steel. This symbiotic relationship underscores

the necessity for comprehensive system dynamics modeling to accurately capture their interplay and subsequent GHG emissions.

This research holds significance for sustainability efforts by pinpointing actionable variables for policy interventions aimed at mitigating global warming. By elucidating the impact of economic growth on emission levels and proposing strategies like mass transportation and compact city design, this study contributes to the body of knowledge on environmental management.

In conclusion, this study underscores the imperative of holistic approaches to address CO<sub>2</sub> emissions from industrial sectors. By identifying key variables and proposing viable interventions, it enriches existing methodologies and informs policy decisions geared towards sustainable development.

## References

- Abramovitz, M. (1989). *Thinking About Growth and Other Essays on Economic Growth and Welfare*. Cambridge University Press.
- Aracil, J. y Gordillo, F. (1997). *Dinámica de sistemas*. Alianza Editorial.
- Araújo, J. A. & Schalch, V. (2014). Recycling of electric arc furnace (EAF) dust for use in steel making process. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(3), 274-279. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.003>
- Bayer, S. (2004). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. *Interfaces*, 34(4), 324-327.
- Bernstein, B. B. (2003). *Class, Codes and Control*. Psychology Press.
- Canals-Casals, L., Martínez-Laserna, E., García, B. A. & Nieto, N. (2016). Sustainability Analysis of the Electric Vehicle Use in Europe for CO<sub>2</sub> Emissions Reduction. *Journal of Cleaner Production*, 127, 425-437. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.120>
- Chianese, D. S., Rotz, C. A. & Richard, T. L. (2009). Simulation of nitrous oxide emissions from dairy farms to assess greenhouse gas reduction strategies. *Transactions of the ASABE*, 52(4), 1325-1335. <https://tinyurl.com/42957p7t>
- Da Silva, M. C., Bernardes, A. M., Bergmann, C. P., Tenório, J. A. S. & Espinosa, D. C. R. (2008). Characterization of Electric Arc Furnace Dust Generated During Plain Carbon Steel Production. *Ironmaking & Steelmaking*, 35(4), 315-320. <https://doi.org/10.1179/030192307X232936>
- Del Prado, A., Misselbrook, T., Chadwick, D., Hopkins, A., Dewhurst, R. J., Davison, P., Butler, A., Schröder, J. & Scholefield, D. (2011). SIMSDAIRY: A Modelling Framework to Identify Sustainable Dairy Farms in the UK. Framework Description and Test for Organic Systems and N Fertilizer Optimization. *Science of the Total Environment*, 409(19), 3993-4009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.050>
- Ding, H. (2012). *Economic Growth and Welfare State: A Debate of Econometrics*. MPRA Paper No. 41.327 [online]. <https://tinyurl.com/2dyuxmvh>
- Ding, Z., Yi, G., Tam, V. W. Y. & Huang, T. (2016). A System Dynamics-Based Environmental Performance Simulation of Construction Waste Reduction Management in China. *Waste Management*, 51, 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.001>
- Giltrap, D. L., Li, C. & Saggar, S. (2010). DNDC: A Process-Based Model of Greenhouse Gas Fluxes from Agricultural Soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 136(3-4), 292-300. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.06.014>
- Hasanbeigi, A., Arens, M. & Price, L. (2014). Alternative Emerging Ironmaking Technologies for Energy-Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction: A Technical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 645-658. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.031>
- Holappa, L. (2020). A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions from the Steel Industry. *Metals*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/met10091117>
- Ibarra-Vega, D. W. (2016). Modeling Waste Management in a Bioethanol Supply Chain: A System Dynamics Approach. *DYNA*, 83(195), 99-104. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.47514>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *IPCC Sixth Assessment Report. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. United Nations.
- Jackson, T. & Marks, N. (1999). Consumption, Sustainable Welfare and Human Needs — With Reference to UK Expenditure Patterns between 1954 and 1994. *Ecological Economics*, 28(3), 421-441. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)00108-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00108-6)
- Kirschen, M., Badr, K. & Pfeifer, H. (2011). Influence of Direct Reduced Iron on the Energy Balance of the Electric Arc Furnace in Steel Industry. *Energy*, 36(10), 6146-6155. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.050>

- Köne, A. Ç. & Büke, T. (2010). Forecasting of CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion Using Trend Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2906-2915. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.006>
- Powlson, D. S., Smith, P. & Smith, J. U. (1996). *ROTHC-26.3 A Model for the Turnover of Carbon in Soil-Model Using Existing Long-Term Datasets*. NATO ASI Series.
- Ramin, M. & Huhtanen, P. (2012). Development of Non-Linear Models for Predicting Enteric Methane Production. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 62(4), 254-258. <https://doi.org/10.1080/09064702.2013.765908>
- Ravazzolo, F. & Vespignani, J. (2020). World Steel Production: A New Monthly Indicator of Global Real Economic Activity. *Canadian Journal of Economics*, 53(2), 743-766. <https://doi.org/10.1111/caje.12442>
- Rietmann, N., Hügler, B. & Lieven, T. (2020). Forecasting the Trajectory of Electric Vehicle Sales and the Consequences for Worldwide CO<sub>2</sub> Emissions. *Journal of Cleaner Production*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121038>
- Şanlı, A., Yılmaz, İ. T. & Gümüş, M. (2021). Investigation of Combustion and Emission Characteristics in a TBC Diesel Engine Fuelled with CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> Mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(47), 24395-24409. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.014>
- Shatokha, V. (2015). The Sustainability of the Iron and Steel Industries in Ukraine: Challenges and Opportunities. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(2), 106-115. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0036-2>
- Terrer, C., Phillips, R. P., Hungate, B. A., Rosende, J., Pett-Ridge, J., Craig, M. E., Van Groenigen, K. J., Keenan, T. F., Sulman, B. N., Stocker, B. D., et al. (2021). A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO<sub>2</sub>. *Nature*, 591, 599-603.
- Van Marle, M. J., Van Wees, D., Houghton, R. A., Field, R. D., Verbesselt, J. & Van der Werf, G. (2022). New land-use-change emissions indicate a declining CO<sub>2</sub> airborne fraction. *Nature*, 603, 450-454.
- Vogl, V., Åhman, M. & Nilsson, L. J. (2018). Assessment of Hydrogen Direct Reduction for Fossil-Free Steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, 736-745. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>
- Wallington, T. J., Sullivan, J. L. & Hurley, M. D. (2008). Emissions of CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC, PM, HFC-134a, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from the Global Light Duty Vehicle Fleet. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(2), 109-116. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0275>
- Xu, C. & Cang, D.-Q. (2010). A Brief Overview of Low CO<sub>2</sub> Emission Technologies for Iron and Steel Making. *Journal of Iron and Steel Research International*, 17(3), 1-7. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60064-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60064-7)
- Yeh, C.-H. & Hartmann, M. (2021). To Purchase or Not to Purchase? Drivers of Consumers' Preferences for Animal Welfare in Their Meat Choice. *Sustainability*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13169100>

# Arquitectura y diseño de *software* para picosatélites orientado al monitoreo y predicción del comportamiento de incendios forestales (CAFO-2019)

| Fecha de recibido: 15 de julio 2023 | Fecha de aprobado: 20 de abril 2024 |

| Reception date: July 15, 2023 | Approval date: April 20, 2024 |

| Data de recebimento: 15 de julho de 2023 | Data de aprovação: 20 de abril de 2024 |

## Ricardo Andrés Santa Quintero

<https://orcid.org/0000-0002-8399-2425>

[ricardo.santaq@unilibre.edu.co](mailto:ricardo.santaq@unilibre.edu.co)

Magíster en Tecnologías Digitales

Aplicadas a la Educación

Docente e investigador – Universidad Libre, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación DAVINCIS

Master's Degree in Digital Technologies

Applied to Education

Teacher and researcher – Universidad Libre, Colombia

Role of the researcher: theorist and writer

Davincis Research Group

Mestrado em Tecnologias Digitais

Aplicadas à Educação

Docente e investigador – Universidad Libre, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escritor

Grupo de investigação Davincis

## Brayan Ricardo Moreno Espinosa

<https://orcid.org/0000-0001-7179-3763>

[brayan-morenoe@unilibre.edu.co](mailto:brayan-morenoe@unilibre.edu.co)

Ingeniero de Sistemas

Investigador – Universidad Libre, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación DAVINCIS

Systems Engineer

Researcher – Universidad Libre, Colombia

Researcher's role: theorist and writer

Davincis Research Group

Engenheiro de sistemas

Investigador – Universidad Libre, Colômbia

O papel do investigador: teórico e escritor

Grupo de investigação Davincis

## Carlos Leonardo Adames Camargo

<https://orcid.org/0000-0002-2218-6462>

[carlosl-adamesc@unilibre.edu.co](mailto:carlosl-adamesc@unilibre.edu.co)

Ingeniero de Sistemas

Investigador – Universidad Libre, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación DAVINCIS

Systems Engineer

Researcher – Universidad Libre, Colombia

Researcher's role: theorist and writer

Davincis Research Group

Engenheiro de sistemas

Investigador – Universidad Libre, Colômbia

O papel do investigador: teórico e escritor

Grupo de investigação Davincis

**Cómo citar este artículo:** Santa Quintero, R. A., Moreno Espinosa, B. R., y Adames Camargo, C. L. (2024). Arquitectura y diseño de *software* para picosatélites orientado al monitoreo y predicción del comportamiento de incendios forestales (CAFO-2019). *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 81-94. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.823>



## Arquitectura y diseño de *software* para picosatélites orientado al monitoreo y predicción del comportamiento de incendios forestales (CAFO-2019)

## Architecture and software design for picosatellites oriented towards monitoring and predicting forest fire behavior (CAFO-2019)

## Arquitetura e design de *software* para picosatélites orientados ao monitoramento e previsão do comportamento de incêndios florestais (CAFO-2019)

**Resumen:** El proyecto se centra en el desarrollo de un sistema descentralizado para el monitoreo y la predicción de incendios forestales utilizando CanSat. El objetivo principal es facilitar la toma de decisiones oportunas en la lucha contra los incendios forestales, aprovechando las ventajas de la descentralización, la escalabilidad y la seguridad. El trabajo abarca varias etapas, desde el diseño y la construcción del CanSat, hasta el desarrollo del *software* y la definición de la arquitectura de sistema. Se utiliza el microprocesador ESP32 y el lenguaje de programación Arduino para programar el sistema, y se implementa un servidor web para visualizar los datos. El enfoque de microservicios permite una descentralización completa del sistema y una interconexión eficiente entre los nodos. Se destaca la escalabilidad independiente de la tecnología utilizada y se implementan medidas de seguridad para proteger la comunicación y los datos. Los resultados muestran que la implementación del sistema descentralizado cumple con los requisitos de disponibilidad, escalabilidad y seguridad. Se resalta la capacidad de respuesta en tiempo real y el procesamiento distribuido de datos para mejorar la toma de decisiones en la prevención y gestión de incendios forestales.

**Palabras clave:** arquitectura; incendios; monitoreo; picosatélites; predicción; sistemas descentralizados.

**Abstract:** The project focuses on the development of a decentralized system for monitoring and predicting forest fires using CanSat. The main objective is to facilitate timely decision-making in the fight against forest fires, leveraging the advantages of decentralization, scalability, and security. The work encompasses several stages, from the design and construction of the CanSat to software development and system architecture definition. The ESP32 microprocessor and Arduino programming language are used to program the system, and a web server is implemented to visualize the data. The microservices approach allows for complete decentralization of the system and efficient interconnection between nodes. The technology-independent scalability is highlighted, and security measures are implemented to protect communication and data. The results show that the implementation of the decentralized system meets the requirements for availability, scalability, and security. The real-time response capability and distributed data processing are emphasized to improve decision-making in forest fire prevention and management.

**Keywords:** Architecture; fires; monitoring; picosatellites; prediction; decentralized systems.

**Resumo:** O projeto foca no desenvolvimento de um sistema descentralizado para monitoramento e previsão de incêndios florestais utilizando CanSat. O objetivo principal é facilitar a tomada de decisões oportunas na luta contra os incêndios florestais, aproveitando as vantagens da descentralização, escalabilidade e segurança. O trabalho abrange várias etapas, desde o design e construção do CanSat até o desenvolvimento de *software* e definição da arquitetura do sistema. O microprocessador ESP32 e a linguagem de programação Arduino são usados para programar o sistema, e um servidor web é implementado para visualizar os dados. A abordagem de microsserviços permite uma descentralização completa do sistema e uma interconexão eficiente entre os nós. A escalabilidade independente da tecnologia utilizada é destacada, e são implementadas medidas de segurança para proteger a comunicação e os dados. Os resultados mostram que a implementação do sistema descentralizado atende aos requisitos de disponibilidade, escalabilidade e segurança. A capacidade de resposta em tempo real e o processamento distribuído de dados são destacados para melhorar a tomada de decisões na prevenção e gestão de incêndios florestais.

**Palavras-chave:** Arquitetura; incêndios; monitoramento; picosatélites; previsão; sistemas descentralizados.

## Introducción

El agotamiento de los recursos naturales, la deforestación, el cambio climático y la contaminación del aire han generado una preocupación creciente debido a su grave impacto en la frecuencia y la propagación de los incendios forestales. Estos fenómenos han causado una disminución en la disponibilidad de agua y otros elementos vitales para la supervivencia de los bosques, así como un aumento en la susceptibilidad a los incendios debido a la pérdida de cobertura vegetal protectora en áreas deforestadas. Además, el cambio climático ha alterado los patrones climáticos, creando condiciones más favorables para la aparición y la intensidad de los incendios forestales. A su vez, la contaminación del aire contribuye a la acumulación de materiales inflamables y aumenta la probabilidad de que los incendios se desencadenen y se extiendan rápidamente (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], s. f.).

Tales desafíos requieren la implementación de sistemas estratégicos que puedan monitorear y predecir el comportamiento de los incendios forestales de manera precisa y oportuna. La idea de estos sistemas es que permitan recopilar datos relevantes como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la densidad de la vegetación, con el fin de evaluar el riesgo de incendios en áreas específicas. Mediante el análisis de estos datos, es posible identificar patrones, detectar incendios en etapas tempranas y predecir su propagación, lo cual permite una respuesta más eficiente y efectiva por parte de los equipos de prevención y extinción.

La implementación de picosatélites con un objetivo similar pauta las bases para la aplicación de estos dispositivos mediante la recopilación de datos climatológicos como la medición de temperatura, presión y altitud; esto, a partir del uso de tecnologías como la programación en Arduino y el desarrollo de un dispositivo que sea funcional para realizar pruebas en la ciudad de Bogotá y algunos municipios aledaños. Este es uno de los proyectos a escala real manifestados en Colombia en el año 2022 (Cagua-Colmenares y Vinche-Hernández, 2022).

La implementación de sistemas de monitoreo y predicción de incendios forestales es fundamental para proteger los ecosistemas naturales y garantizar la seguridad de las comunidades. Estos sistemas brindan una visión integral del comportamiento de los incendios, lo cual facilita la toma de decisiones informadas y la asignación adecuada de recursos para combatirlos de manera más eficiente. Al anticipar la propagación de los incendios, se pueden tomar medidas preventivas, evacuar áreas en riesgo y minimizar los daños materiales y humanos causados por estos desastres naturales.

Uno de los principales sistemas de predicción es el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF), implementado en México. Desarrollado a partir del proyecto Conacyt-Conafor 2014-2-252620, es una herramienta focalizada también en la toma oportuna de decisiones para contrarrestar los incendios forestales surgidos en México. Aquel sistema, desarrollado por la Universidad Juárez del Estado de Durango, se encarga de evaluar los conglomerados de puntos de calor e incendios forestales mediante un mapeo geográfico (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 20 de diciembre de 2020). La información es captada por unos satélites (Conabio) que están directamente relacionados con la herramienta, lo cual permite una actualización en tiempo casi real. Se logra por medio de un sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de los satélites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) usados en los satélites Terra-1 y Aqua-1, y del sensor VIIRS (Visible and Infrared Imaging Radiometer Suite) del satélite Suomi-NPP.

Con dichos sensores, lograron fabricar una herramienta a escala real que tuviera cobertura en todo el país. Así mismo, fue la inspiración del proyecto para conceptualizar un sistema de monitoreo más focalizado y a una escala menor implementando la innovación aeroespacial.

En consecuencia, se ha identificado una oportunidad para asentar sistemas de monitoreo y predicción del comportamiento de los incendios forestales. Para ello, el grupo de investigación DAVINCI, perteneciente

a la Universidad Libre, estuvo a cargo del proyecto de investigación titulado “Perspectivas de los servicios TI e ingeniería del *software* en *blockchain*, VR y picosatélites”, en el cual se propone el uso de picosatélites en un sistema descentralizado, conocidos como CanSat. Estos dispositivos, con dimensiones específicas (66 mm de diámetro, 115 mm de altura y una masa de 300-350 gramos), están equipados con sensores climatológicos para recopilar datos sobre factores ambientales relevantes (Naylamp Mechatronics, 2016).

Además de la recopilación de datos, se considera la funcionalidad de su transmisión y su almacenamiento, ya que los factores mencionados aumentan la amenaza de los incendios forestales, y su frecuencia y gravedad. Ante esta situación, resulta crucial implementar sistemas estratégicos de monitoreo y predicción que permitan prevenir y mitigar los efectos destructivos de los incendios. Estos sistemas recopilan datos precisos sobre factores ambientales relevantes, y, mediante un análisis detallado, permiten identificar patrones, detectar incendios en etapas tempranas y predecir su propagación.

El uso de picosatélites en un sistema descentralizado, como los CanSat, ofrece una solución efectiva, dado que recopilan datos climatológicos y facilitan la transmisión y el almacenamiento de información. La instauración de estos sistemas de monitoreo y predicción es fundamental para proteger los ecosistemas naturales, garantizar la seguridad de las comunidades y permitir una respuesta más eficiente y efectiva frente a los incendios forestales. Con todo esto, se protegen los ecosistemas naturales y se garantiza la seguridad de las comunidades afectadas por los incendios forestales.

## Materiales y métodos

Para el desarrollo del sistema descentralizado, se seleccionaron los siguientes componentes:

Para la fabricación de los CanSat, se emplearon los siguientes sensores:

1. **ESP32:** El módulo ESP32 es una solución de Wi-Fi/Bluetooth todo en uno, integrada y certificada que proporciona no solo la radio inalámbrica, sino también un procesador integrado con interfaces para conectarse con varios periféricos. Este microcontrolador será la base para la implementación del servidor web del CanSat junto a los demás componentes de factores ambientales (Beningo, 21 de enero de 2020)
2. **MQ135:** Sensor implementado en la detección de gases peligrosos y en controladores de la calidad del aire. Este sensor es capaz de detectar un amplio rango de gases que incluye: NH<sub>3</sub>, NOx, alcohol, benceno, humo y CO<sub>2</sub> (PalcoElectronica, s. f.).
3. **MPU:** Es una unidad de medición inercial o IMU de seis grados de libertad, pues combina un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio de tres ejes (Naylamp Mechatronics, 2016).
4. **BMP180:** Permite medir la altura respecto al nivel del mar, su funcionamiento está basado en la relación entre la presión de aire y la altitud (Naylamp Mechatronics, s. f.).
5. **NEO06MV2:** Es un módulo GPS y se utiliza para la navegación. El módulo simplemente verifica su ubicación en la tierra y proporciona datos de salida como la altura sobre el nivel del mar, la longitud y la latitud de su posición, fecha y hora GMT.

Una vez mencionados los componentes clave utilizados en los CanSat, es importante comprender cómo funcionan en conjunto para recopilar datos y realizar tareas específicas.

El módulo ESP32 actúa como el cerebro del CanSat, gestionando la comunicación con los diferentes sensores y periféricos. Este módulo recopila los datos obtenidos por sensores como el MQ135, que detecta gases peligrosos y controla la calidad del aire, y el BMP180, que mide la altura en relación con el nivel del mar. Estos datos son procesados y almacenados en la base de datos de Firebase, que proporciona la capacidad de almacenamiento y disponibilidad necesaria para el sistema.

Además de la recopilación de datos, el CanSat utiliza el sensor MPU (que mide el movimiento y la orientación) para obtener información precisa sobre su posición en el espacio. Esto se combina con el módulo receptor NEO06MV2, que permite la geolocalización del CanSat utilizando señales de satélites GPS.

El CanSat, equipado con estos componentes, se convierte en un nodo independiente capaz de recopilar datos ambientales, medir la calidad del aire, determinar la posición geográfica y transmitir toda esta información a través de su servidor web implementado en el módulo ESP32. Los CanSat pueden interactuar entre sí, compartiendo datos y actuando como canales de comunicación para el almacenamiento de información.

En conjunto, dichos componentes permiten la recopilación de datos ambientales relevantes, la geolocalización y la comunicación eficiente entre los nodos CanSat. Esta integración de servicios independientes en un sistema descentralizado ofrece una visión más completa y precisa del comportamiento de los incendios forestales, facilitando la toma de decisiones informadas y la respuesta efectiva ante situaciones de riesgo (Jiménez, 15 de enero de 2022).

La elección de SCRUM se basa en su enfoque de obtención de resultados a corto y mediano plazo. Se sigue un enfoque de desarrollo incremental en bloques temporales cortos y fijos. Las fases del proyecto incluyen la planificación (Product Backlog), donde se establecen las tareas prioritarias; la ejecución (Sprint), donde se determina el intervalo de tiempo para el desarrollo y la implementación; y el control (Burn Down), donde se mide el progreso del proyecto (Raeburn, 25 de agosto de 2022).

Para el desarrollo del proyecto de monitoreo y predicción de incendios forestales utilizando picosatélites en un sistema descentralizado, se puede aplicar la metodología ágil SCRUM planteada de la siguiente forma:

- Planificación del proyecto: Se crea el Product Backlog, que contiene las funcionalidades y los requisitos del sistema, como la recolección de datos ambientales, la comunicación entre los picosatélites y el almacenamiento de información.
- Sprint: Se establecen Sprints de corta duración; por ejemplo, de dos semanas. Durante cada Sprint, se seleccionan las funcionalidades prioritarias del Product Backlog y se establece un objetivo específico para el Sprint.
- Reuniones diarias de seguimiento: Se llevan a cabo reuniones diarias de corta duración para que el equipo revise el progreso, discuta los obstáculos y planifique las tareas diarias. Esto permite mantener la colaboración y la transparencia dentro del equipo.
- Desarrollo iterativo: Durante cada Sprint, el equipo desarrolla las funcionalidades seleccionadas, como la utilización de los sensores y la configuración de la comunicación entre los picosatélites. Al finalizar cada Sprint, se debe tener una funcionalidad completa y lista para su revisión.
- Revisión del Sprint: Al finalizar cada Sprint, se realiza una reunión de revisión del Sprint, en la que se muestra el trabajo completado y se recopila el *feedback* del cliente y los *stakeholders*. Esto permite evaluar el progreso y realizar ajustes si es necesario.
- Control y mejora continua: Se utiliza un Burn Down Chart para visualizar el progreso del proyecto y garantizar que se están cumpliendo los objetivos establecidos (Rocha-Garrido, 15 de febrero de 2022). Además, se realiza una retrospectiva al final de cada Sprint para identificar áreas de mejora y planificar acciones correctivas.

En el contexto de este proyecto, la metodología SCRUM permite un enfoque iterativo e incremental en el desarrollo del sistema descentralizado. El equipo trabaja en ciclos cortos para entregar incrementos funcionales que incluyen la recopilación de datos ambientales, la comunicación entre los picosatélites y el almacenamiento de información. Esta metodología fomenta la flexibilidad, la adaptabilidad y la entrega continua de valor, lo cual es fundamental en un proyecto que busca desarrollar un sistema eficiente y escalable para el monitoreo y la predicción de incendios forestales.

## Resultados

### Etapa 1. Diseño y construcción del picosatélite

Durante la primera etapa del proyecto, se llevó a cabo el diseño y la construcción del picosatélite, centrado especialmente en el desarrollo lógico del circuito. Esta etapa fue de suma importancia, ya que se estableció la conexión adecuada de los componentes que se utilizarán en la fabricación del CanSat, garantizando así su funcionamiento óptimo. En este contexto, es importante resaltar el papel fundamental desempeñado por el ESP32, un microprocesador versátil y potente que actúa como la base central del CanSat. El ESP32 asume múltiples funciones clave en el proyecto, entre las que se destacan dos de ellas en particular (Beningo, 21 de enero de 2020).

En primer lugar, el ESP32 se encargará de alojar un servidor web que permitirá la comunicación y el intercambio de datos con otros dispositivos o sistemas externos. Esta capacidad de comunicación es esencial para el éxito del CanSat, ya que facilita la transferencia de información relevante y posibilita su integración en redes de monitoreo más amplias.

En segundo lugar, el ESP32 asume la responsabilidad de administrar los sensores ambientales. Estos sensores son fundamentales para el monitoreo de incendios forestales, ya que recolectan los datos necesarios para su detección y seguimiento. Gracias a la capacidad de procesamiento del ESP32, se puede realizar un análisis en tiempo real de los datos recopilados, lo cual permite tomar medidas rápidas y efectivas en caso de emergencia.

La elección del ESP32 como microprocesador central del CanSat es estratégica, debido a sus características sobresalientes. Además de su versatilidad y potencia, el ESP32 ofrece una gran capacidad de procesamiento, lo que le permite manejar múltiples tareas de manera eficiente. Asimismo, cuenta con una conectividad sólida que facilita la interacción con otros dispositivos y sistemas externos (Beningo, 21 de enero de 2020).

Al utilizar el ESP32 como componente central, se logra una integración eficiente de los sensores y un control centralizado para el funcionamiento del sistema. Esto garantiza un desempeño óptimo del CanSat y abre la posibilidad de futuras mejoras y ampliaciones en función de las necesidades específicas del proyecto.

En resumen, la primera etapa del proyecto se enfocó en el diseño y la construcción del picosatélite, con énfasis en el desarrollo lógico del circuito. El ESP32 desempeña un papel fundamental como microprocesador central, al encargarse de funciones clave como la comunicación, el intercambio de datos y la administración de los sensores ambientales. Su elección estratégica se basa en su capacidad de procesamiento, conectividad y flexibilidad, que permite una integración eficiente y un control centralizado del sistema.

En la segunda parte de la primera etapa del proyecto, se realiza la construcción física del CanSat utilizando los componentes previamente mencionados. En esta etapa, se lleva a cabo la integración de una *proto-board*, la cual desempeña un papel fundamental al servir como base para la conexión del circuito (ver Figura 1).

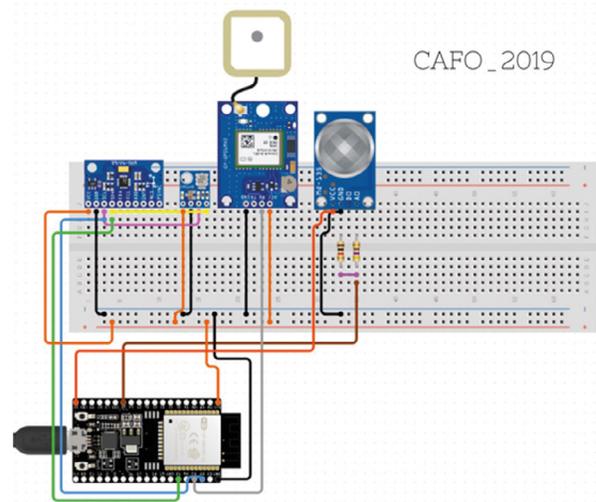


Figura 1. Diseño lógico elaborado en la herramienta Circuit.io  
Fuente: elaboración propia.

La *proto-board*, también conocida como placa de pruebas, es un dispositivo que permite la conexión y la interconexión de los componentes electrónicos de manera temporal. Se caracteriza por proporcionar una

superficie con una matriz de orificios en la que se pueden insertar los componentes y realizar las conexiones necesarias para el funcionamiento del CanSat (330ohms, 2 de marzo de 2016).

En la fase de prototipado, la utilización de una *protoboard* en la construcción del CanSat ofrece numerosas ventajas. En primer lugar, facilita la tarea de ensamblar los componentes de manera ordenada, lo cual resulta fundamental para garantizar la correcta conexión entre ellos. Al contar con una superficie organizada y con los orificios dispuestos estratégicamente, se logra una disposición estructurada que facilita el proceso de ensamblaje y minimiza los posibles errores de conexión.

Además, la *protoboard* brinda una mayor flexibilidad en el proceso de construcción del CanSat. Al ser una solución temporal, permite realizar modificaciones y ajustes en el circuito de forma más sencilla, sin la necesidad de soldar los componentes de manera permanente. Esto resulta especialmente útil durante la etapa de pruebas y validación del sistema, ya que se pueden realizar cambios y mejoras de forma ágil y rápida.

Es importante tener en cuenta que, aunque la *protoboard* es una solución temporal para la construcción del prototipo del CanSat, en etapas posteriores del proyecto se podría considerar la fabricación de una placa de circuito impreso (PCB) personalizada. La PCB es una placa que se diseñaría específicamente para el CanSat, con las conexiones y los componentes soldados de forma permanente (Shamkhalichenar *et al.*, 2020). Esto proporcionaría una mayor eficiencia y robustez al diseño, pues elimina las posibles conexiones inestables y reduce el tamaño del sistema.

En resumen, en la segunda parte de la primera etapa del proyecto se lleva a cabo la construcción física del CanSat, como se puede observar en la Figura 2, y se destaca la integración de una *protoboard* como base para la conexión del circuito.

La *protoboard* facilita el ensamblaje ordenado de los componentes y asegura las conexiones correctas, además de ofrecer flexibilidad durante el proceso de pruebas y ajustes. En etapas posteriores, se podría considerar la fabricación de una PCB personalizada para mejorar la eficiencia y la robustez del diseño.

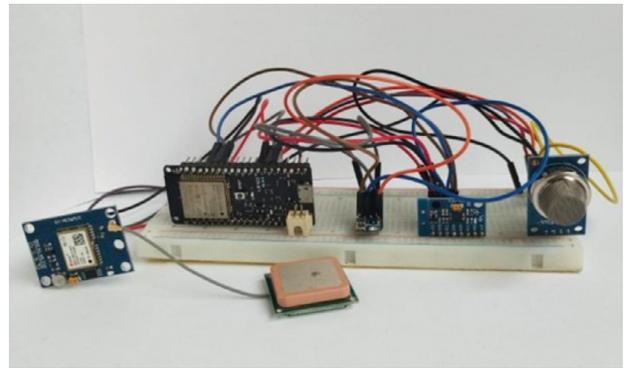


Figura 2. Construcción del circuito  
Fuente: elaboración propia.

## Etapa 2. Desarrollo del *software*, análisis de patrones arquitectónicos y arquitectura de sistema

En la segunda etapa del proyecto, se hace énfasis en la implementación del *software* necesario para el funcionamiento del CanSat, así como en el análisis y el diseño de los patrones arquitectónicos y la arquitectura de sistema.

En primer lugar, se lleva a cabo el desarrollo del *software* que permitirá el control y la gestión del CanSat. Esto implica la programación de algoritmos y la creación de interfaces de usuario que faciliten la interacción con el sistema. Además, se incluye la configuración de la comunicación con otros dispositivos o sistemas externos, lo que posibilita la transmisión y recepción de datos relevantes.

Durante esta etapa, es fundamental realizar un análisis detallado de los patrones arquitectónicos apropiados para el proyecto. Los patrones arquitectónicos son soluciones probadas y comprobadas que ayudan a estructurar y organizar el *software* de manera eficiente. Se estudian diferentes patrones, como el modelo-vista-controlador (MVC), el modelo de capas y otros, con el objetivo de seleccionar el más adecuado para el CanSat.

Además, se realiza el diseño de la arquitectura de sistema del proyecto. Esto implica definir las estructuras, los componentes y las relaciones que conformarán el sistema en su conjunto. Se analizan los requisitos funcionales y no funcionales, así como las restricciones

y las necesidades específicas del proyecto, para establecer una arquitectura que garantice un rendimiento óptimo y una escalabilidad adecuada.

Durante el desarrollo del *software*, el equipo se enfoca en garantizar la calidad del código y la funcionalidad del sistema. Se realizan pruebas exhaustivas para validar el correcto funcionamiento de todas las operaciones, y para identificar y corregir posibles errores o fallos. También, se presta especial atención a la seguridad del sistema, implementando medidas de protección y asegurando la integridad de los datos.

Se inicia el desarrollo del *software* utilizando el lenguaje de programación Arduino. Esta elección se basa en su compatibilidad con el microprocesador ESP32 y su amplia comunidad de desarrolladores que brindan soporte y recursos adicionales. En esta etapa, se procede a construir el código necesario para programar el ESP32 y permitir su interacción con los sensores conectados. El objetivo principal es coordinar la adquisición de datos provenientes de los sensores y hacer que estos sean visibles a través de una interfaz web.

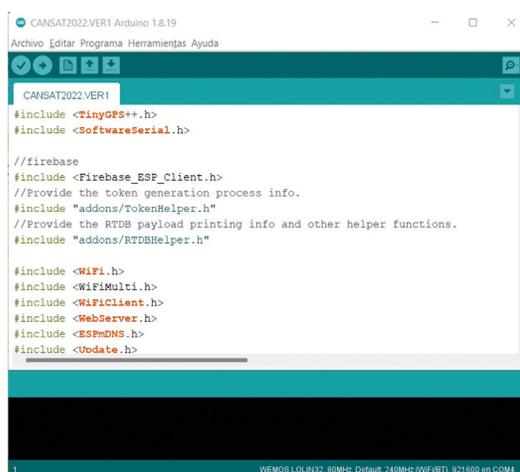
El código comienza por configurar las interfaces de comunicación apropiadas para establecer la conexión con los sensores. Esto puede incluir el uso de protocolos como I2C, SPI o UART, dependiendo de los sensores utilizados. A continuación, se implementan las instrucciones necesarias para leer los valores de los sensores y almacenarlos en variables.

Además, se consideran aspectos como el muestreo de datos, la frecuencia de lectura de los sensores y la gestión de eventos para garantizar la captura precisa y oportuna de los datos ambientales relevantes. Se aplican técnicas de programación eficientes para optimizar el rendimiento del sistema y asegurar una respuesta rápida a los cambios en las condiciones ambientales.

La implementación del servidor web es otro componente importante en el desarrollo del *software*. Se utilizan librerías específicas de Arduino para crear un servidor web que permita visualizar los datos recopilados a través de una interfaz amigable. Esto implica establecer las rutas y páginas web necesarias para mostrar los valores de los sensores y permitir su acceso desde dispositivos externos. A medida que se avanza en el desarrollo del *software*, se realizan pruebas

minuciosas para validar la funcionalidad y el rendimiento del código. Se verifican los valores leídos de los sensores, se comprueba la estabilidad del servidor web y se evalúa la respuesta del sistema ante diferentes situaciones (Quisilema-Carrera, 2022).

Es importante mencionar que el uso del lenguaje de programación Arduino facilita el desarrollo del *software*, ya que proporciona una sintaxis sencilla y una amplia gama de bibliotecas y ejemplos disponibles (Fernández, 23 de septiembre de 2022). Esto agiliza la implementación de las funcionalidades necesarias y permite un desarrollo más eficiente.



```

CANSAT2022.VER1
#include <TinyGPS++.h>
#include <SoftwareSerial.h>

//firebase
#include <Firebase_ESP_Client.h>
//Provide the token generation process info.
#include "addons/TokenHelper.h"
//Provide the RTDB payload printing info and other helper functions.
#include "addons/RTDBHelper.h"

#include <WiFi.h>
#include <WiFiMulti.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <WebServer.h>
#include <ESPmDNS.h>
#include <Update.h>

```

Figura 3. Estructura lógica en Arduino

Fuente: elaboración propia.

Durante esta etapa, se realiza el establecimiento de un servidor web en el ESP32 a fin de crear una interfaz intuitiva y accesible para visualizar los datos recopilados. Con tal objetivo, se lleva a cabo la configuración de rutas y puntos finales que permitirán la correcta comunicación entre el servidor y el navegador. Además, se define el formato y el diseño de la página web, asegurándose de que los elementos de la interfaz sean visualmente atractivos y faciliten la comprensión de los datos en tiempo real.

Así mismo, la estructuración de un servidor web es primordial para brindar una experiencia interactiva al usuario. Una vez que el servidor está en funcionamiento y el código del ESP32 ha sido programado para adquirir y almacenar los datos provenientes de los

sensores, es posible acceder a la interfaz web desde cualquier navegador compatible. A través de esta interfaz, se presenta de manera clara y comprensible la información recopilada por los sensores, lo que permite una fácil interpretación y análisis de los datos.

Es importante destacar que la interfaz web se desarrolla de manera cuidadosa, considerando aspectos de usabilidad y experiencia del usuario. Se busca que la visualización de los datos sea intuitiva y que la navegación por la interfaz sea fluida y amigable. Además, se pueden incorporar gráficos, tablas y otros elementos visuales que ayuden a representar de forma efectiva los datos recopilados.

Como bien se tiene claro, la instauración exitosa del servidor web y la interfaz de visualización de datos constituyen un hito importante en el proyecto. A través de esta etapa, se logra proporcionar a los usuarios una herramienta eficaz para monitorear y analizar la información relevante sobre incendios forestales recopilada por los picosatélites. Esto contribuye a la creación de un sistema robusto y funcional que cumple con los objetivos establecidos, brindando información valiosa para la toma de decisiones y la prevención de desastres.

En la Figura 4, durante el proceso de análisis de patrones arquitectónicos, se llevó a cabo un riguroso estudio de diferentes enfoques para determinar la mejor estructura del sistema. Se exploraron varias alternativas, considerando aspectos como la escalabilidad, la arquitectura, la modularidad, la mantenibilidad y otros requisitos específicos del proyecto.

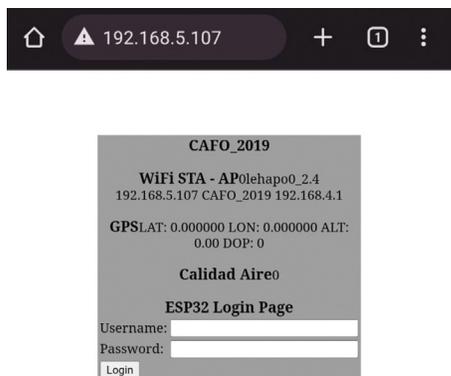


Figura 4. Presentación de la interfaz del servidor web  
Fuente: elaboración propia.

Entre los patrones arquitectónicos considerados se encontraban la arquitectura de tres capas, la arquitectura cliente-servidor, la arquitectura orientada a servicios y el patrón de microservicios, entre otros. Cada uno de estos patrones fue evaluado en términos de su aplicabilidad, sus beneficios y sus limitaciones para el contexto del proyecto.

Después de un análisis detallado, se determinó que el patrón de microservicios era el más adecuado para el desarrollo del sistema. Sin embargo, antes de tomar esta decisión, se presentó un modelo inicial de arquitectura en capas como ejemplo, que sirvió como punto de partida para comprender las interacciones entre los diferentes componentes del sistema.

Este modelo inicial, basado en una arquitectura en  $n$  capas, proporcionó una visión general de cómo los distintos módulos y componentes se relacionarían entre sí. Se establecieron las capas de presentación, la lógica de negocio y el acceso a datos, definiendo las responsabilidades y las interacciones entre ellas. Este enfoque de múltiples capas fue considerado como un punto de partida para el diseño de la arquitectura final del sistema, brindando una estructura inicial que se podía adaptar y evolucionar según las necesidades y los requisitos específicos del proyecto.

En la Figura 5, se presenta la estructura y las características del *software* en los niveles 3 y 4 del sistema. Estos niveles son fundamentales para el funcionamiento y la distribución del sistema, y engloban aspectos clave como la adquisición de datos, el procesamiento de la información y el almacenamiento de acuerdo con los criterios y requisitos establecidos durante la segunda etapa del desarrollo del *software*.

En el nivel 4, se enfoca en la adquisición de datos, es decir, en la recolección y captura de información relevante proveniente de los sensores ubicados en los picosatélites. Este proceso se lleva a cabo de manera coordinada y eficiente, garantizando la recopilación precisa y confiable de los datos ambientales necesarios para el monitoreo y la predicción de incendios forestales. Se establecen mecanismos para la comunicación y sincronización entre los picosatélites (SAJR, CAFO METEO) y el servidor central, asegurando la transmisión segura y oportuna de los datos adquiridos.

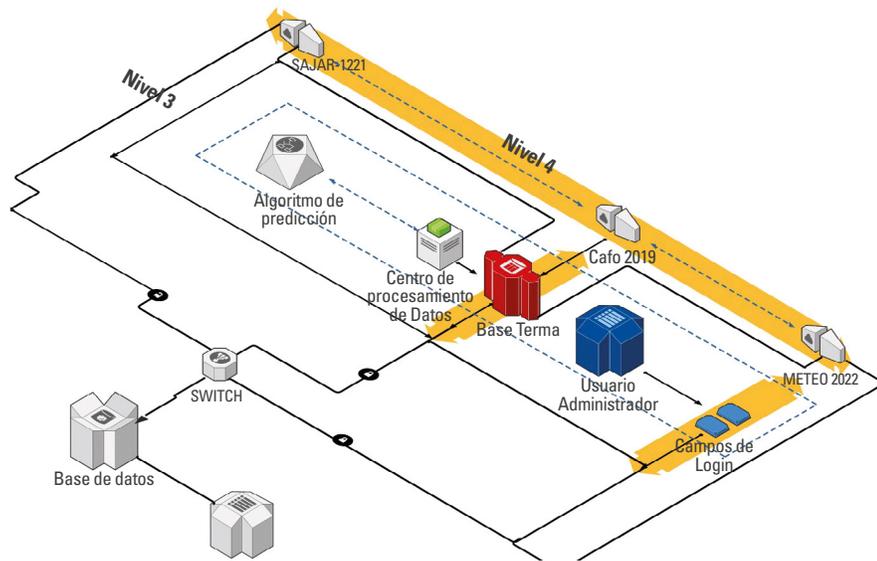


Figura 5. Diagrama de componentes de la arquitectura inicial  
Fuente: elaboración propia.

En el nivel 3, se abordan el procesamiento y el almacenamiento de los datos recolectados. Aquí, se aplican algoritmos y técnicas específicas para analizar y transformar la información adquirida en concimientos relevantes. Este procesamiento puede incluir tareas como la detección de patrones, la generación de modelos predictivos y la identificación de situaciones anómalas. Además, se establecen mecanismos para el almacenamiento seguro y eficiente de los datos procesados, asegurando su disponibilidad y preservación a largo plazo.

Es importante destacar que la estructuración y caracterización del *software* en los niveles 3 y 4 del sistema se lleva a cabo en estrecha relación con los criterios y requisitos establecidos durante la segunda etapa del desarrollo del *software*. Estos criterios y requisitos son el resultado de un análisis exhaustivo de las necesidades del proyecto, considerando aspectos como la escalabilidad, la confiabilidad, la seguridad y el rendimiento del sistema, tal como se ve en la Figura 6.

En los niveles 4 y 5, se establece la capa de procesos o de negocio, donde se distribuye y se caracteriza

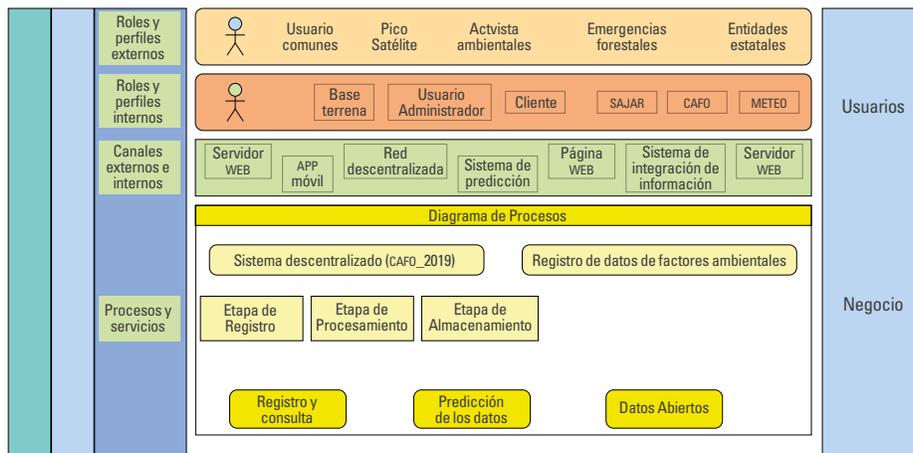


Figura 6. Estructura de diagrama de microservicios  
Fuente: elaboración propia.

el *software*. Se pone un énfasis particular en el funcionamiento del sistema, incluyendo la toma de datos, el procesamiento de estos y su respectivo almacenamiento, todo ello basado en los criterios y requerimientos establecidos durante el desarrollo del *software* en la segunda etapa.

En esta capa, se define cómo se capturan los datos necesarios para el monitoreo de incendios forestales, ya sea a través de los sensores incorporados en los CanSat o mediante otras fuentes de información relevante. Luego, se realiza el procesamiento de estos datos, aplicando algoritmos y técnicas pertinentes para obtener información valiosa sobre el comportamiento de los incendios. Además, se establecen los criterios y

requisitos específicos para el almacenamiento de los datos procesados. Esto puede incluir consideraciones de seguridad, integridad y escalabilidad, asegurando que la información esté disponible y sea confiable para su posterior análisis y toma de decisiones.

Sin embargo, tras un análisis más profundo y considerando las ventajas inherentes al patrón de microservicios, se decidió adoptar este enfoque arquitectónico en lugar del modelo de múltiples capas inicialmente propuesto. El patrón de microservicios demostró ser más adecuado para el sistema, pues brinda una mayor flexibilidad, escalabilidad y modularidad, y permite el desarrollo, el despliegue y la gestión independiente de cada microservicio, como lo denota la Figura 7.

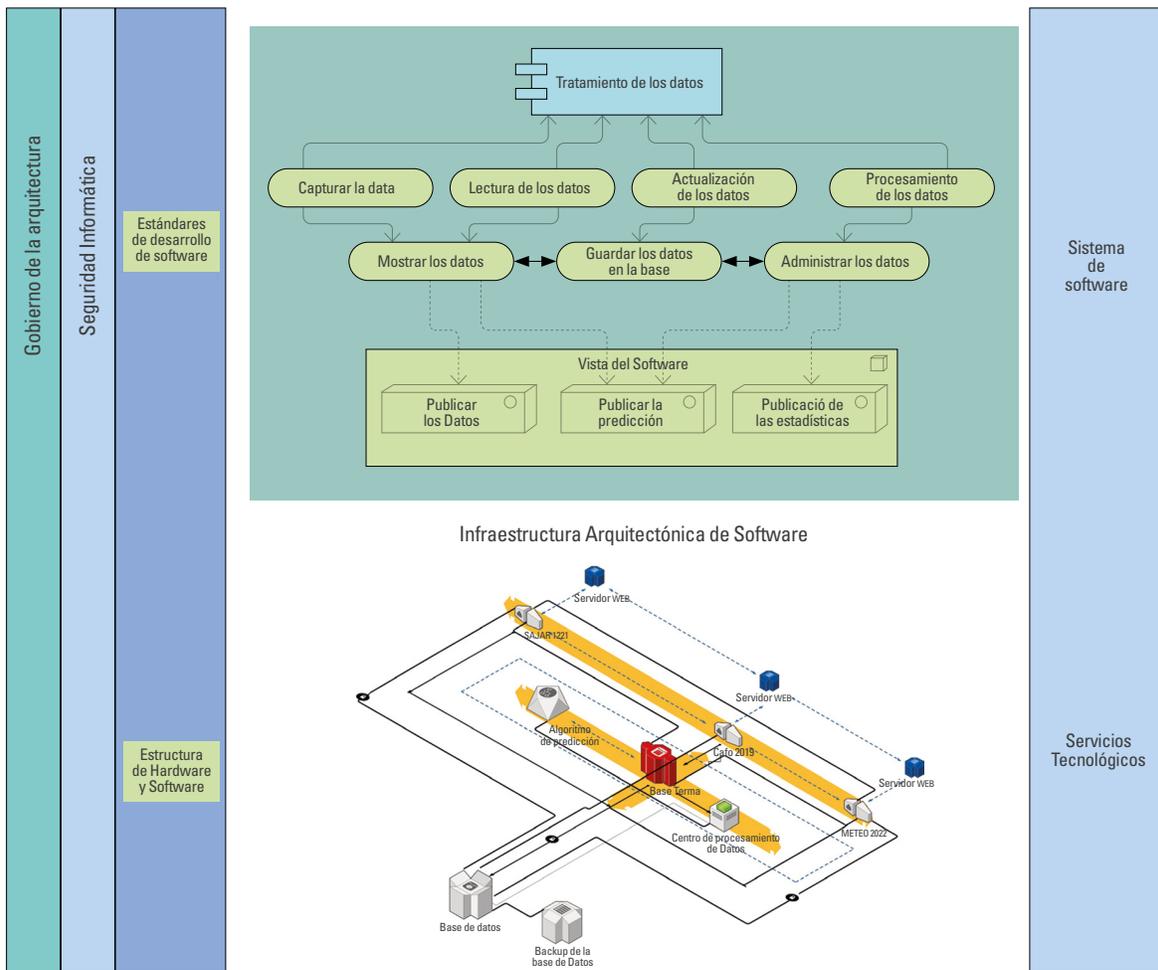


Figura 7. Diagrama de arquitectura final  
Fuente: elaboración propia.

En conclusión, se realizó un estudio intensivo de diferentes patrones arquitectónicos, incluyendo un modelo inicial de arquitectura en capas. Sin embargo, tras evaluar las ventajas y desventajas de cada opción, se optó por utilizar el patrón de microservicios debido a su idoneidad para cumplir con los requisitos de escalabilidad, modularidad y mantenibilidad del proyecto. Este enfoque permitió una mayor flexibilidad en el diseño y desarrollo del sistema, brindando una arquitectura robusta y adaptada a las necesidades específicas del monitoreo y la predicción de incendios forestales mediante picosatélites en un sistema descentralizado.

## Implementación del patrón arquitectónico

En el marco de este proyecto, se ha realizado un exhaustivo análisis para identificar el patrón arquitectónico más adecuado, y se ha determinado que el enfoque de microservicios es el más apropiado para alcanzar los objetivos planteados. Este patrón arquitectónico permite una descentralización completa del sistema, donde cada nodo desempeña un papel específico y se comunica eficientemente con otros nodos.

El uso de microservicios en los CanSat implica que cada uno de ellos cumple funciones clave y establece conexiones con otros nodos de forma efectiva. Estas conexiones no solo se limitan a la transferencia de datos, sino que también facilitan la interacción con otros componentes esenciales, como la base terrena y la base de datos.

La adopción de esta arquitectura promueve una mayor interconexión entre los nodos, lo cual contribuye a satisfacer los atributos de calidad establecidos para el proyecto, como la seguridad, la escalabilidad y la disponibilidad. Los microservicios permiten un diseño modular y flexible, donde cada componente tiene la capacidad de escalar de forma independiente según las necesidades específicas, garantizando así la disponibilidad y el rendimiento óptimo del sistema.

Además, la arquitectura de microservicios facilita la implementación de medidas de seguridad en cada uno de los servicios. Esto asegura que la comunicación y los datos se mantengan protegidos en todo momento, algo crucial para la integridad y confidencialidad de la información recopilada y transmitida por los CanSats. Por ende, se muestra en la Figura 8 cómo sería la implementación del *software* con la arquitectura de microservicios.

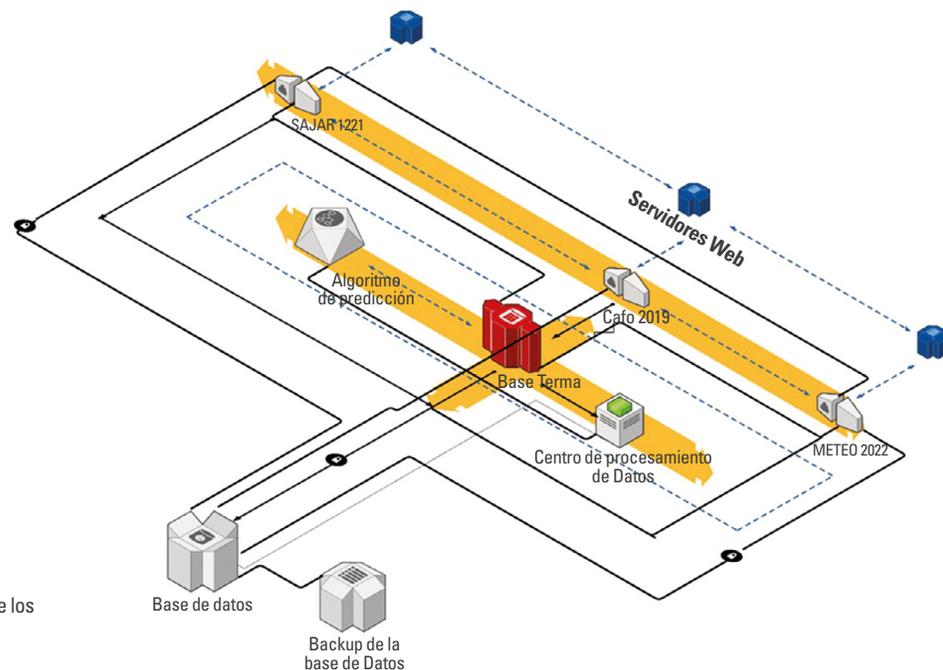


Figura 8. Diseño arquitectónico de los componentes de microservicios

Fuente: elaboración propia.

## Discusión

Los sistemas descentralizados brindan una oportunidad única para esta investigación, ya que presentan fortalezas notables en términos de seguridad, escalabilidad y disponibilidad. Tales características demuestran su capacidad de implementación en diversos contextos, ya que permiten administrar de manera eficiente las dependencias y establecer conexiones entre los nodos para lograr un flujo de datos óptimo en tiempo real, especialmente en situaciones críticas como los incendios forestales.

Al analizar el sistema descentralizado y su implementación utilizando los CanSats, y con base en el enfoque de microservicios, se evidencia una escalabilidad independiente de la tecnología utilizada. Esto significa que el sistema puede adaptarse y crecer sin inconvenientes, sin importar los cambios o las actualizaciones en los componentes tecnológicos. Además, la transmisión de datos a través de la conexión entre nodos garantiza la integridad de la información, lo cual refuerza la idoneidad de este enfoque para el proyecto en cuestión.

La implementación de un sistema descentralizado basado en microservicios implica una planificación cuidadosa de la estructura y la comunicación entre los nodos. La distribución de las tareas y la asignación de roles específicos a cada nodo permiten una coordinación eficiente y una interacción fluida entre los diferentes componentes del sistema. Esta arquitectura modular también facilita la implementación de medidas de seguridad en cada uno de los servicios, lo cual contribuye a proteger la comunicación y los datos en todo momento.

Es importante destacar que el enfoque descentralizado y basado en microservicios no solo ofrece beneficios técnicos, sino que también se alinea con los objetivos del proyecto en términos de monitoreo y predicción de incendios forestales. La capacidad de respuesta en tiempo real y la capacidad de procesamiento distribuido permiten una mayor eficacia en la recolección y el análisis de datos, lo que a su vez

mejora la toma de decisiones y las acciones preventivas frente a los incendios forestales.

## Conclusiones

El presente proyecto ha logrado cumplir con el objetivo de orientar la toma de decisiones oportuna para comenzar la lucha contra los incendios forestales mediante la usabilidad de los picosatélites. Esto ha permitido establecer un sistema descentralizado que cumple con los requisitos fundamentales de disponibilidad, escalabilidad y seguridad, abordando de manera efectiva la problemática de los incendios forestales.

La implementación de un sistema descentralizado ha demostrado ser beneficiosa en varios aspectos. En primer lugar, está la distribución de los nodos y la descentralización de las tareas, que han mejorado el manejo de recursos del sistema al evitar puntos únicos de falla y permitir una mayor redundancia. En segundo lugar, la escalabilidad del sistema se ha logrado de manera independiente de la tecnología utilizada, lo que garantiza que el sistema pueda crecer y adaptarse a medida que se requiera sin limitaciones significativas.

En cuanto a la disponibilidad, la arquitectura descentralizada ha proporcionado un entorno propicio para implementar medidas de comunicación en cada uno de los nodos y servicios. Esto ha contribuido a salvaguardar la integridad de la comunicación y los datos, lo cual resulta esencial en un proyecto que involucra la recopilación y el procesamiento de información sensible relacionada con incendios forestales.

La adopción de un enfoque arquitectónico descentralizado ha sido fundamental para el éxito de este proyecto. La combinación de disponibilidad, escalabilidad y seguridad ha permitido abordar eficazmente los desafíos asociados con los incendios forestales y proporcionar una plataforma robusta para la toma de decisiones basada en datos precisos y actualizados. Este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones y aplicaciones en el campo del monitoreo y la

predicción de incendios forestales, brindando una solución innovadora y efectiva para proteger nuestros recursos naturales.

## Referencias

- 330ohms. (2016, marzo 2). ¿Qué es una protoboard? [en línea]. <https://tinyurl.com/2sf3td7t>
- APD. (2024, abril 9). *Cómo aplicar la metodología SCRUM* y qué es el método SCRUM [en línea]. <https://tinyurl.com/3d5na2by>
- Beningo, J. (2020, enero 21). *Cómo seleccionar y usar el módulo ESP32 con Wi-Fi/Bluetooth adecuado para una aplicación de IoT industrial*. DigiKey [en línea]. <https://tinyurl.com/mtw5ta2p>
- Buitrago, P., Camacho-Briñez, R., Tejada, J. C., Marmolejo, P. y Jaramillo, Ó. A. (2019). Diseño de un CanSat para medición de variables ambientales. *Publicaciones e Investigación*, 13(5). <https://doi.org/10.22490/25394088.3468>
- Cagua-Colmenares, K. T. y Vinche-Hernández, A. T. (2022). *Construcción de un CanSat para la medición de temperatura, presión atmosférica y altitud* (trabajo de grado, Fundación Universitaria Los Libertadores). Repositorio institucional. <https://tinyurl.com/yc4hbpwn>
- Fernández, Y. (2022, septiembre 23). *Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno* [en línea]. <https://tinyurl.com/mus3zusu>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (s. f.). *Zonificación del riesgo a incendios* [en línea]. <https://tinyurl.com/mt5dxprs>
- Jiménez, J. (2022, enero 15). *En qué consiste una red descentralizada y qué ventajas tiene*. Redes Zone [en línea]. <https://tinyurl.com/2uc6c7nu>
- Leantec.es (2015, abril 25). *Tutorial Arduino: Módulo GPS GPS6MV2* [en línea]. <https://tinyurl.com/mseeahmm>
- Naylamp Mechatronics. (s. f.). *Sensor de presión BMP180* [en línea]. <https://tinyurl.com/tmbewd6f>
- Naylamp Mechatronics. (2016). *Tutorial MPU6050, acelerómetro y giroscopio* [en línea]. <https://tinyurl.com/3wx77rux>
- PalcoElectronica. (s. f.). *Módulos sensores MQ* [en línea]. <https://tinyurl.com/2e4uuex5>
- Quisilema-Carrera, E. W. (2022). *Metodología para pruebas dinámicas de la protección de distancia en dispositivos electrónicos inteligentes, aplicación al sistema nacional de transmisión* (tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional). Repositorio institucional EPN. <https://tinyurl.com/yfmcvm5c>
- Raeburn, A. (2022, agosto 25). *Qué es product backlog y guía para hacer uno con ejemplo*. Asana [en línea]. <https://tinyurl.com/dp528zux>
- Rocha-Garrido, G. (2022, febrero 15). *Burndown Chart (SCRUM): qué es, cómo hacer uno y ejemplos* [en línea]. <https://tinyurl.com/mrx7mwwa>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020, diciembre 20). *Manual de usuario del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF) de México*. <https://tinyurl.com/2n54kebj>
- Shamkhalichenar, H. Bueche, C. J. y Choi, J.-W. (2020). *Printed Circuit Board (PCB) Technology for Electrochemical Sensors and Sensing Platforms*. *Biosensors*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/bios10110159>

# Vigilancia tecnológica para la construcción de un equipo de almacenamiento y transporte de misiles

| Fecha de recibido: 17 de junio 2023 | Fecha de aprobado: 17 de abril 2024 |

| Reception date: June 17, 2023 | Approval date: April 17, 2024 |

| Data de recebimento: 17 de junho de 2023 | Data de aprovação: 17 de abril de 2024 |

## Abdon Estibenson Uribe Taborda

<https://orcid.org/0000-0003-4058-4365>  
abdon.uribe@fac.mil.co

Magíster en Seguridad Operacional  
Investigador – Escuela de Postgrados Fuerza  
Aérea Colombiana, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales  
GIEA, y CELSO de la EPFAC

Master's Degree in Operational Safety  
Researcher – Colombian Air Force Graduate School, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing  
Aerospace Studies Research Group GIEA,  
and CELSO of the EPFAC

Mestrado em Segurança Operacional  
Investigador – Escola de Pós-Graduação da Força  
Aérea Colombiana, Colômbia  
Papal do investigador: teórico e escrito  
Grupo de Investigação em Estudos Aeroespaciais  
GIEA, e CELSO da EPFAC

## Diego Alexander Muñoz Morales

<https://orcid.org/0009-0007-4027-5606>  
juandaniego@gmail.com

Ingeniero de Productividad y Calidad  
Investigador – Corporación Clúster Aeroespacial  
Colombiano CAESCOL, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura

Productivity and Quality Engineer  
Researcher – Colombian Aerospace Cluster  
Corporation CAESCOL, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing

Engenheiro de Produtividade e Qualidade  
Investigador – Corporação do Cluster Aeroespacial  
da Colômbia CAESCOL, Colômbia  
Função do investigador: teórica e escrita

**Cómo citar este artículo:** Uribe Taborda, A. E., y Muñoz Morales, D. A. (2024). Vigilancia tecnológica para la construcción de un equipo de almacenamiento y transporte de misiles. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 95-111. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderareero.824>



## Vigilancia tecnológica para la construcción de un equipo de almacenamiento y transporte de misiles

## Technology watch for the construction of missile storage and transport equipment

## Vigilância tecnológica para a construção de equipamento de armazenamento e transporte de mísseis

**Resumen:** Con el presente artículo, se detalla la búsqueda sistemática y organizada mediante la consulta de importantes bases de datos bibliográficas, como Web of Science, Scopus, Google Academic y Science Direct, y la lectura de textos seleccionados, con el fin de identificar las tecnologías utilizadas para el proceso de almacenamiento y transporte de misiles de uso militar, así como los principales proveedores o fabricantes de este tipo de equipamiento. Se cita un compilado de patentes e imágenes de dichos sistemas que describen especificaciones técnicas como: peso, capacidad de carga, funciones específicas, tipo de mecanismo y tipo de armamento para el que fue diseñado, etc. El artículo también ilustra las capacidades que posee la industria local para diseñar tecnología que supla necesidades con altos estándares de calidad, basados en una serie de equipos y tecnologías que ofrecen respecto a *cuáles son los principales fabricantes de sistemas de almacenamiento, tipos de equipos utilizados, así como toda la información que sirvió de base para desarrollar un prototipo funcional de almacenamiento y transporte tipo Shelter que se acople a las necesidades puntuales de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, específicamente para la flota del AH60L (Black Hawk).*

**Palabras clave:** aeronave; arma; cohete; equipo de transporte; equipo terrestre de apoyo aeronáutico; misil; misil aéreo; munición; prototipo funcional; Shelter.

**Abstract:** This article details the systematic and organized search through the consultation of important bibliographic databases, such as Web of Science, Scopus, Google Academic and Science Direct, and the reading of selected texts, in order to identify the technologies used for the process of storage and transport of missiles for military use, as well as the main suppliers or manufacturers of this type of equipment. A compilation of patents and images of such systems is cited, describing technical specifications such as: weight, load capacity, specific functions, type of mechanism and type of armament for which it was designed, etc. The article also illustrates the capabilities of the local industry to design technology that meets the needs with high quality standards, based on a series of equipment and technologies that offer the main manufacturers of storage systems, types of equipment used, as well as all the information that served as a basis for developing a functional prototype of storage and transport Shelter type that fits the specific needs of the Colombian Aerospace Force, specifically for the fleet of AH60L (Black Hawk).

**Keywords:** Aircraft; weapon; rocket; transport equipment; aeronautical support ground equipment; missile; air missile; ammunition; functional prototype; Shelter.

**Resumo:** Este artigo detalha a pesquisa sistemática e organizada por meio da consulta a importantes bases de dados bibliográficos, como Web of Science, Scopus, Google Acadêmico e Science Direct, e a leitura de textos selecionados, com o objetivo de identificar as tecnologias utilizadas para o processo de armazenamento e transporte de mísseis de uso militar, bem como os principais fornecedores ou fabricantes desse tipo de equipamento. É citada uma compilação de patentes e imagens de tais sistemas, descrevendo especificações técnicas como: peso, capacidade de carga, funções específicas, tipo de mecanismo e tipo de armamento para o qual foi projetado, etc. O artigo também ilustra a capacidade da indústria local de projetar tecnologia que atenda às necessidades com altos padrões de qualidade, com base em uma série de equipamentos e tecnologias oferecidas pelos principais fabricantes de sistemas de armazenamento, tipos de equipamentos utilizados, bem como todas as informações que serviram de base para o desenvolvimento de um protótipo funcional de armazenamento e transporte do tipo Shelter que se adapte às necessidades específicas da Força Aeroespacial Colombiana, especificamente para a frota de AH60L (Black Hawk).

**Palavras-chave:** Aeronave; arma; foguete; equipamento de transporte; equipamento terrestre de apoio aeronáutico; míssil; míssil aéreo; munição; protótipo funcional; Shelter.

## Introducción

Los contenedores de uso militar para el transporte permiten movilizar diferentes materiales desde un punto determinado hasta un área de interés donde logran ampliar la gama de sostenibilidad y conservación. De hecho, la munición es uno de los materiales más críticos para transportar dadas unas características muy particulares que pueden, en muchos casos, ser causantes de dificultades como, por ejemplo, la forma irregular, el alto peso y la explosividad.

De ahí que se hayan desarrollado diversos equipos de almacenamiento y transporte de municiones que permiten ampliar el rango de operación de las aeronaves de combate. Dichos equipos proporcionan convencionalmente un sistema (conservación, provisión, *stock*, etc.) que se despliega para soportar las necesidades de consumo de armamento aéreo en un ambiente de operaciones.

Es importante comprender que las aeronaves militares requieren puntos de abastecimiento de municiones y explosivos para mantener su capacidad operativa. Por lo general, se busca que este abastecimiento sea cercano y optimice el tiempo de respuesta.

A su vez, el material de guerra requiere unas condiciones ideales para su transporte y almacenamiento. Con este propósito, se han desarrollado contenedores que buscan la protección y el fácil envío del material a través de vehículos vía terrestre o aérea. Por ende, los equipos que se encuentran a nivel internacional están en servicio en muchos países y en desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas que mejoren su funcionamiento y sus características de almacenamiento, protección y carga.

Por otro lado, dadas las cambiantes condiciones geopolíticas mundiales y la experiencia de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) durante los años anteriores, aparece la necesidad de aumentar la capacidad de respuesta de las unidades militares ante posibles amenazas. El presente artículo, además, plantea una síntesis del proceso de diseño y fabricación de un prototipo funcional de un sistema de transporte **tipo Shelter** para la familia de misiles SPIKE NLOS, con lo

cual se acondiciona un sistema de apoyo que garantice condiciones de seguridad en el transporte, almacenamiento y despliegue de los equipos en cualquier localización geográfica del territorio colombiano.

En general, se busca innovar progresivamente el proceso actual de transporte y almacenamiento de los misiles del equipo AH60L Black Hawk Arpía IV, como aeronave estratégica para proteger la soberanía de Colombia. Se busca de manera rigurosa desarrollar un módulo estándar para el transporte de misiles de la FAC por vía aérea, marítima y terrestre para el aumento de la eficiencia en las operaciones militares.

Hecha esta contextualización, el presente artículo, que detalla inicialmente un proceso de vigilancia tecnológica, hace una revisión del desarrollo de tecnologías para la manipulación y el transporte de municiones. Se implementa la metodología de ruta crítica e inicia con la recolección de información primaria de los diferentes escenarios de operación en los que es requerido el armamento misil SPIKE NLOS, poniendo en contexto el proceso actual de su transporte, y finaliza con la fabricación de un módulo (prototipo funcional) que permita ser transportado eficientemente a través de los tres ecosistemas requeridos (aéreo, terrestre y marítimo).

## Problema de investigación

El transporte de municiones y armamento aéreo se rige por las recomendaciones de las casas fabricantes y las regulaciones establecidas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Tradicionalmente, los sistemas de seguridad se envían en contenedores amortiguados; algunos de ellos son contenedores especiales y herméticos para proteger los sistemas de los cambios de temperatura y humedad.

Sistemas de almacenamiento de este tipo existen en el mercado, pero lo que se pretende al desarrollar y fabricar equipo ETAA (Equipo Terrestre de Apoyo Aeronáutico) es mejorar especificaciones de diseño y función en relación costo-beneficio. Hay unidades similares que comercialmente oscilan entre sesenta y

cinco mil (USD 65.000) y noventa mil (USD 90.000) dólares para aplicaciones afines. Cabe anotar que ajustar las características de equipos comerciales a las necesidades propias incrementa sus costos de fabricación e importación.

En Colombia, el transporte de armamento aéreo se realiza vía terrestre o aérea. Para el caso terrestre, el transporte se realiza disponiendo los misiles en el empaque de fabricante (caja de madera) dentro de contenedores metálicos, usados tradicionalmente para transporte de mercancías; en el caso de transporte aéreo, los misiles se movilizan en su empaque original. En ambos casos, los misiles se transportan y almacenan en condiciones que comprometen su integridad, ya que se someten a condiciones ambientales desfavorables y a vibraciones mecánicas que pueden causar fallas en sus sistemas control.

Los misiles en su empaque original (cánister) contienen un motor de cohete de combustible sólido, carga explosiva, sistema de comunicación con el operador, sistema de cámara especializada, sistema de transmisión de imágenes en tiempo real y sistema de control de vuelo, todos compuestos por equipo electrónico sensible a vibraciones, cambios de humedad y cambios de temperatura. Para la manipulación de estos equipos, se deben utilizar varios técnicos debido al peso de los misiles, ya que en su empaque original para manipulación, almacenamiento y transporte (caja de madera) cada equipo alcanza un peso de 110 kg, mientras que el equipo individual (misil con cánister) tiene un peso de 150lb (75 kg) (ver figura 1).

Es de resaltar que el despliegue de dicho armamento en aeronaves UH60 Black Hawk Arpía IV requiere el proceso de transporte y manipulación de los misiles a las áreas de operación en cualquier base del territorio nacional, donde suelen ser instalados en las configuraciones requeridas por las áreas operacionales. Esto genera un alto riesgo para los equipos debido a posibles golpes o impactos por caídas y/o desfavorables condiciones ambientales en su almacenamiento. Cabe ampliar que cualquier impacto por caída súbita de alturas superiores a cincuenta centímetros (50 cm) puede generar la pérdida de la calibración de los sistemas de ubicación satelital y de navegación del material

de guerra, lo cual deriva en costos adicionales dado que los equipos deben ser verificados por el fabricante para validar su integridad y operatividad.

La necesidad de este equipo especializado en transporte y almacenamiento tipo Shelter para los misiles SPIKE NLOS radica en los exigentes requerimientos técnicos del fabricante<sup>1</sup> en cuanto a condiciones ambientales y manipulación de los misiles, los cuales garantizan las condiciones de operación de las municiones sobre cualquier territorio de la geografía nacional.



Figura 1. Misil SPIKE; cánister y caja de madera para manipulación, transporte y almacenamiento de la munición

Fuente: elaboración propia.



Figura 2. Equipos usados para transporte de municiones

Fuente: elaboración propia.

<sup>1</sup> Manual reservado c6hxxx50a de octubre de 2015, el cual es la guía primaria para embalaje, manipulación almacenamiento y transporte de misiles aire tierra, y el manual reservado TM91XXXX46013&P para mantenimiento, cuidados y prácticas estándar generales en sistemas de lanzamiento de *rockets* (Rafael Advanced Defense Systems, 2015).

En el proceso de transporte y despliegue de estos equipos, generalmente se usan vehículos o plataformas no adaptados a las geometrías de sus cajas, lo que dificulta la sujeción y protección de los equipos. Tales situaciones son más complejas en las bases aéreas donde son desplegados los misiles, debido a que algunas no poseen plataformas de maniobras para aeronaves o superficies asfaltadas que permitan el acercamiento de los vehículos o las plataformas de transporte. Algunos de los equipos utilizados en el transporte pueden visualizarse en la figura 2.

El presente artículo describe cómo se resolvió una necesidad puntual de la FAC, proponiendo el diseño y la fabricación de un equipo de manipulación y transporte para los misiles SPIKE que permita mantener condiciones ambientales favorables y con geometrías ajustadas a las dimensiones de los equipos, en busca de asegurarlos y transportarlos de forma segura. En general, el desarrollo tecnológico busca innovar progresivamente el proceso actual de transporte y almacenamiento de los misiles del equipo AH60L Black Hawk Arpía IV, como aeronave estratégica para proteger la soberanía de Colombia.

De esta manera, se formuló la siguiente pregunta de investigación: ¿es posible diseñar y fabricar un sistema tipo Shelter para el almacenamiento y el transporte de los misiles SPIKE, de tal forma que se garantice la integridad y seguridad de dichos misiles, conservando la salud en el trabajo e incrementando la eficiencia operacional?

## Estado del arte

Según Siva-Krishna *et al.*:

Los misiles son máquinas robustas y bien construidas, pero debido a su tamaño, peso y volumen, no son tan fáciles de manejar ni son indestructibles. La mayoría de los daños de los misiles son, lamentablemente, el resultado de un descuido y malas prácticas de manejo. Para reducir la posibilidad de daños, los misiles se envían, almacenan y manipulan con equipos

especiales. Los contenedores, botes y equipos de manipulación aprobados proporcionan la máxima seguridad de misiles con una manipulación mínima por parte del personal. (2012)

En el transporte de armamento y en especial el transporte de misiles, son muchos los factores a considerar. Según Wang, “los riesgos del transporte de contenedores de misiles se dividen en cuatro categorías: factores mecánicos, factores ambientales, factores químicos y factores biológicos” (2016). Desde su salida de la fábrica hasta el envío al lugar designado, el proceso de transporte de misiles incluye carga y descarga, almacenamiento, transporte y uso, además de consideraciones importantes como cambios de temperatura, humedad, radiación solar, viento y contenido de oxígeno dentro de su empaque.

Siva-Krishna *et al.*: a su vez indica que “los contratistas de defensa amplían el concepto de sistemas de armas extremadamente móviles que cumplen con las restricciones de dimensiones y peso de los contenedores de envío ordinarios” (2019). Acorde a las conclusiones de Srinivasulu y Mamilla:

[...] el contenedor de misiles está hecho de una estructura de carcasa compuesta reforzada con nervaduras rectangulares en la superficie interior. Para reducir la posibilidad de daños, los misiles se envían, almacenan y manipulan con contenedores de misiles aprobados los cuales brindan máxima seguridad a los misiles con una manipulación mínima por parte del personal. Esto hace que el diseño y la fabricación de contenedores de misiles sean de vital importancia. También se identifica que el contenedor de misiles está sujeto a carga de presión interna, carga de apilamiento, carga de frenado y carga de elevación. (2017)

En referencia al deterioro del sistema de armamento en el almacenamiento de misiles, Zhang *et al.* describen a manera de ejemplo:

[...] un sistema de armas de misiles antes de ser lanzado, con un tiempo de almacenamiento extremadamente largo, puede experimentar diferentes estados

de trabajo que involucran almacenamiento, transporte, inspecciones y mantenimiento durante su servicio. Los estudios han demostrado que, debido a las influencias de la temperatura, la humedad y los factores humanos en las condiciones de almacenamiento, el rendimiento de los giroscopios instalados en el armamento, exhiben tendencias decrecientes después de algún tiempo de almacenamiento. (2015)

A nivel internacional, en el marco del transporte de sistemas de armamento, se referencia el documento de las Naciones Unidas denominado “Norma / Directriz de micro desarme regional de Europa Sudoriental y Oriental (RMDS/G)”, emitido por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD):

No existen reglamentos o códigos de prácticas internacionales específicos que se relacionen directamente con el almacenamiento seguro de municiones y explosivos. Sin embargo, las alianzas internacionales sí cuentan con literatura consolidada que cubre esta área técnica. Un excelente ejemplo son las Publicaciones 1 y 2 de Almacenamiento y Transporte de Municiones Aliadas de la OTAN (AASTP 1 y 2): Principios de seguridad para el almacenamiento y transporte de municiones militares y explosivos. (United Nations, 2011)

Según la publicación no clasificada de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN): “El uso de contenedores de carga es cada vez más común en todos los modos de transporte. Una ventaja del transporte por contenedor es que las cargas se pueden transferir de un modo de transporte a otro sin recargas intermedias evitando así daños a la carga” (NATO, 2005).

El sistema de armamento SPIKE “está siendo utilizado por 34 países de todo el mundo donde son utilizados por ejércitos en varias plataformas de sistemas navales y terrestres” (Hashomer, 23 de junio de 2020). As su vez, al año 2020, “se han suministrado más de 33.000 cartuchos y se han integrado en 45 plataformas diferentes, que incluyen helicópteros de ataque,

vehículos terrestres, buques de guerra y más” (Hashomer, 23 de junio de 2020).

Colombia cuenta con “Misiles SPIKE-LR/ER y SPIKE-NLOS para helicópteros UH-60 modernizados a Arpía-4” (Stockholm International Peace Research Institute [SIPRI], 2021). Así mismo:

La Fuerza Aérea Colombiana (FAC) ha incorporado en sus helicópteros de ataque del tipo Sikorsky AH-60L Arpía-IV, dentro del proceso de modernización y conversión de plataformas Arpía, que actualmente se encuentran desplegadas en el Comando Aéreo de Combate CACOM 5. (Saumeth, 23 de abril de 2018)

Actualmente, el proceso para transportar e instalar los misiles SPIKE se realiza por personal técnico de la FAC. Los misiles son transportados a las zonas de operación vía terrestre o aérea. En el transporte terrestre, los misiles se transportan dentro de un contenedor metálico utilizado para transporte de mercancías. Ubicados en las zonas de operación, los contenedores son emplazados generalmente en zonas expuestas a los elementos, sometiendo los misiles a condiciones ambientales desfavorables que ponen en riesgo su operación. En el caso de transporte aéreo, los misiles son transportados en sus empaques originales (cajas de madera), los cuales se ubican y aseguran en el interior de las aeronaves para ser transportados hasta la zona de operación. Al igual que el transporte terrestre, al llegar a las zonas de operación, los misiles se ven expuestos a condiciones ambientales desfavorables que ponen en riesgo los sistemas de control de los misiles.

El problema central detectado, en el proceso de transporte y almacenamiento de los misiles en zonas de operación, es la exposición a condiciones ambientales desfavorables, las cuales comprometen el normal funcionamiento de los sistemas y subsistemas del equipo misil SPIKE. Estas variaciones de humedad y temperatura pueden afectar operaciones militares estratégicas. Equipos especializados para transporte y almacenamiento de sistemas de armamento se pueden observar en la tabla 1.

**Tabla 1.**  
Equipos especializados para transporte y almacenamiento de equipos militares

Nombre / Referencia	Imágenes de equipos especializados para transporte y almacenamiento de municiones
Cargo Trailers (Voss, 22 de junio de 2010)	
Military Packaging (GWP Group, 2021)	
Missions Applications (GWP Group, 2021)	
Transport And Storage Solutions (Varley, s. f.)	
Bombs Container (Johnson, 24 de abril de 2015)	

Fuente: elaboración propia.

Equipos similares pueden referenciarse en documentos como el manual técnico: *Transportability Guidance: Redeye Air Defense Guided Missile System*, en el cual se “proporciona una guía de transportabilidad para el manejo logístico y el movimiento de los principales artículos finales que comprenden el misil guiado de defensa aérea Redeye” (Department of the Army of the United States, 1989).

Tras realizar un proceso previo de vigilancia tecnológica, se encuentran equipos similares destinados a otras labores de transporte y almacenamiento, que podrían ser el punto de partida para el equipo que se va a desarrollar (ver tabla 2).

**Tabla 2.**  
Fabricantes de equipos de transporte y almacenamiento de equipos militares

Fabricante / Referencia	Imágenes de equipos tipo Shelter de uso militar
KF Mobile Systems (KF Mobile Systems, 15 de marzo de 2019)	
Wenzlau Engineering (Wenzlau Engineering, s. f.)	
Ellis & Watts Global Industries (Ellis & Watts, s. f.)	
Mistral Inc. (Mistral Inc., s. f.)	

Continúa

Fabricante / Referencia	Imágenes de equipos tipo Shelter de uso militar
General Dynamics (General Dynamics, s. f.)	
SIAG OMC (Army Technology, 3 de marzo de 2011)	
Clegg Industries Inc. (Clegg Industries Inc., s. f.)	
Zeppelin Mobile Systeme GmbH (Military Systems & Technology, s. f.)	
KF Mobile Systems (KF Mobile Systems, s. f.)	

Fuente: elaboración propia.

Entre los resultados de la vigilancia tecnológica, se enfatizó el análisis de tendencia anual de publicación de patentes, los líderes (países y empresas) de estas tecnologías y las principales líneas de desarrollo (representados en los códigos IPC). Mediante esta estrategia de búsqueda, fue posible realizar un análisis general de tendencias e identificar manualmente las patentes que por su contenido técnico se asociaron a

tecnologías relacionadas con equipos para transportar y almacenar misiles. Los resultados generales obtenidos de la consulta se ilustran en la figura 3.

Countries	Applicants	Inventors	IPC code	Publication Dates
Russian Federation	25 MBDA ITALIA SPA	2 ASTE GIOVANNI	2 F41F 24	2012 1
United States of American	4 AIRBUS	1 CIANCHETTINI MASSIMO	2 F41A 6	2013 2
Germany	4 BRUEGGEMANN AND BRAND KG	1 ABEL ALFRED	5 F42B 4	2014 2
European Patent Office	3 CHS	1 CATTEUW BERNARD	4 B64D 3	2015 0
China	3 SPEZIAL CONTAINER SHELTER AND ENGINEERING GMBH	1 CROWLEY DAVID R.	3 F41G 2	2016 4
France	2 GRAMBEIER MICHAEL	1 DONG CHUXU	1 B60P 1	2017 3
United Kingdom	2 HUBEI SANJIANG SPACE WANFENG TECH DEVELOPMENT COLTD	1 DRAGANI TEODORO	1 B63C 1	2018 4
	1 INNER MONGOLIA FIRST MACHINERY GROUP CO	1 DRAGANI TEODORO ANDREA	1 B64G 1	
	1 KRAUSS MAFFEI WEGMANN GMBH AND C	1 FILIPPOV VALERIJ VIKTOROVICH [RU]	1	
	1 LORAL VOUGHT SYSTEMS CO	1 FISCHER MANFRED	1	

Figura 3. Resultados de la búsqueda en PatentScope

Fuente: Adaptado de World Intellectual Property Organization (WIPO, 2021).

Acorde a la clasificación internacional de patentes, o International Patent Classification (IPC), se obtuvieron las áreas de desarrollo tecnológico más destacadas en las patentes relacionadas con la fabricación de equipos para el transporte y almacenamiento de municiones. Entre los códigos IPC destacados, encontramos:

- **IPC code F41F:** 92 patentes; apparatus for launching projectiles or missiles from barrels, e.g. cannons (Smallarms F41c); launchers for rockets or torpedoes; harpoon guns.
- **IPC code F41A:** 84 patentes; functional features or details common to both smallarms and ordnance, e.g. cannons; mountings for smallarms or ordnance.
- **IPC code F42B:** 84 patentes; explosive charges, e.g. for blasting; fireworks; ammunition.

- **IPC code B64D:** 4 patentes; equipment for fitting in or to aircraft; flying suits; parachutes; arrangements or mounting of power plants or propulsion transmissions in aircraft.
- **IPC code F41G:** 3 patentes; weapon sights; aiming.
- **IPC code F41H:** 2 patentes; armour; armoured turrets; armoured or armed vehicles; means of attack or defence, e.g. camouflage, in general.
- **IPC code B60P:** 1 patente; vehicles adapted for load transportation or to transport, to carry, or to comprise special loads or objects.
- **IPC code B60R:** 1 patente; vehicles, vehicle fittings, or vehicle parts, not otherwise provided for.
- **IPC code B63C:** 1 patente; equipment forming part of, or attachable to, vessels, facilitating transport over land (harnesses attachable to vessels for personal carrying A45F; amphibious craft, land vehicles convertible for use on water B60F; land vehicles for carrying boats B60P).

## Metodología aplicada para el desarrollo tecnológico

El conjunto de acciones a realizar en este proceso implicó la coordinación de personas y recursos, y la gestión de la participación de las partes interesadas, así como la integración y realización de las actividades detalladas en el cronograma. Las acciones a implementar fueron:

- a. Recopilar información primaria: Esta recopilación se hizo a través de visitas de campo y reuniones entre el equipo conformado por los ingenieros del comité interclúster y los técnicos del grupo de Armamento Aéreo del CACOM 5, que sirvieron de entrada para el desarrollo y la definición del diseño del equipo a fabricar.
- b. Elaboración de bocetos a mano alzada de las posibles soluciones de fabricación acorde a los requerimientos y las necesidades técnicas.
- c. Selección y aprobación del diseño a desarrollar y fabricar por parte del equipo técnico.

- d. Elaboración de planos de fabricación y ensamble del diseño aprobado en *software* de diseño (CAD).
- e. Elaboración del prototipo funcional. La fabricación del prototipo estuvo a cargo de compañías que hacen parte del aeroclúster y que poseen capacidades técnicas y tecnológicas para su fabricación. La asignación se hizo a través de la dirección técnica del equipo interclúster, con el fin de garantizar la calidad y las especificaciones definidas en los diseños.
- f. Realización de pruebas. Las pruebas de verificación, validación y funcionalidad del equipo desarrollado fueron realizadas por los técnicos del grupo de armamento aéreo del CACOM 5.

## Proceso de Control y Monitoreo:

Esta fase consistió en rastrear, revisar y regular el proceso de desarrollo. Además, identificó las áreas donde se requirieron cambios de acuerdo con el cronograma inicial. Las acciones implementadas fueron:

- a. Reuniones periódicas del equipo de investigadores. Estas reuniones permitieron evidenciar y validar los avances a nivel técnico y administrativo, evaluando el cumplimiento del cronograma y el presupuesto de los desarrollos tecnológicos planteados.
- b. Elaboración de informes técnicos periódicos de avance. Estos informes permitieron cuantificar y ponderar los avances del desarrollo en la línea de tiempo que fue establecida.
- c. Evaluación de resultados con base en los indicadores propuestos.

## Proceso de Cierre:

En esta fase, se realizarán acciones que aseguren que se hayan completado los procesos definidos para alcanzar los objetivos del desarrollo tecnológico. Las acciones a implementar son:

- a. Divulgación del resultado de investigación y desarrollo tecnológico aprendido. La divulgación se

realizará a través de artículo publicado en revista y charlas de socialización de resultados a partes interesadas.

- b. Transferencia de conocimiento. Se realizó a través de investigación y desarrollo colaborativo, en donde participaron funcionarios del GRUTE designados para el proceso e ingenieros asignados por el comité interclúster. La investigación y el desarrollo colaborativo se cristaliza a través de las reuniones o mesas técnicas programadas en el cronograma para aportar al desarrollo, seguimiento y control.
- c. Informe final. Este contiene una descripción del proceso y las evidencias correspondientes a cada etapa.
- d. Entrega final y oficial del desarrollo tecnológico.

## Resultados

A continuación, se realiza una descripción del proceso de diseño y desarrollo del sistema táctico de almacenamiento tipo Shelter para equipo militar equipado con sistemas electromecánicos que tecnifican el uso, la manipulación y el monitoreo por parte del personal en tierra, incrementando con ello la eficiencia y la seguridad operacional.

**Nota:** El desarrollo descrito a continuación es propiedad intelectual de la relación interclúster CAESCOL/CLARE y que contó con el apoyo del “ESARM” Escuadrón de Armamento Aéreo – GRUTE-CACOM 5, quienes, teniendo en cuenta la relación institucional existente, pusieron una necesidad latente y la industria buscó resolverla.

### Contexto general

El equipo Shelter fue desarrollado en el marco del primer proyecto interclúster de Colombia, en relación con el sector aeronáutico, el cual tenía como objeto principal la integración de capacidades técnicas y tecnológicas del aeroclúster de Antioquia/CAESCOL

y el clúster aeronáutico del Eje Cafetero/CLARE, a través del desarrollo de productos/servicios para la aviación civil y militar. Dicho proyecto fue cofinanciado con el programa Clúster Maspro del Ministerio de Comercio en 2022, que trabajó en tres líneas: encadenamiento productivo, desarrollo tecnológico y conexión oferta-demanda.

CAESCOL/Aeroclúster de Antioquia es una corporación sin ánimo de lucro fundada jurídicamente en 2015 por la FAC, empresarios y universidades, entre otras entidades de la región, con el propósito de aportar al desarrollo económico y social del departamento a través de la industria aeronáutica comercial y militar.

CLARE/Clúster aeronáutico del Eje Cafetero fue fundado en 2015 por empresarios y otras entidades de la región, bajo la institucionalidad de la Cámara de Comercio de Dosquebradas, para promover el desarrollo de la industria aeronáutica.

Dichos clústeres hacen parte, a su vez, de la Federación de la Industria Aeroespacial Colombiana (FEDIAC), entidad gremial nacional de la cual hacen parte seis clústeres aeronáuticos que representan a seis regiones del país. Es importante mencionarla, pues gracias a ella los clústeres han venido estableciendo relaciones de confianza para complementar y suplementar capacidades institucionales y tecnológicas, con el propósito de incrementar la competitividad del sector.

### Recolección de información

Con el equipo técnico conformado por oficiales y suboficiales del Grupo Técnico de CACOM 5 de la FAC e ingenieros del grupo interclúster, se realizaron salidas de campo para recopilar información relacionada con el proceso de transporte, manipulación y almacenamiento de polvorines, procesamiento de medidas, validación de datos históricos relacionados a incidentes/accidentes, revisión de manuales, normas y diferentes perspectivas del equipo técnico de la FAC, ello con el fin de iniciar un proceso de ideación o concepto preliminar del diseño.



Figura 4. Recolección de información en campo  
Fuente: elaboración propia.

## Diseños preliminares

De acuerdo con la información suministrada y recopilada en las mesas de trabajo con el personal del grupo técnico de la FAC, los ingenieros del equipo interclúster procedieron a elaborar algunas alternativas o bocetos, como las que se muestran en la Figura 5, a fin de presentarlas a la mesa técnica y elegir un preliminar sobre el cual se comenzará a desarrollar concepto de detalle.

## Proceso de diseño en detalle

Luego de elegir el concepto inicial que más se ajustó a la necesidad técnica y operacional de la FAC, se procede a realizar diseño con nivel de detalle, definiendo planimetría, materiales, procesos de manufactura y servicios especializados, entre otros aspectos que permitieran la realización del prototipo funcional según condiciones definidas por el comité técnico. Para ello,

el diseño se dividió en tres bloques: diseño estructural, diseño de instrumentación y diseño de potencia.

## Diseño estructural

En este bloque, se contempló el detalle y la especificidad en lo relacionado con la estructura del Shelter, para lo cual se tuvieron en cuenta elementos como: cabida arquitectónica, distribución interna, espacio, sistema de almacenamiento, refuerzos estructurales, tornillería, perfilaría, rodamientos, anclajes, puertas de acceso, pivotantes, pintura. Además, se elaboró un informe detallando especificaciones en cuanto a materiales, procesos de manufactura, proveedores, y tratamientos térmicos y superficiales, entre otros aspectos. A continuación, hay una muestra general de los diseños a nivel estructural (ver figuras 6, 7 y 8).



Figura 6. Diseño estructural - Ensamble sistema almacenamiento  
Fuente: elaboración propia.

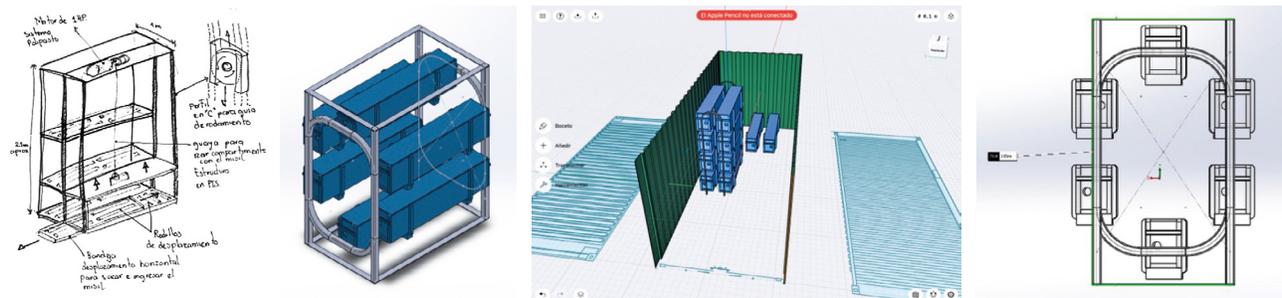


Figura 5. Diseño de bocetos  
Fuente: elaboración propia.

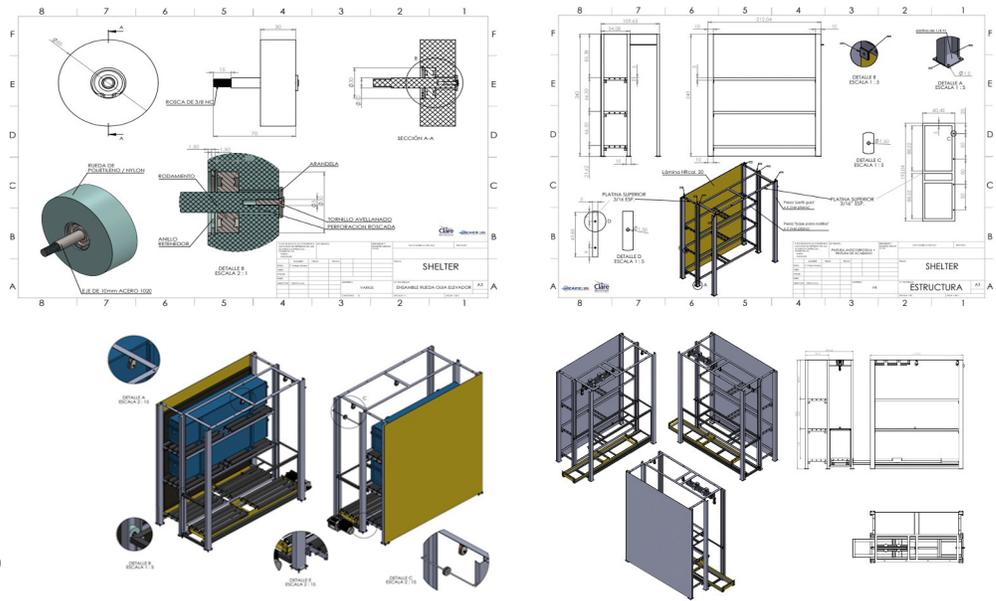


Figura 7. Diseño estructural - Ensamble sistema almacenamiento  
Fuente: elaboración propia.

Además, se diseñó interfaz web para manejo y control desde dispositivo fijo o móvil, con:

- Inicio de sesión por usuario y contraseña.
- Visualización de temperatura y humedad.
- Visualización de inventario.
- Visualización de coordenadas geográficas.

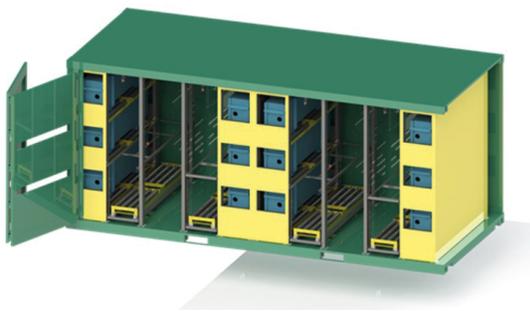


Figura 8. Diseño estructural - Render general Shelter  
Fuente: Elaboración propia

## Diseño del sistema de instrumentación y control

En el bloque de instrumentación y control, se desarrolló el detalle de elementos como los siguientes:

- Sistema de instrumentación para medición de temperatura y humedad interna y externa.
- Interfaz táctil para visualización de variables, control de acceso, iluminación e inventario, señales para iluminación y cerradura eléctrica.
- GPS, conexión red wifi y celular, y envío de datos trazables a través de correo electrónico.

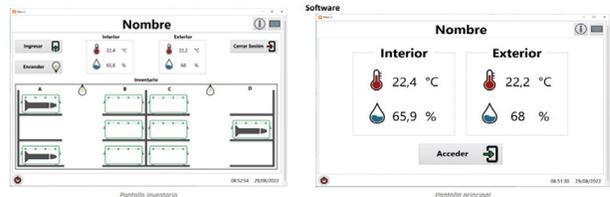
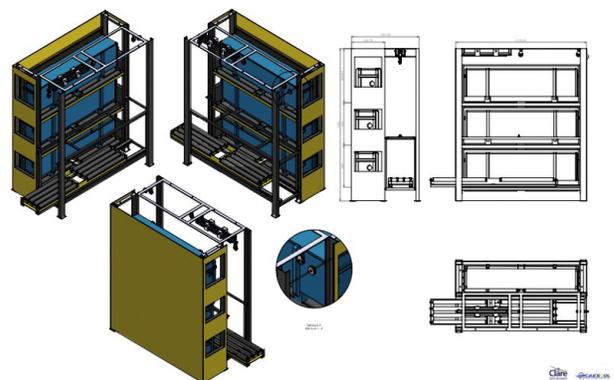


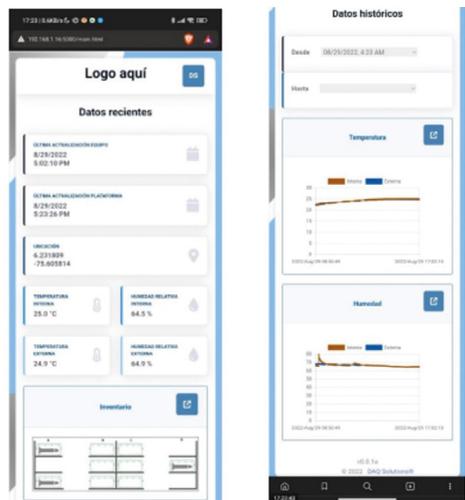
Figura 9. Interfaz táctil de acceso e información variables  
Fuente: elaboración propia.



Visualización histórica de variables



Visualización de inventario y variables



Visualización en dispositivo móvil

Figura 10. Interfaz web desde dispositivo fijo o móvil

Fuente: elaboración propia.

## Diseño sistema de potencia

Teniendo en cuenta todos los elementos del Shelter que requieren energía, se realizó el cálculo de la potencia necesaria para diseñar un diagrama eléctrico para el sistema de abastecimiento. Entre otros elementos se tuvieron en cuenta: aire acondicionado, deshumidificador, iluminación, cerraduras eléctricas, winches eléctricos, sensores y sistema de adquisición de datos.

## Análisis del diseño

Antes de iniciar con procesos de fabricación, se realizaron análisis de cargas axiales laterales, fatiga, etc., a elementos críticos del sistema. En este caso, podemos ver en la figura 11 algunas validaciones realizadas al sistema de canastilla de los módulos de almacenamiento, ya que en dicho componente se alberga el peso de los equipos.

Las simulaciones se realizaron asignando una carga homogénea de 150 kg por canastilla, variable que contribuyó a determinar que los materiales y las características adicionales cumplieran con suficiencia los criterios requeridos para la función de soportar la carga de los equipos.

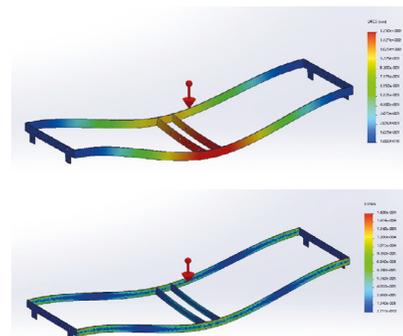


Figura 11. Análisis del sistema de canastilla

Fuente: elaboración propia.

## Proceso de fabricación y ensamble

Posterior a los diseños de los tres sistemas y las respectivas validaciones, se procedió con el proceso de fabricación y ensamble, para lo cual se eligieron cuatro empresas teniendo en cuenta capacidad técnica, experiencia, cercanía a lugar de ensayo y precio.

Las empresas seleccionadas se sumaron al comité técnico para establecer un plan de actividades y realizar seguimiento al avance de estas. Algunos procesos de manufactura utilizados fueron: corte CNC, Doble CNC, mecanizados a través de torno y fresadora, tratamientos térmicos y superficiales, acabados, soldadura, ensamble de la estructura, ensamble de sistema de potencia, y ensamble de instrumentación y control.

**Nota:** Las empresas participantes establecieron equipo para que el sistema fuese puesto a punto en una de ellas, con el fin de validar su funcionamiento y hacer ajustes de ser necesario.

En las figuras 11, 12 y 13, se podrá visualizar parte del proceso de fabricación y ensamble del sistema de almacenamiento.



Figura 12. Proceso de fabricación y ensamble  
Fuente: elaboración propia.

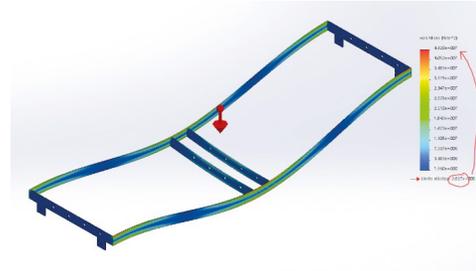


Figura 13. Ensamble sistema instrumentación y potencia  
Fuente: elaboración propia.



Figura 14. Prototipo real ensamblado  
Fuente: elaboración propia.

## Validaciones en campo

Se realizaron validaciones en campo en relación con las variables de temperatura y humedad requeridas para el almacenamiento de los equipos, el funcionamiento del sistema eléctrico, potencia y de control, la adquisición de datos, el posicionamiento, etc.; y se demostró que el sistema diseñado conserva con suficiencia los rangos exigidos según el procedimiento de almacenamiento de este tipo de equipos.



Figura 15. Validaciones en campo  
Fuente: elaboración propia.

## Manuales de usuario y operación

Por último, se elaboró un manual de operación/usuario del Shelter, el cual, entre otros, contiene los siguientes elementos: sistema híbrido de potencia (baterías y planta diésel), manejo del sistema de adquisición de datos y accesos, manejo del aire acondicionado y equipo deshumidificador, sistema de almacenamiento, sistemas de elevación y *software* (ver figura 15).

## Discusión

Nuestros hallazgos sugieren que los sistemas de almacenamiento y transporte de municiones deben ser customizables, esculpables o ajustados de acuerdo con el tipo de armamento, en función de factores como: tamaño, distribución interna, medio de transporte, ficha técnica, manuales, procedimientos y condiciones ambientales; todo con el fin de conservar las condiciones técnicas de los equipos en el tiempo, pero además conservar la seguridad de las personas que intervienen en el proceso.

Los hallazgos demostraron, a través de las pruebas de iniciales de campo, que el sistema Shelter desarrollado incrementa la eficiencia y la seguridad operacional, ya que conservamos las condiciones técnicas de la munición en función de factores ambientales, mecánicos y de control de acceso/manejo del

### Manual de usuario Shelter

#### Contenido

Introducción	3
División de shelter y componentes principales	3
Ubicación de componentes en el cuarto de control	3
Generador de energía diésel	4
Conector de alimentación	4
Inversor	5
Banco de baterías	5
Caja de breakers	5
Sistema de monitoreo	6
Cerraduras eléctricas	6
Sistema de elevación y descenso	7
Iluminación de los cuartos del shelter	7
Elementos adicionales	7
Operación	8
Alimentar el sistema mediante el generador	8
Alimentar el sistema mediante la red eléctrica	9
Operar el sistema de elevación y descenso	10
Cambio de la entrada de energía del generador a red eléctrica	10
Cambio de la entrada de energía de red eléctrica al generador	10
Apagar el sistema de energía	10

### Manual de usuario software Shelter

#### Contenido

I. Introducción	3
II. Guía de uso	3
Pantalla principal	3
A. Ver la información del software	3
B. Iniciar sesión	4
C. Encender y apagar luces desde el software	5
D. Ingresar al shelter	5
a. Modificar inventario	6
b. Ingresar para realizar otra actividad	8
E. Apagar el equipo	10
F. Visualizar datos mediante plataforma web	10

Figura 16. Contenidos manuales usuario Shelter  
Fuente: elaboración propia.

sistema, y así mismo promovemos la seguridad operacional de los técnicos de armamento, debido a los sistemas electromecánicos implementados en el sistema Shelter, con lo que se disminuyen esfuerzos humanos excesivos que pueden derivar en enfermedades y riesgos laborales.

Uno de los principales hallazgos, tanto en la vigilancia tecnológica realizada como en la presentación de resultados del desarrollo tecnológico, explícitos en el presente artículo, demuestra que la industria colombiana posee capacidades tecnológicas para resolver necesidades puntuales en la aviación militar, con lo que produce entornos favorables para la apropiación y la transferencia de nuevo conocimiento, la generación de empleo y la independencia tecnológica del país.

De acuerdo con los resultados derivados de la vigilancia tecnológica y del desarrollo tecnológico, nuestros hallazgos señalaron que el complemento y suplemento de capacidades institucionales y tecnológicas, a través del equipo interclúster que fue conformado, es uno de los caminos para incrementar la competitividad de la industria aeronáutica en Colombia.

## Conclusiones

Tras realizar las investigaciones mencionadas, se evidencia que existen empresas que comercializan sistemas de almacenamiento diseñados para municiones y explosivos, pero que no cumplen con las características técnicas requeridas específicamente por los misiles de la familia SPIKE.

En sí, uno de los aspectos más relevantes que se identifican en la revisión es que a nivel mundial se utilizan equipos especializados para el transporte, la manipulación y el almacenamiento de municiones que van a ser instalados en diferentes equipos. De igual forma, se destacan equipos diseñados específicamente para los diferentes tipos de munición. De ahí que este último aspecto sea una variable definida por el fabricante de la munición, quien emite un documento técnico y/o manual de utilización con equipo especializado.

Para el desarrollo de tecnologías que resuelvan necesidades en la industria militar por parte del sector productivo, es determinante la participación activa de oficiales y suboficiales de las Fuerzas Militares en el proceso de diseño y desarrollo. Es por ello que, en este caso puntual, se logra un prototipo funcional que está sujeto a mejoras según las necesidades de futuros clientes.

Para afinar y ajustar el manual de mantenimiento preventivo y correctivo del Shelter, es fundamental crear hoja de vida del equipo para realizar seguimiento a las fallas, al tiempo entre fallas y al tiempo entre reparaciones, ya que se desconoce (a la fecha de desarrollo del equipo) el comportamiento de piezas, componentes y subsistemas en relación con el uso y la exposición a factores ambientales.

## Referencias

- Army Technology. (2011, marzo 3). *SIAG OMC. Military Shelters* [en línea]. <https://tinyurl.com/yr4hs63y>
- Clegg Industries Inc. (s. f.). *Job #385: EMI Shielded Military Shelter* [en línea]. <https://tinyurl.com/cdu2zn49>
- Comando General de las Fuerzas Militares de Colombia. (2015). *Plan Estratégico Militar 2030. Planeación estratégica y transformación* [en línea]. <https://tinyurl.com/4ndvzyny>
- Department of the Army of the United States. (1989). *Transportability Guidance: Redeye Air Defense Guided Missile System* [en línea]. <https://tinyurl.com/bdupdw5b>
- Ellis & Watts. (s. f.). *Vertically- & Horizontally-Expanding ISO-Type Shelters* [en línea]. <https://tinyurl.com/4sp9ffyk>
- Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC). (s. f.). *Planes Estratégicos Sector Defensa y Fuerza Aérea Colombiana* [en línea]. <https://tinyurl.com/3f4hnnpe>
- General Dynamics. (s. f.). *Land. One Step Ahead. Clearing a Path for Our Nation's Best* [en línea]. <https://tinyurl.com/4b937nc4>
- GWP Group. (2021). *Custom Packaging for Defence Suppliers* [en línea]. <https://tinyurl.com/2vcp9fpz>
- Hashomer, A. (2020, junio 23). Por qué el misil SPIKE de Israel es la mejor arma antitanque de la historia. *Noticias de Israel* [en línea]. <https://tinyurl.com/3xhedy6x>
- Johnson, K. (2015, abril 24). *Troops Conduct Biannual 'Ammo Barge' Mission in Alaska*. U.S. Air Force [en línea]. <https://tinyurl.com/95pnum5k>

- Jun, L., Ling, M., Zhang, L., Lixin, Z. y Chunhui, W. (2014). A Concept for PHM System for Storage and Life Extension of Tactical Missile. *2014 Prognostics and System Health Management Conference-PHM* (pp. 689-694). Septiembre 18 de 2014, Zhangjiajie, China. <https://doi.org/10.1109/PHM.2014.6988261>
- KF Mobile Systems. (2019, marzo 15). Expandable Shelter For Military Applications. *Medium* [en línea]. <https://tinyurl.com/mryztmp6>
- KF Mobile Systems. (s. f.). *Home. About Us* [en línea]. <https://tinyurl.com/48repwte>
- Li, J.-H., Xie, J.-T., Li, X. y Hu, C.-G. (2019). A New Missile Health Monitoring System. *DESTECH Transactions on Computer Science and Engineering*. <https://doi.org/10.12783/dtcsc/icaic2019/29414>
- MDSC Systems. (2017, julio 13). *Side Expandable Containers* [en línea]. <https://tinyurl.com/34v4pnp8>
- Military Systems & Technology. (s. f.). *Expandable Shelters* [en línea]. <https://tinyurl.com/5n7fbrha>
- Military Systems & Technology. (s. f.). *Zeppelin Mobile Systeme GmbH* [en línea]. <https://tinyurl.com/2b7hkf3f>
- Mistral Inc. (s. f.). *Communication Shelter Systems. Rigid Wall Shelter Systems* [en línea]. <https://tinyurl.com/3s859sxz>
- Nordic Shelter. (s. f.). *About Us* [en línea]. <https://tinyurl.com/5fae3d5w>
- North Atlantic Treaty Organization (NATO). (2005). *Manual of NATO Safety Principles for the Transport of Military Ammunition and Explosives* [en línea]. <https://tinyurl.com/3xskdkwb>
- Pendem, P. K. y Talpa-Sai, S. (2018). Design and Structural (Buckling and Fracture Analysis) of Missile Container. *International Journal & Magazine of Engineering, Technology, Management and Research*, 5(1), 52-56. <https://tinyurl.com/58hhutp2>
- Precision Metal Industries. (s. f.). *Our Company. 100% Quality, 100% Delivery* [en línea]. <https://tinyurl.com/2wdyn268>
- Reserved Manual C6HXXX50A. (2015). *Which is the primary guide for packaging, handling, storage and transportation of air-to-ground missiles* (Rafael Advanced Defense Systems, 2015).
- Reserved Manual TM91XXXX46013&P. (2015). *For maintenance, care and general standard practices in rocket launch systems* (Rafael Advanced Defense Systems, 2015).
- Saumeth, E. (2018, abril 23). Colombia ya tiene listo su noveno helicóptero Arpia IV. *Infodefensa*. [en línea]. <https://tinyurl.com/4wjmr9xz>
- Siva-Krishna, K., Lalit-Narayan, K. y Venkateswara-Rao, K. (2012). Design Optimization And Structural Analysis of Missile Container. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 2(1), 59-63. <https://tinyurl.com/3cuwyfey>
- Srinivasulu, M. y Mamilla, V. R. (2017). Study on Design of a Container with Composite Material. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2(2-3), 127-129. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajmie.20170203.12>
- Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). (2021). *SIPRI Arms Transfers Database* [en línea]. <https://tinyurl.com/ct5t5d4k>
- Teng, K.-N., Han, J. y Zhang, G. (2018). Research on Missile Weapons Health Management and Storage Life Prediction Methods Based on PHM Technology. *Prognostics and System Health Management Conference*. <https://doi.org/10.1109/PHM-CHONGQING.2018.00177>
- United Nations. (2011). *Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Model Regulations. Volume I* [en línea]. <https://tinyurl.com/ydrnpr42>
- Varley. (s. f.). *Defence & Aerospace Photo Gallery. Transport and Storage Solutions* [en línea]. <https://tinyurl.com/ynark3uc>
- Voss, M. (2010, junio 22). Ramstein Ammo Troops Move Bombs Making Room During TURBOCADS 2010. *Ramstein Air Base* [en línea]. <https://tinyurl.com/4j3n5nmr>
- Wang, G. (2016). The Transport Environment Risk Evaluation Research of Missile Container based on Grey Clustering. *AMSE Journals*, 53(2), 188-198 [en línea]. <https://tinyurl.com/mpfhm386>
- Wenzlau Engineering. (s. f.). *Expandable Shelters* [en línea]. <https://tinyurl.com/wy4edwys>
- World Intellectual Property Organization (WIPO). (2021). *Search International and National Patent Collections. Patent Scope* [en línea]. <https://tinyurl.com/muvfydx9>
- Zhang, Z.-X., Si, X.-S., Hu, C. y Kong, X. (2015). Degradation Modeling-Based Remaining Useful Life Estimation: A Review on Approaches for Systems With Heterogeneity. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 229(4). <http://dx.doi.org/10.1177/1748006X15579322>

# Inteligencia artificial para la creación de modelos 3D aplicados en un ambiente de realidad virtual

| Fecha de recibido: 10 de agosto 2023 | Fecha de aprobado: 17 de abril 2024 |

| Reception date: August 10, 2023 | Approval date: April 17, 2024 |

| Data de recebimento: 10 de agosto de 2023 | Data de aprovação: 17 de abril de 2024 |

## Ricardo Andrés Santa Quintero

<https://orcid.org/0000-0002-8399-2425>

[ricardo.santaq@unilibre.edu.co](mailto:ricardo.santaq@unilibre.edu.co)

Magíster en Tecnologías Digitales  
Aplicadas a la Educación

Docente e investigador – Universidad Libre, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación SENSORAMA

Master's Degree in Digital Technologies  
Applied to Education

Teacher and researcher – Universidad Libre, Colombia

Researcher's role: theorist and writer

SENSORAMA Research Group

Mestrado em Tecnologias Digitais  
Aplicadas à Educação

Professor e investigador – Universidade Livre, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escritor

Grupo de Investigação SENSORAMA

## Carolina Andrea García Sarmiento

<https://orcid.org/0009-0004-8599-0230>

[carolinaa-garcias@unilibre.edu.co](mailto:carolinaa-garcias@unilibre.edu.co)

Ingeniera de Sistemas

Investigadora – Universidad Libre, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación SENSORAMA

Systems Engineer

Researcher – Universidad Libre, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing

SENSORAMA Research Group

Engenheiro de sistemas

Investigador – Universidade Livre, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escrito

Grupo de Investigação SENSORAMA

## Juan Esteban Infante Andrade

<https://orcid.org/0009-0007-2522-1984>

[juane-infantea@unilibre.edu.co](mailto:juane-infantea@unilibre.edu.co)

Ingeniero de Sistemas

Investigador – Universidad Libre, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de Investigación SENSORAMA

Systems Engineer

Researcher – Universidad Libre, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing

SENSORAMA Research Group

Engenheiro de sistemas

Investigador – Universidade Livre, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escrito

Grupo de Investigação SENSORAMA

**Cómo citar este artículo:** Santa Quintero, R. A., García Sarmiento, C. A., e Infante Andrade, J. E. (2024). Inteligencia artificial para la creación de modelos 3D aplicados en un ambiente de realidad virtual. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 112-121. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.825>



## Inteligencia artificial para la creación de modelos 3D aplicados en un ambiente de realidad virtual

## Artificial intelligence for the creation of 3D models applied in a virtual reality environment

## Inteligência artificial para a criação de modelos 3D aplicados em um ambiente de realidade virtual

**Resumen:** La idea para este proyecto nació y se desarrolló a lo largo de seis meses, desde enero hasta junio del 2023, en un semillero de investigación enfocado en la realidad virtual (RV), cuyo objetivo es hacer uso de la inteligencia artificial (IA) para la creación de modelos 3D y presentarlos en un *showroom*. Se quiso encontrar y comprobar que, haciendo uso de una IA, se pueden presentar modelos 3D en RV. Esto se llevó a cabo teniendo en cuenta una serie de pasos. Para la creación de los modelos, se usó la IA Point-E, mejorando los modelos en el *software* Blender e importándolos a un *showroom*, creado a partir del *software* Unity. Finalmente, se obtuvo un *showroom* con modelos 3D presentados como un museo, que pudieron visualizarse y manipularse utilizando un *kit* “HTC VIVE”. Con los resultados obtenidos, se concluyó que fue posible cumplir con el objetivo del proyecto, aunque no son resultados definitivos, dadas las limitaciones tecnológicas actuales; sin embargo, se comprobó que la IA puede generar modelos 3D y pueden ser usados en la RV.

**Palabras clave:** desarrollo; inteligencia artificial; modelado 3D; realidad virtual; refinamiento

**Abstract:** The idea for this project was conceived and developed over six months, from January to June 2023, in a research group focused on virtual reality (VR), aiming to use artificial intelligence (AI) for creating 3D models and presenting them in a showroom. The goal was to find and prove that by using AI, 3D models can be presented in VR. This was carried out by following a series of steps. For creating the models, the AI Point-E was used, enhancing the models in Blender software and importing them into a showroom created using Unity software. Finally, a showroom with 3D models presented as a museum was obtained, which could be viewed and manipulated using an “HTC VIVE” kit. Based on the results obtained, it was concluded that the project’s objective was met, although these results are not definitive due to current technological limitations; however, it was proven that AI can generate 3D models and they can be used in VR.

**Keywords:** Development; artificial intelligence; 3D modeling; virtual reality; refinement

**Resumo:** A ideia para este projeto foi concebida e desenvolvida ao longo de seis meses, de janeiro a junho de 2023, em um grupo de pesquisa focado em realidade virtual (RV), com o objetivo de usar inteligência artificial (IA) para a criação de modelos 3D e apresentá-los em um showroom. O objetivo era encontrar e comprovar que, usando IA, é possível apresentar modelos 3D em RV. Isso foi realizado seguindo uma série de etapas. Para a criação dos modelos, foi usada a IA Point-E, aprimorando os modelos no *software* Blender e importando-os para um showroom criado a partir do *software* Unity. Finalmente, obteve-se um showroom com modelos 3D apresentados como um museu, que puderam ser visualizados e manipulados utilizando um kit “HTC VIVE”. Com os resultados obtidos, concluiu-se que foi possível cumprir com o objetivo do projeto, embora esses resultados não sejam definitivos devido às limitações tecnológicas atuais; no entanto, comprovou-se que a IA pode gerar modelos 3D e eles podem ser usados na RV.

**Palavras-chave:** Desenvolvimento; inteligência artificial; modelação 3D; realidade virtual; refinamento

## Introducción

La tecnología y la innovación son temas que abarcan, actualmente, la gran mayoría de los campos del conocimiento, y este caso no es la excepción. El presente texto es denominado artículo corto, ya que está presentando resultados originales de los autores a partir de investigaciones mostradas a lo largo del proyecto.

La inteligencia artificial (IA) es la creación de sistemas, *hardware* y *software*, que puedan realizar las tareas que normalmente hace el ser humano y que requieren cierta inteligencia (Liz-Gutiérrez, 2020). De tal forma, también adquiere la capacidad de aprender, tomar decisiones y razonar. La IA abarca temas como la informática, el análisis de datos y todas las ingenierías, entre otros, lo cual ayuda a tener un mejor manejo de esta y que su entendimiento sea mucho más amplio (Google Cloud, 2022).

Aunque a la IA le falten muchos estudios y muchas mejoras, es una herramienta para la solución de problemas informáticos y de sentido innovador. Por eso, actualmente el uso de la IA se convierte en una necesidad en muchos aspectos de la vida cotidiana (Erazo-Luzuriaga *et al.*, 2023). De tal forma, se busca constantemente que la IA tenga mucho más conocimiento y entendimiento, ya que se ha demostrado que la IA está siendo usada en ámbitos bastante importantes para la humanidad en general, que ayudan y mejoran la creación de distintos objetos o productos necesarios, incluidos los de la salud (Schwab, 2016).

Una de las IA que es más importante para este proyecto es Point-E. Esta IA fue desarrollada por la empresa OpenAI, que permite la generación de objetos 3D con base en una entrada de texto o imagen. Esta herramienta genera una nube de puntos que representan la geometría del objeto y dan como resultado un modelo 3D (Intelarter, 4 de mayo de 2023). El modelado 3D se centra en la creación de objetos tridimensionales, que se forman a partir de vértices y coordenadas. Para obtener un objeto 3D, primero se genera un objeto con forma geométrica y aplicando herramientas de modelado pasa a ser algo más elaborado y con la forma deseada (Saavedra, 7 de agosto de 2023).

Otra de las IA que tiene mucha relevancia es una llamada DreamFusion, similar a Point-E, que hace uso de redes neuronales para la generación de los modelos 3D por medio de un método de texto y uno con imágenes 2D. Se destaca por la gran capacidad que tiene de crear los modelos realistas y detallados; asimismo, tiene una mayor gama de posibilidades con respecto a texturas y colores. Actualmente, se encuentra en fase de investigación, por lo que aún no está disponible al público (Poole *et al.*, 2022).

Para mostrar el modelado 3D, es posible hacer uso de la realidad virtual (RV); esta permite que, con ayuda del kit VIVE Pro HMD, el cual incluye auriculares VIVE Pro, dos estaciones base SteamVR (v1.0) y controladores 2x VIVE (v1.0), los usuarios tengan una experiencia inmersa en el ambiente modelado. Con esta herramienta, es posible adentrarse a los videojuegos, siendo un personaje más, incluso se puede usar en el campo de la medicina, haciendo simulaciones de operaciones o demás procesos; y, asimismo, en otros campos en los que se pueda tener una interacción de esta manera (Iberdrola, s. f.). Como se pudo observar de Calderón *et al.* (2020), la enseñanza y el aprendizaje por medio de la RV da resultados positivos, ya que estudiantes de medicina aprendieron mejor con la RV que con la enseñanza tradicional.

Para lograr que la RV llegue a los usuarios como se espera, se hace uso de la aplicación Unity, que permite la creación de juegos en 2D y 3D, de tal forma que la RV provea escenarios que no pueden ser vistos en la realidad misma, abriendo a los usuarios posibilidades que antes no tenían (Al-Gindy *et al.*, 2020). Asimismo, se integran los componentes y modelos en un *showroom* que puede ser utilizado con propósitos como capacitaciones por medio de realidad virtual, realidad mixta y realidad aumentada o simples recorridos que permiten observar y/o manipular los elementos 3D generados (Robayo-Ramírez *et al.*, 2023); en este caso, el *showroom* tendrá el objetivo de permitir observar los resultados obtenidos.

Con base en lo anterior, se pudo evidenciar la posibilidad de una unión entre una IA y el modelado 3D para hacer una muestra en un *showroom* en Unity. Por esta razón, el problema planteado en la investigación se centra en definir los procesos que permiten utilizar

la IA Point-E para la generación de modelos 3D que sean utilizados en un *showroom* construido con Unity.

Se describen los pasos a seguir dentro de la IA. Primero, en este caso, es tener una cuenta creada de Gmail para hacer uso de la herramienta Colab de Google, centrada en el desarrollo de proyectos de Python, haciendo uso de máquinas virtuales para la interpretación del código (Google, s. f.). Google Colab funciona mediante el lenguaje de programación Python, lo cual la convierte en un intérprete que cumple la función de leer el código, pero no en su totalidad como lo haría un compilador, sino que va revisando línea por línea durante la ejecución. El intérprete es necesario para que Python funcione correctamente, pues lo necesita para ser procesado y obtener los resultados (Sharma *et al.*, 2020).

Como se mencionó, es necesario hacer uso de una aplicación para el refinamiento del modelado, como puede ser Autodesk Maya, compuesta por un conjunto de herramientas para modelado, animación, renderizado y simulación 3D. Es ideal para el uso profesional, ya que ofrece mayor precisión y control sobre el proceso de creación 3D (Tickoo, 2019).

También existe la herramienta Cinema 4D, la cual cuenta con una interfaz intuitiva y fácil de usar, ideal tanto para personas que apenas están aprendiendo, como para quienes ya saben usarlo ampliamente; allí se pueden crear animaciones y *motion graphics*. Hay que tener en cuenta que algunas funciones avanzadas de esta aplicación requieren complementos de pago.

Asimismo, Blender sirve para hacer la respectiva corrección de los modelos y que queden de la mejor forma posible. Blender es un *software* libre para modelamiento 3D, bajo la licencia GNU (General Public License). Aunque esta es solo una de sus muchas funciones, como animación, simulación, renderizado, creación de juegos 3D, etc., este *software* es una herramienta multiplataforma que se encuentra disponible en Windows, Linux y Macos, gracias a que funciona bajo la especificación de gráficos estándar de OpenGL (Garrido-Monagas y Méndez-León, 2022).

En esta investigación, el objetivo es mostrar cómo crear modelos 3D con ayuda de la IA Point-E y la mejora de los resultados con Blender, para luego observarlos dentro de un *showroom* en Unity.

## Método

La metodología usada es mixta, basada en la recolección y el análisis de datos de forma cualitativa y cuantitativa, es decir que la investigación se desarrollará de modo que se obtengan datos tanto objetivos como subjetivos (Hernández-Sampieri y Mendoza-Torres, 2000). En este proyecto, la metodología cuantitativa se puede observar dentro de la programación de una IA, pues predominan los valores numéricos en los resultados de los modelos; y la metodología cualitativa tiene lugar en los modelos cuando son interpretados de forma subjetiva.

En vista de lo anterior, se tiene en cuenta el ambiente donde se realizaron todos los modelos por medio de la programación de la IA. Este fue Google Colab (Google, s. f.), que permite que cualquier persona pueda hacer uso de Point-E sin necesidad de tener una GPU propia. Las características de la máquina virtual son 12,7 Gb de RAM, 15,0 Gb de VRAM o memoria de GPU dedicada y 78 Gb de disco duro o memoria de almacenamiento.

En la Figura 1, se muestran los pasos generales del proyecto. Inicialmente, para tener mejores resultados, se hizo una lectura extensa de las instrucciones básicas que se comparten en el Git Hub de la IA Point-E<sup>1</sup>; de tal forma, se puede entender mejor el funcionamiento de la IA. Seguido a esto, se procede a realizar el modelo, así la IA dará un resultado, ya sea por una instrucción escrita o de una imagen, y se obtiene un modelo 3D que pasa a ser modificado y refinado. Por último, se puede visualizar este modelo dentro del *showroom*.

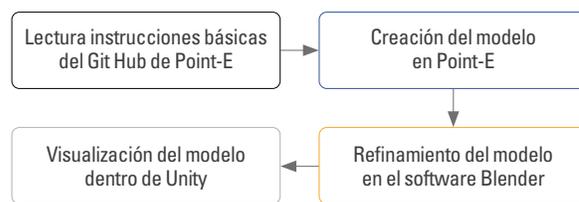


Figura 1. Proceso para la creación del proyecto presentado

Fuente: elaboración propia (2023).

1 Consultar: <https://github.com/openai/point-e/blob/main/README.md>

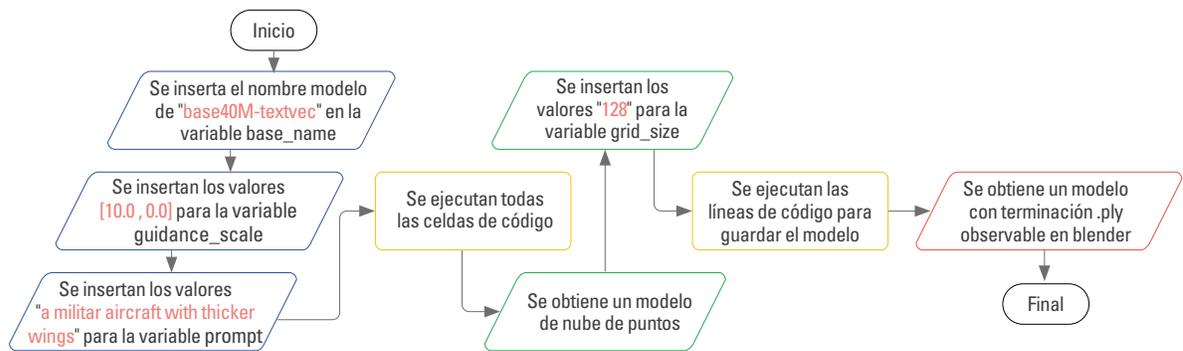


Figura 2. Diagrama explicativo del procedimiento en la IA Point-E dentro de Google Colab  
Fuente: elaboración propia (2023).

En la Figura 2, se tienen los pasos que guiaron a los resultados obtenidos, teniendo en cuenta el sitio donde se encuentran los primeros cuadernos de Python y la creación de este en Google Colab, donde se desarrollan los modelos. Luego se crean los modelos ejecutando todas las líneas de código, haciendo cambios en los valores, consiguiendo que algunos de los mejores resultados se obtengan usando dichas variaciones, con la excepción del *prompt* o entrada, que puede modificarse como se desee.

Como siguiente paso, observando la Figura 3, se da lugar al proceso en Blender, donde primero se observan los errores que tiene el modelo para cambiarlos. Con esto claro, se usan las herramientas de moldeado para arreglar la figura y tener detalles más definidos y colores más realistas.

Por último, se pasa a Unity, donde se importa el modelo para luego ubicarlo y cambiar su tamaño. Se procede a agregarle una caja de colisión para que el objeto tenga solidez, dentro del *showroom*, y no pueda ser atravesado por los usuarios, como se detalla en la Figura 4.

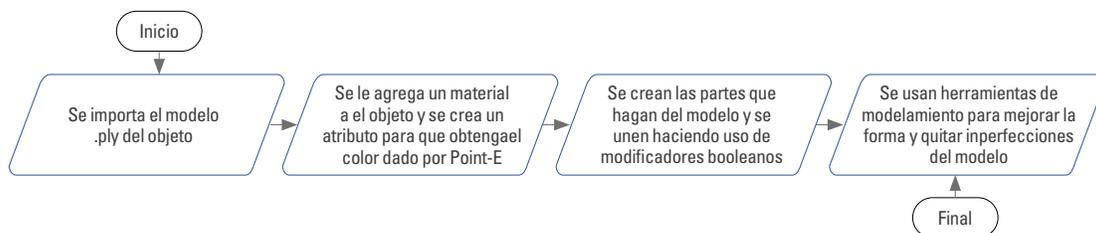


Figura 3. Diagrama explicativo del procedimiento realizado en la aplicación de Blender  
Fuente: elaboración propia (2023).

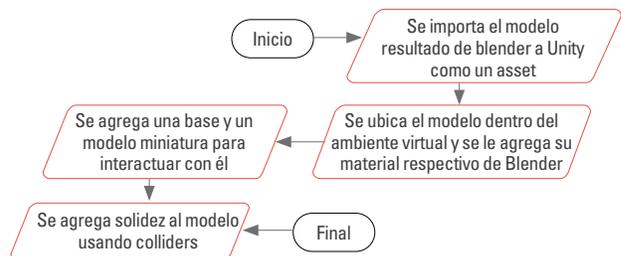
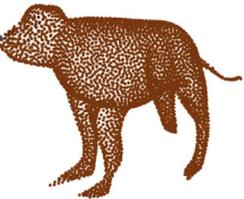


Figura 4. Diagrama explicativo del procedimiento realizado en la aplicación de Unity  
Fuente: elaboración propia (2023).

## Resultados

En esta sección, se mostrarán los resultados paso a paso, desde la creación en Point-E, y con qué valores se obtuvo el resultado, como se observa en la Tabla 1. Los detalles y las configuraciones en Blender, así como las características y las herramientas usadas para la refinación del modelo, se observan en la Tabla 2. Los procesos que se realizan en Unity como ambiente de desarrollo se describen en la Tabla 3.

Tabla 1.  
Pasos en Point-E

Entradas dadas en Point-E	Resultado obtenido
base_name = 'base40M-textvec' guidance_scale = [10.0, 0.0] prompt = 'a militar aircraft with thicker wings' grid_size = 128	
base_name = 'base40M-textvec' guidance_scale = [10.0, 0.0] prompt = 'a corgi' grid_size = 128	
base_name = 'base40M-textvec' guidance_scale = [10.0, 0.0] prompt = 'a little gray hamster with two meat ears, a meat tale, a meat nose and gray whiskers' grid_size = 128	
base_name = 'base40M-textvec' guidance_scale = [8.0, 1.0] prompt = 'an animal with ears' grid_size = 128	
base_name = 'base40M-textvec' guidance_scale = [8.0, 1.0] prompt = 'an animal' grid_size = 128	
base_name = 'base40M-textvec' guidance_scale = [7.0, 1.0] prompt = 'a realistic military tank with a thicker gun barrel and circular wheels' grid_size = 128	

Fuente: elaboración propia (2023).

Se muestran los valores usados dentro de Point-E para obtener los resultados, además de una imagen de dicho modelo dentro de la IA Point-E.

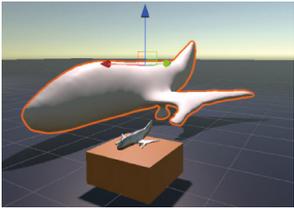
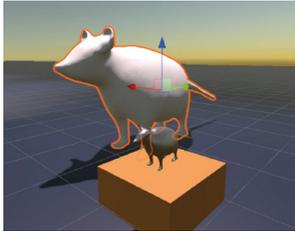
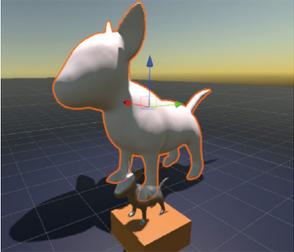
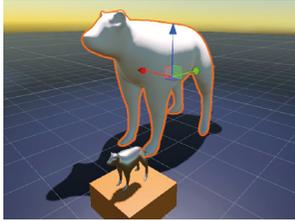
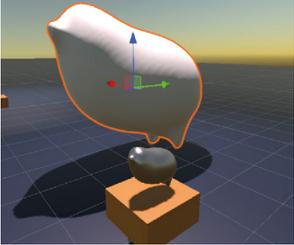
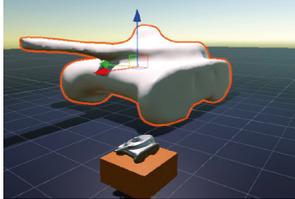
Tabla 2.  
Pasos en Blender

Procedimiento realizado en Blender	Resultado obtenido
Creación de la cola del avión usando un cubo y la herramienta de biselado de Blender. Se unió la cola creada con el avión por medio de un modificador booleano. Se usaron las herramientas de moldeado aplastar, suavizar, dibujar e inflar, hasta conseguir el resultado deseado.	
Se hizo uso de las herramientas dibujar, dibujar (definido), inflar, suavizar y raspar, hasta conseguir el resultado deseado con una figura más definida y detallada.	
Se hizo uso de las herramientas dibujar, dibujar (definido), inflar, glóbulo, suavizar, raspar y raspar (multiplano), hasta conseguir el resultado deseado con una figura más definida y detallada.	
Se hizo uso de las herramientas dibujar, dibujar (definido), inflar, glóbulo, suavizar, raspar, raspar (multiplano) y recortar (marco), hasta conseguir el resultado deseado con una figura más definida y detallada.	
Se hizo uso de las herramientas dibujar, dibujar (definido), inflar, glóbulo, suavizar, raspar, raspar (multiplano) y recortar (marco), hasta conseguir el resultado deseado con una figura más definida y detallada.	
Se usaron las herramientas de moldeado aplastar, suavizar, dibujar e inflar, hasta conseguir el resultado deseado.	

Fuente: elaboración propia (2023).

Se observan los pasos y los procesos aplicados al resultado de Point-E, y se muestra una imagen con el resultado luego de aplicar dichos pasos y/o procesos.

Tabla 3.  
Pasos en Unity

Procedimiento realizado en Unity	Resultado obtenido	Procedimiento realizado en Unity	Resultado obtenido
<p>Se importa el objeto a Unity, donde es necesario llevarlo al escenario y agregarle el material correspondiente de Blender. Se le agrega un atributo <i>mesh collider</i> de Unity para que el objeto tenga solidez.</p> <p>Se agregó una base para un modelo miniatura, que es el mismo grande, a fin de interactuar con él y verlo más a detalle.</p>		<p>Se importa el objeto a Unity, donde es necesario llevarlo al escenario y agregarle el material correspondiente de Blender. Se le agrega un atributo <i>mesh collider</i> de Unity para que el objeto tenga solidez.</p> <p>Se agregó una base para un modelo miniatura, que es el mismo grande, a fin de interactuar con él y verlo más a detalle.</p>	
<p>Se importa el objeto a Unity, donde es necesario llevarlo al escenario y agregarle el material correspondiente de Blender. Se le agrega un atributo <i>mesh collider</i> de Unity para que el objeto tenga solidez.</p> <p>Se agregó una base para un modelo miniatura, que es el mismo grande, a fin de interactuar con él y verlo más a detalle.</p>		<p>Se importa el objeto a Unity, donde es necesario llevarlo al escenario y agregarle el material correspondiente de Blender. Se le agrega un atributo <i>mesh collider</i> de Unity para que el objeto tenga solidez.</p> <p>Se agregó una base para un modelo miniatura, que es el mismo grande, a fin de interactuar con él y verlo más a detalle.</p>	
<p>Se importa el objeto a Unity, donde es necesario llevarlo al escenario y agregarle el material correspondiente de Blender. Se le agrega un atributo <i>mesh collider</i> de Unity para que el objeto tenga solidez.</p> <p>Se agregó una base para un modelo miniatura, que es el mismo grande, a fin de interactuar con él y verlo más a detalle.</p>		<p>Se importa el objeto a Unity, donde es necesario llevarlo al escenario y agregarle el material correspondiente de Blender. Se le agrega un atributo <i>mesh collider</i> de Unity para que el objeto tenga solidez.</p> <p>Se agregó una base para un modelo miniatura, que es el mismo grande, a fin de interactuar con él y verlo más a detalle.</p>	

Fuente: elaboración propia (2023).

Es importante mencionar que la IA, en sus gráficas, mostraba algunos colores que se pudieron observar en Blender haciendo uso de materiales, pero en Unity no se tuvo esa posibilidad, dado que el objeto no poseía ninguna textura y la creación de una textura para pintar este modelo no fue posible. Adicional a esto, para hacer uso adecuado de Blender y sus herramientas, se tuvo en cuenta un manual básico, en el que se mostraba cómo utilizar la aplicación y qué funciones se podrían realizar allí (Barba-Robles, 2022). Otro punto importante fue el aprendizaje de Unity, donde

se tomó un curso (Dondé, 19 de diciembre 2019) que explicaba el funcionamiento y el manejo de este *software* y que permitió hacer más contenido interactivo para el proyecto.

Al final, se logró tener los resultados deseados. Como se puede observar en la Figura 5, se tiene el *showroom* mostrado como un museo, donde se encuentran los modelos de gran tamaño y, junto a ellos, los modelos miniatura, con los que se puede interactuar. Asimismo, dentro del museo se tiene un póster de bienvenida y para cada modelo hay un cuadro que lo describe.

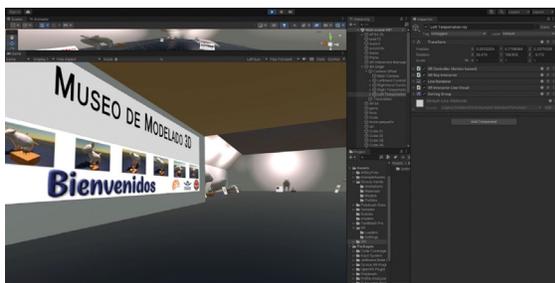


Figura 5. Muestra del museo general, visto desde el equipo de RV  
Fuente: elaboración propia (2023).

A continuación, se exponen los resultados finales, obtenidos y presentados específicamente en el *showroom*. Al comienzo, se encuentra un póster de bienvenida, en el que se pueden observar las figuras vistas desde la aplicación de Unity (ver Figura 6).

Después, se pasa a una vista general de los modelos, viendo el interior del museo (Figura 7). De esta forma, se puede observar la iluminación, la organización y el diseño que se llevó a cabo para hacer la muestra de cada una de las figuras.



Figura 6. Inicio del *showroom* y bienvenida a los usuarios  
Fuente: elaboración propia (2023).

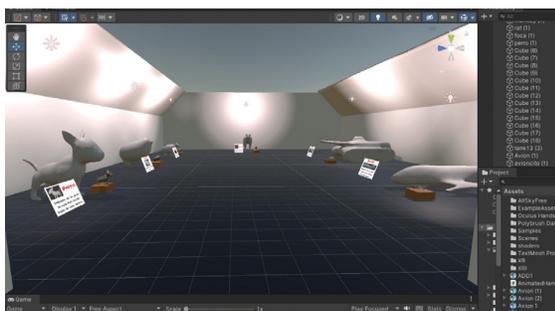


Figura 7. Museo visto desde la entrada  
Fuente: elaboración propia (2023).

Para apreciar mejor cada uno de los modelos, en una mesa se posicionó una figura miniatura con la cual se puede interactuar, es decir, se puede agarrar y mover para ver más de cerca sus detalles, únicamente estando en el *showroom*; y también se incluyó un cuadro descriptivo con más detalles para cada uno de los modelos. En la Figura 8, se podrá observar lo mencionado antes desde una vista frontal del modelo.



Figura 8. Vista frontal de un modelo, con su explicación y su modelo miniatura

Fuente: elaboración propia (2023).

Por último, en esta muestra, se agregó un atributo Skybox dentro de la cámara principal en Unity, el cual solo puede ser visto con las gafas de RV, pues aquí es donde se ve lo que se le aplicó al atributo (ver Figura 9).

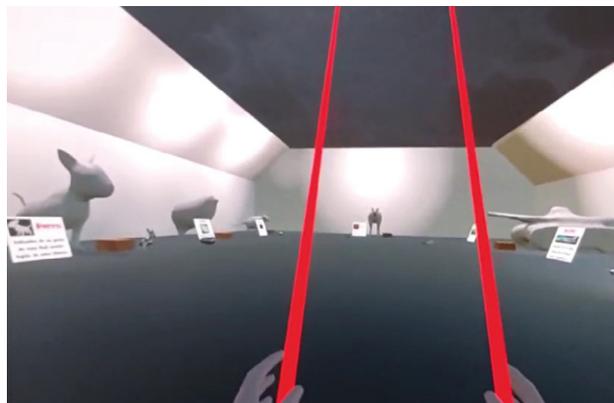


Figura 9. Muestra del techo del museo en forma de cielo nocturno  
Fuente: elaboración propia (2023).

## Discusión y análisis

Al utilizar la IA por medio de texto para generar el modelo, no se obtienen todos los detalles indicados o el modelo no refleja con exactitud algunas características esperadas. Sin embargo, la IA se puede utilizar por medio de una imagen existente, lo cual permite generar una imagen básica a través de la indicación textual y luego usar la imagen generada como entrada para obtener un nuevo modelo más detallado usando las especificaciones 300M o 1B que pueden ofrecer unos resultados mejores (Nichol *et al.*, 2022). Por otro lado, no se hizo uso de la IA DreamFusion, debido a que, usando las betas existentes hasta el momento, los resultados eran menos detallados y en muchos casos el tiempo que tardaban era mucho mayor.

También, fue posible observar que se pudo haber hecho un mejor uso de la aplicación de Blender. Teniendo más conocimiento y experiencia acerca del tema, el modelado en la aplicación pudo dar mejores resultados en cuando a diseño, color o detallado, de forma que los modelos mostrados en el *showroom* serían más realistas. En este caso, se eligió hacer uso de Blender, ya que Autodesk Maya tiene una curva de aprendizaje más pronunciada que Blender y el elevado costo de la licencia no era algo que se pudiera considerar. Cinema 4D, por su parte, es menos robusto que Maya y Blender para realizar el modelado 3D complejo, por lo cual hacer uso de este no era viable por sus limitaciones.

Otro aspecto para resaltar, muy importante, fue la forma en que se mostraba la nube de puntos dada por Point-E, ya que en su mayoría los modelos dados tenían muchos espacios en blanco (ver Figuras 10 y 11). En Blender representaba un vacío; por ende, se hace necesario ajustar el modelo con un *software* o alguna aplicación especializada, donde fuera posible rellenar estos espacios con más puntos. De tal forma, al momento de crear el modelo 3D con Point-E, este se procesará para no dejar estos espacios vacíos, y al pasar el diseño a Blender, los modelos habrían sido viables para mostrar y habría sido mucho más sencillo su refinamiento.



Figuras 10 y 11. Muestra de los espacios en blanco en los modelos dados por la IA Point-E en el diseño de una nube de puntos  
Fuente: elaboración propia (2023).

Un aspecto muy curioso, sucedido durante la realización del proyecto, fue que al momento de darle color a los diseños más importantes, la aplicación de Blender no reconocía ninguna textura a la cual darle color. Por eso es que se debe analizar si existen otras herramientas que permitan pintar la superficie de este tipo de modelos, ya que se habría obtenido un resultado mucho más detallado.

## Conclusiones

La IA avanza a pasos muy grandes y tener una con la capacidad de dar resultados como los presentados es una buena señal. Aunque esto aún no puede ser tomado como una solución definitiva al tema, ya que dichos resultados no presentan la calidad esperada, lo cual da paso a continuar con la investigación para lograr la calidad buscada. Sin embargo, se logró el objetivo principal del proyecto, que era presentar la viabilidad de crear modelos 3D, su refinamiento en Blender y el *showroom* como museo que se pudiera visualizar con RV.

Se destaca que aunque la IA es muy fácil de usar y da resultados aceptables, le hace falta mucho entrenamiento en cuanto a los datos, ya que los modelos que arroja en nubes de puntos tienen una tendencia a ser muy básicos tanto en figuras con las mismas posturas, como en la toma de todas las características solicitadas en el *prompt*. Esto fue algo positivo para exponer todas las capacidades de la IA y para mostrar que unos

modelos como los que se presentaron en el *showroom* no se pueden obtener solamente con el uso de esta.

## Recomendaciones

Usar *softwares* para la mejora de la nube de puntos obtenida por medio de la IA, y luego de hacerle su debido refinamiento, en ese caso, pasar a la creación de los modelos, podría desencadenar en mejores resultados y que sean más parecidos a lo esperado. También, se podría hacer un cambio en la creación de los modelos y que en lugar de pasar de texto a modelo 3D, haya un paso intermedio de texto a imagen, para luego esa imagen convertirla a modelo 3D y obtener mejores resultados, como se mencionó. Sin embargo, este procedimiento no fue compartido por los creadores de Point-E, quienes señalaron que los resultados se vuelven peores cuando se hace uso de solo texto y son mejores cuando se usa un paso intermedio de texto a imagen (Nichol *et al.*, 2022). Otra recomendación es realizar una mejora en los procesos definidos, de tal forma que todo el proceso sea automatizado al máximo posible, generando modelos 3D, teniendo alta calidad y preservando los elementos y las características requeridas, incluso en la visualización dentro del *showroom* en Unity.

## Referencias

- Al-Gindy, A., Felix, C., Ahmed, A., Matoug, A. y Alkhidir, M. (2020). Virtual Reality: Development of an Integrated Learning. *IJIE: International Journal of Information and Education Technology*, 10(30).171-175. <https://doi.org/10.18178/ijiet.2020.10.3.1358>
- Barba-Robles, A. (2022). *Modelado de una vivienda en Blender y UE4* (trabajo de grado, Universidad de Alicante). Repositorio institucional RUA. <https://tinyurl.com/yu4h2xjc>
- Calderón, S. J., Tumino, M. C. y Bournissen, J. M. (2020). Realidad virtual: impacto en el aprendizaje percibido de estudiantes de Ciencias de la Salud. *Revista Tecnología, Ciencia y Educación*, (16), 65-82. <https://tinyurl.com/332b5pzt>
- Dondé, E. (2019, diciembre 19). *Curso Gratuito de Unity VR* [en línea] <https://tinyurl.com/4zss3nzz>
- Erazo-Luzuriaga, A. F., Ramos-Secaira, F. M., Galarza-Sánchez, P. C. y Boné-Andrade, M. F. (2023). La inteligencia artificial aplicada a la optimización de programas informáticos. *JESSR: Journal of Economic and Social Science Research*, 3(1). <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v3/n1/61>
- Garrido-Monagas, M. y Méndez-León, A. (2022). *2PVirtualProc. Introducción a Blender* (trabajo de grado, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría) [en línea]. <https://tinyurl.com/435wdprm>
- Google. (s. f.). *Colaboratory* [en línea]. <https://tinyurl.com/nk49m3bt>
- Google Cloud. (2022). *¿Qué es la inteligencia artificial (IA)?* [en línea]. <https://tinyurl.com/44vcdezu>
- Hernández-Sampieri, R. y Mendoza-Torres, C. P. (2000). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Iberdrola. (s. f.). *Realidad virtual: otro mundo al alcance de tus ojos* [en línea]. <https://tinyurl.com/58s7yrwr>
- Intelarter. (2023, mayo 4). *¿Qué es Point-E? Nueva herramienta de IA para crear modelos 3D* [en línea]. <https://tinyurl.com/2runw9tn>
- Liz-Gutiérrez, A. M. L. (2020). ¿Un mundo nuevo? Realidad virtual, realidad aumentada, inteligencia artificial, humanidad mejorada, Internet de las cosas. *Arbor*, 196(797). <https://doi.org/10.3989/arbor.2020.797n3009>
- Nichol, A., Jun, H., Dhariwal, P., Mishkin, P. y Chen, M. (2022). Point-E: A System for Generating 3D Point Clouds from Complex Prompts. *arXiv* [en línea]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.08751>
- Poole, B., Jain, A., Barron, J. T. y Mildenhall, B. (2022). Dream-Fusion: Text-to-3D using 2D Diffusion. *arXiv* [en línea]. <https://dreamfusion3d.github.io/>
- Robayo-Ramírez, J. F., Simanca-Herrera, F. A., & Santa-Quintero, R. A. (2023). Visualización de datos captados por satélites en un showroom de realidad virtual (VR). *Avenir*, 7(1).
- Saavedra, J. Á. (2023, agosto 7). *¿Qué es el modelado 3D y cómo funciona? Escuela Británica de Artes Creativas y Tecnología* [en línea]. <https://ebac.mx/blog/que-es-el-modelado-3d>
- Schwab, K. (2016). *La Cuarta Revolución Industrial*. Editorial Debate
- Sharma, A., Khan, F., Sharma, D., & Gupta, S. (2020). Python: The Programming Language of Future. *IJIRT: International Journal of Innovative Research in Technology*, 6(2). 115-118. <https://tinyurl.com/v363x93d>
- Tickoo, S. (2019). *Autodesk Maya 2019: A Comprehensive Guide, 11th Edition* (11.ª ed.). CADCIM Technologies.

# Aplicación de un modelo predictivo de consumo de combustible a partir de *machine learning* y *random forest* para una aerolínea comercial colombiana

| Fecha de recibido: 14 de junio 2023 | Fecha de aprobado: 17 de abril 2024 |

| Reception date: June 14, 2023 | Approval date: April 17, 2024 |

| Data de recebimento: 14 de junho de 2023 | Data de aprovação: 17 de abril de 2024 |

## Pedro Fernando Melo Daza

<https://orcid.org/0000-0002-0734-9358>

[pedromelodaza@cedoc.edu.co](mailto:pedromelodaza@cedoc.edu.co)

Magíster en Ingeniería

Investigador – Centro de Educación Militar, Escuela de Aviación del Ejército, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura  
ESAVE - Grupo de Investigación en Aviación Militar

Master's Degree in Engineering

Researcher – Military Education Center, Army Aviation School, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing  
ESAVE - Military Aviation Research Group

Mestrado em Engenharia

Pesquisador – Centro de Educação Militar, Escola de Aviação do Exército, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escritor  
ESAVE - Grupo de Investigação da Aviação Militar

## Juan Andrés Bermúdez Gómez

<https://orcid.org/0000-0002-4973-6874>

[juanandresbermudezgomez@gmail.com](mailto:juanandresbermudezgomez@gmail.com)

Ingeniero Aeronáutico

Investigador – Centro de Educación Militar, Escuela de Aviación del Ejército, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura  
ESAVE - Grupo de Investigación en Aviación Militar

Aeronautical Engineering Student

Researcher - Center for Military Education, Army Aviation School, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing  
ESAVE - Military Aviation Research Group

Estudante de Engenharia Aeronáutica

Investigador - Centro de Educação Militar, Escola de Aviação do Exército, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escrito  
ESAVE - Grupo de Investigação em Aviação Militar

## Sara Valentina González Medina

<https://orcid.org/0000-0003-1810-9613>

[valentinagonalezmedina@cedoc.edu.co](mailto:valentinagonalezmedina@cedoc.edu.co)

Ingeniera Aeronáutica

Investigadora – Centro de Educación Militar, Escuela de Aviación del Ejército, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura  
ESAVE - Grupo de Investigación en Aviación Militar

Aeronautical Engineering Student

Researcher - Center for Military Education, Army Aviation School, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing  
ESAVE - Military Aviation Research Group

Estudante de Engenharia Aeronáutica

Investigador - Centro de Educação Militar, Escola de Aviação do Exército, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escrito  
ESAVE - Grupo de Investigação em Aviação Militar

## Cristian Lozano Tafur

<https://orcid.org/0000-0002-6653-6188>

[ctistianlozannotafur@cedoc.edu.co](mailto:ctistianlozannotafur@cedoc.edu.co)

Magíster en Materiales y Procesos

Investigador – Centro de Educación Militar, Escuela de Aviación del Ejército, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura  
ESAVE - Grupo de Investigación en Aviación Militar

Master's Degree in Materials and Processes

Researcher – Military Education Center, Army Aviation School, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing  
ESAVE - Military Aviation Research Group

Mestrado em Materiais e Processos

Pesquisador – Centro de Educação Militar, Escola de Aviação do Exército, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escritor  
ESAVE - Grupo de Investigação da Aviação Militar

## Samuel Fuentes Rodríguez

<https://orcid.org/0000-0001-6630-980X>

[samuelfuentesrodriguez@cedoc.edu.co](mailto:samuelfuentesrodriguez@cedoc.edu.co)

Ingeniero Aeronáutico

Investigador – Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura  
ESAVE - Grupo de Investigación en Aviación Militar

Aeronautical Engineering Student

Researcher - Center for Military Education, Army Aviation School, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing  
ESAVE - Military Aviation Research Group

Estudante de Engenharia Aeronáutica

Investigador - Centro de Educação Militar, Escola de Aviação do Exército, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escrito  
ESAVE - Grupo de Investigação em Aviação Militar

**Cómo citar este artículo:** Melo Daza, P. F., Bermúdez Gómez, J. A., Lozano Tafur, C., González Medina, S. V., y Fuentes Rodríguez, S. (2024). Aplicación de un modelo predictivo de consumo de combustible a partir de *machine learning* y *random forest* para una aerolínea comercial colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(2), 122-134. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.826>



## Aplicación de un modelo predictivo de consumo de combustible a partir de *machine learning* y *random forest* para una aerolínea comercial colombiana

## Application of a predictive fuel consumption model using machine learning and random forest for a Colombian commercial airline

## Aplicação de um modelo preditivo de consumo de combustível usando *machine learning* e *random forest* para uma companhia aérea comercial colombiana

**Resumen:** En la industria aeronáutica, los costos de producción del hidrocarburo JET A-1 experimentan un incremento cercano al 5% semanal a través de los años, lo cual ha repercutido en un alza de los gastos para los operadores aéreos. En esta investigación, se propone crear un modelo de predicción del consumo de combustible para vuelos regionales, con base en los datos recolectados de vuelos de una aerolínea colombiana durante el período 2018-2019. Para la creación del modelo predictivo, se utilizó la biblioteca Sci-Kit Learn del lenguaje de programación Python, y el enfoque del problema fue la perspectiva de ‘problema inverso’. Luego se procedió con la ingeniería de características para mejorar la calidad del conjunto de datos obtenido y permitir una mayor precisión en la predicción. Se implementó el modelo de predicción para las variables identificadas como dependientes e independientes y, finalmente, se evaluó su rendimiento utilizando las métricas de error absoluto promedio (MAE), error cuadrático medio (MSE) y raíz del error cuadrático medio (RMSE). Los resultados indican que el modelo es capaz de efectuar la predicción del consumo de combustible, con errores bajos en valores cuantitativos.

**Palabras clave:** aprendizaje automático; bosques aleatorios; ingeniería de características; inteligencia artificial; métricas de evaluación; pronóstico de combustible.

**Abstract:** In the aeronautical industry, JET A-1 hydrocarbon production costs experience an increase of approximately 5% weekly over the years, which has resulted in a rise in expenses for air operators. This research proposes to create a fuel consumption prediction model for regional flights, based on data collected from flights of a Colombian airline during the period 2018-2019. To create the predictive model, the Sci-Kit Learn library of the Python programming language was used, and the problem was approached from an ‘inverse problem’ perspective. Feature engineering was then carried out to improve the quality of the obtained data set and allow for greater prediction accuracy. The prediction model was implemented for the variables identified as dependent and independent, and finally, its performance was evaluated using the metrics of Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), and Root Mean Squared Error (RMSE). The results indicate that the model is capable of predicting fuel consumption, with low errors in quantitative values.

**Key Words:** Artificial intelligence; evaluation metrics; feature engineering; fuel forecasting; machine learning; random forest.

**Resumo:** Na indústria aeronáutica, os custos de produção do hidrocarboneto JET A-1 experimentam um aumento de aproximadamente 5% semanalmente ao longo dos anos, o que resultou em um aumento nos gastos para os operadores aéreos. Esta pesquisa propõe criar um modelo de previsão de consumo de combustível para voos regionais, com base em dados coletados de voos de uma companhia aérea colombiana durante o período de 2018-2019. Para criar o modelo preditivo, foi utilizada a biblioteca Sci-Kit Learn da linguagem de programação Python, e o problema foi abordado a partir de uma perspectiva de ‘problema inverso’. Em seguida, foi realizada a engenharia de características para melhorar a qualidade do conjunto de dados obtido e permitir uma maior precisão na previsão. O modelo de previsão foi implementado para as variáveis identificadas como dependentes e independentes e, finalmente, seu desempenho foi avaliado usando as métricas de Erro Absoluto Médio (MAE), Erro Quadrático Médio (MSE) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). Os resultados indicam que o modelo é capaz de prever o consumo de combustível, com baixos erros em valores quantitativos.

**Palavras-chave:** Aprendizado de máquina; engenharia de recursos; floresta aleatória; inteligência artificial; métricas de avaliação; previsão de combustível.

## Introducción

La demanda de pasajeros en Colombia ha tenido un crecimiento aproximado de 5 % año tras año entre 2011 y 2019 (Girón-Girón, 2023). Ahora bien, la pandemia de la COVID-19 tuvo gran repercusión a nivel global y derivó en una caída porcentual del 73 % en demanda de pasajeros; sin embargo, a partir de la reactivación de la economía la demanda de pasajeros ha tenido un crecimiento anual de alrededor del 4 % (Viñas y Gómez, 2023). Este crecimiento es importante analizarlo en los planes o estrategias a futuro de los operadores aeronáuticos colombianos y mundiales, con el propósito de pronosticar los costos de operación y la rentabilidad a corto, mediano y largo plazo.

Los aviones a reacción modernos en la aviación comercial mundial utilizan el hidrocarburo del queroseno, también llamado JET A-1 (Orellano-Lasprilla, 2023). Este combustible ha presentado un aumento considerable, de casi 250 %, en periodos de cuatro años a nivel mundial (Morrison *et al.*, 2010), comportamiento que se logra evidenciar en la Figura 1 con una

adicional al costo final por tiquete para el usuario final, los operadores aeronáuticos deben velar por el uso óptimo del producto químico y evitar vuelos vacíos que representen pérdidas monetarias.

En pro de analizar el crecimiento de la actividad aérea en el territorio nacional, es importante tener en cuenta los gastos directos que esta conlleva. El consumo de combustible JET A-1 es un objeto de estudio que ha presentado avances desde la gestión administrativa hasta usos de algoritmos de inteligencia artificial. Ahora bien, sabiendo que el uso del hidrocarburo representa en la actividad económica de las empresas aéreas un valor representativo entre el intervalo del 22 al 38 % de los gastos de la actividad aérea (Rativa-Sáenz, 2022), buscar la optimización en el uso del recurso es eje primordial para una rentabilidad futura.

Algunos estudios académicos se han realizado para predecir el consumo de combustible, acogiendo métodos de *big data*<sup>1</sup>, inteligencia artificial, redes neuronales, modelos de optimización de trayectoria de vuelo, etc. En el avance de uso de estas tecnologías, se ha utilizado el pronóstico de consumo de combustible en un entorno no aeronáutico mediante

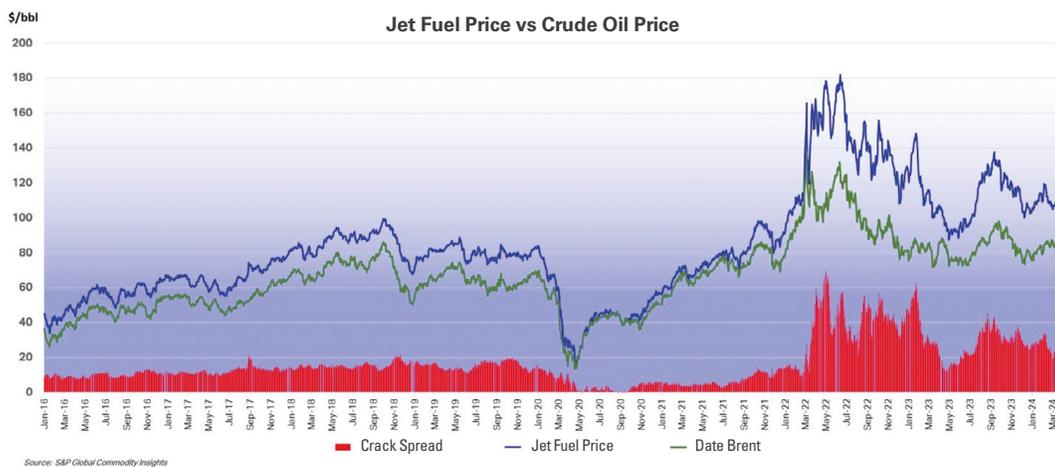


Figura 1. Histórico de precios de combustible JET A-1

Fuente: International Air Transport Association [IATA], 5 de abril de 2024.

tendencia al alza del crudo y combustible JET A-1 que permanece desde mayo de 2020. A raíz de esta problemática, que representa un porcentaje considerable

1. Concerniente a bases de datos muy grandes, cuyo procesamiento incluye algoritmos complejos de procesamiento y es utilizado con frecuencia para alimentar proyectos de inteligencia artificial y redes neuronales (Sardi *et al.*, 2020).

las tendencias de Google con base en *big data*, con el fin de generar una relación entre las exploraciones de ‘consumo de combustible’ en la herramienta de búsqueda y el consumo real de combustible (Yu *et al.*, 2019). Estos avances permiten buscar diferentes soluciones para generar una predicción eficaz del consumo de combustible general.

Adicional a lo anterior, se han desarrollado estudios para la gestión eficiente del consumo de combustible en vuelos de aeronaves mediante la creación de un modelo de optimización en la trayectoria que tiene en cuenta variables físicas como coeficiente de arrastre, velocidad de crucero, etc., lo cual permitió establecer un modelo de rendimiento de aeronave según simulaciones de manejo de tráfico aéreo, impactos ambientales, etc. (Mouillet *et al.*, 2018). El enfoque se aproxima a una predicción real del consumo de combustible mediante la creación de trayectorias de vuelo, a razón de la utilización de otros factores importantes que toman lugar cuando se realiza un vuelo en las aeronaves. Sin embargo, esta aproximación tuvo como objetivo el cálculo de rutas aéreas mas no la optimización del consumo de combustible, lo cual afecta su uso en el desarrollo del objetivo principal.

Por último, la optimización del consumo de combustible en transporte aéreo ha sido un tema recurrente desde 1973; cerca de doscientos artículos abordan el tema con propuestas de soluciones siguiendo una metodología analítica, conceptual y matemática, hasta el moldeo de simulaciones, la programación dinámica y la programación lineal (Singh & Sharma, 2015). Por tal razón, este artículo tiene el objetivo de generar una innovación al hacer uso de nuevos algoritmos de predicción, buscando formas de optimizar el consumo de combustible JET A-1.

### Aprendizaje automático (*machine learning*)

La gestión eficiente del consumo de combustible fue categorizada como un *inverse problem*, concepto que según Gallet *et al.* (2022) se refiere a la fórmula que relaciona el sistema y los datos de un ambiente específico. En el caso del pronóstico de consumo de combustible, se ha esquematizado el montaje que se

puede evidenciar en la Figura 2, en la que existen tres escenarios: el sistema, que representa el consumo del carburante; los datos, que son las variables obtenidas a través de la recopilación cíclica de antecedentes de vuelos en un determinado periodo de tiempo; y el método, que actúa como puente entre los datos y el sistema a focalizar, consistente en un algoritmo de predicción que se denominó como *inverse problem* o inteligencia artificial desarrollada.

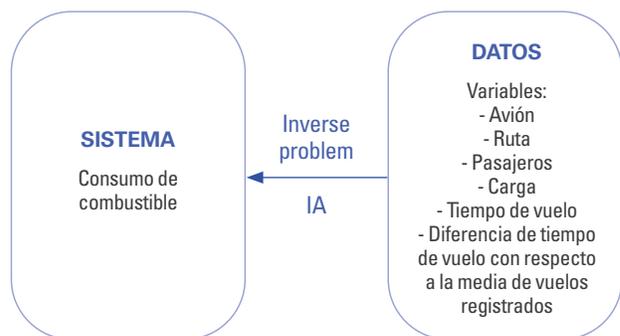


Figura 2. Esquema de problema inverso  
Fuente: elaboración propia.

Gracias a la idealización del concepto del *inverse problem* es que existen muchas de las teorías físicas que rigen nuestro día a día. El caso de la representación de la fórmula de la atracción gravitacional entre dos masas existe a razón de que se tenía un sistema, la tierra y su satélite natural, y unos datos como la masa y la distancia. Se logró describir este comportamiento por medio de una fórmula y así explicar la atracción gravitacional de los cuerpos celestes (Pizlo, 2001). La inteligencia artificial generada es la fórmula que explica la relación entre los datos y el consumo de combustible de la aeronave objeto de estudio de la aerolínea.

El manejo de los datos independientes como el avión, la ruta, el número de pasajeros, la cantidad de carga, el tiempo de vuelo y la diferencia del tiempo de vuelo en relación con la media fue realizado a través del concepto de ingeniería de características, conocido en inglés como *feature engineering*. La ingeniería de características es una serie de características que enfocan sus esfuerzos en mejorar la calidad de los datos que se usen como *dataset* en un modelo de *machine learning*. Estas técnicas conceptualizan desde el

ingreso de datos faltantes a la base de datos, hasta el escalamiento de los datos con el objetivo de ajustarlos a una misma escala y que exista una mejor correlación (Panda *et al.*, 2021).

La inteligencia artificial es un campo integrado en las ciencias computacionales, cuya finalidad es plantear modelos de predicción con un esquema paralelo a las neuronas biológicas del ser humano, mediante una serie de redes neuronales donde ingresa información, tiene sus propios pesos y genera un resultado. En la Figura 3, se puede observar la esquematización de una red neuronal en la analogía conceptual científica con una neurona biológica humana. La analogía representa las entradas de información como valores específicos, así como en una neurona biológica los pulsos eléctricos llevan información del sistema nervioso; luego se da la sinapsis, donde se encuentran los diferentes pesos que permitirán la distorsión necesaria de la información proporcionada por las dendritas; después se identifica el cuerpo celular, donde reside el umbral que permite la sumatoria de información y/o funciones de activación necesarias para procesar la información, y en una neurona biológica el núcleo procesa la información y genera un resultado; por último, se expide la información a través del axón, siendo el resultado esperado de la red neuronal un valor numérico.

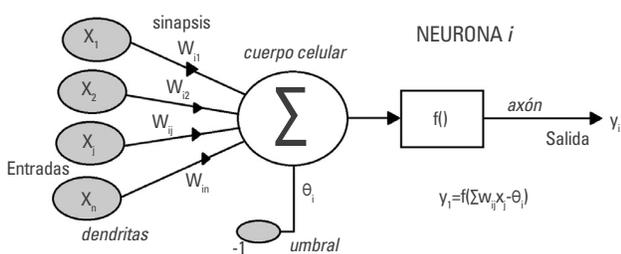


Figura 3. Esquematización de una red neuronal  
Fuente: elaboración propia.

La inteligencia artificial permite la generación de modelos de predicción y autoaprendizaje en diferentes escenarios, desde la visión computarizada hasta el reconocimiento de voz. A su vez, existen diferentes tipos de aprendizaje dentro de la computación predictiva, cada uno con ventajas y desventajas que dan paso

a una variedad de modelos de aprendizaje automatizado para cada escenario (Márquez-Díaz, 2020).

En el estudio de las tecnologías con inteligencia artificial, el aprendizaje automático (o en inglés *machine learning*) juega un papel fundamental: es un proceso que se ha utilizado para generar el modelo de predicción, por cuanto su principal función es el aprendizaje de las computadoras mediante el entrenamiento de algoritmos con datos especificados en su época de entrenamiento, con el fin de realizar tareas de clasificación, generación o conceptualización de nuevos datos (Janiesch *et al.*, 2021). La selección del aprendizaje automático genera una gran ventaja cuando se deben realizar tareas repetitivas cuyos datos caractericen una relación al resultado deseable.

Para profundizar en las diferentes secciones de *machine learning*, el aprendizaje supervisado (o en inglés *supervised learning*) es un modelo de predicción entrenado con datos etiquetados con anterioridad, que tiene el objetivo de generar un modelo de IA capaz de clasificar o producir datos con etiquetas usadas en una escala física; el algoritmo es usado para análisis de texto (NLP), visión computacional o generación de datos a partir de la relación entre ellos (Baevski *et al.*, 2022). Debido a la capacidad de generación de datos del aprendizaje supervisado, fue posible generar el pronóstico de consumo de combustible mediante un algoritmo especializado para los datos que se habían obtenido.

La idealización de un modelo de predicción implica, de igual manera, seleccionar la clasificación correcta de aprendizaje automático supervisado. *Random forest* fue el algoritmo adecuado para la generación de los datos dependientes o la cantidad de combustible para efectos prácticos. El algoritmo tiene la misión de generar árboles de decisión sobre un conjunto de datos de entrenamiento, los cuales trabajan con un subconjunto aleatorio de variables y cada árbol llega hasta su máxima extensión. Luego de obtener un resultado por cada árbol, se realiza un proceso de *soft voting*<sup>2</sup> si

<sup>2</sup> Algoritmo que es utilizado para combinar pronósticos de varios clasificadores o árboles mediante la probabilidad de estas (Fieri y Suhartono, 2023).

la variable es categórica, o de promedio si es numérica, lo que permite una precisión elevada en comparación con otros modelos de predicción similares (Espinoza-Zúñiga, 2020). En la Figura 4, se puede visualizar de manera gráfica el proceso de un algoritmo de *random forest* para la generación o clasificación de datos.

se observan las secciones de los diferentes algoritmos que componen el objetivo del presente artículo.

La evaluación de un modelo de predicción se realiza mediante métricas estadísticas, las más conocidas son MAE, MSE y RMSE<sup>3</sup>. La primera, el MAE, toma la diferencia entre el resultado esperado y el resultado

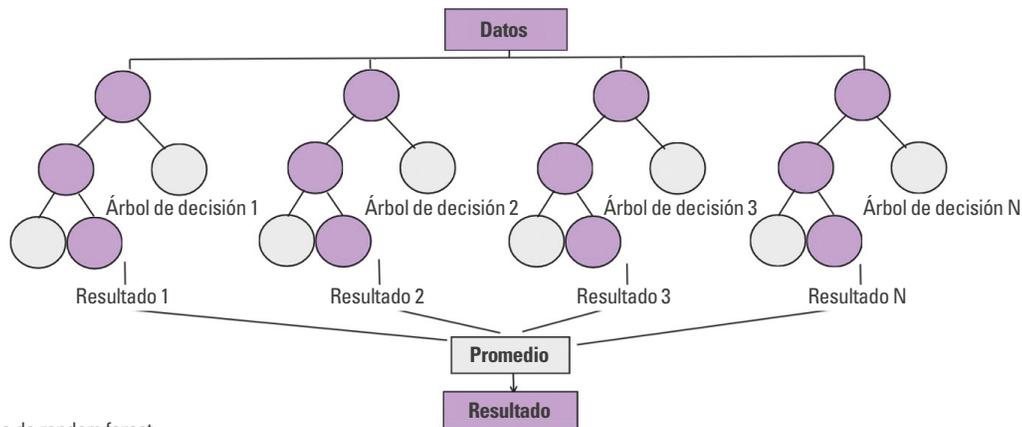


Figura 4. Esquema de random forest  
Fuente: elaboración propia.

Dentro de la solución planteada para la aplicación de un modelo predictivo de consumo de combustible, es crucial conocer la clasificación idónea para el uso del algoritmo de *random forest*. La inteligencia artificial engloba diferentes metodologías y *machine learning* es el concepto más utilizado para la creación de procedimientos de automatización, pues dentro de este se encuentran las metodologías de aprendizaje supervisado, las cuales se conforman por métodos en que los datos para entrenamiento ya están etiquetados, sabiendo su unidad de medida y alcance. Finalmente, tenemos al *random forest*, algoritmo seleccionado para la resolución de la problemática planteada (Duarte y Berton, 2023). En la Figura 5,

obtenido, realiza una sumatoria y la divide entre el número total de cantidad de la muestra; el resultado se presenta en las unidades utilizadas y su ventaja radica en la facilidad del análisis. Las otras dos, el MSE y la RMSE, son similares. La primera corresponde a la diferencia cuadrática de los valores esperados y obtenidos, haciendo sumatoria de estas sustracciones y la división con el total de unidades de la muestra; mientras que la segunda toma el valor del MSE y realiza el proceso de radicación. Las ventajas de utilizar estas dos métricas radican en la penalización de los errores más grandes. Sin embargo, el MSE no utiliza las unidades esperadas, es razón primordial que la RMSE sea más utilizada que el anterior (Hodson, 2022). En todas las métricas expuestas, se busca que el resultado sea lo más cercano a 0, lo que indicaría que la diferencia entre los resultados esperados y obtenidos es nula y que el modelo de predicción es perfecto. En la Tabla 1, se observa la comparación entre las tres métricas utilizadas.

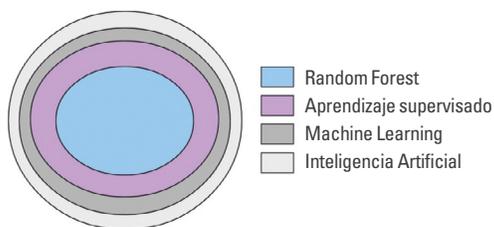


Figura 5. Esquema de IA a random forest  
Fuente: elaboración propia.

3 Respectivamente: error absoluto medio, error cuadrático medio y raíz del error cuadrático medio, por sus siglas en inglés.

Tabla 1.  
Métricas de modelo de predicción

Métrica	Fórmula	Unidades	Ventaja	Desventaja
MAE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  y_1 - \hat{y}_i $	Las mismas de los datos.	Mejor comprensión, uso comercial.	No penaliza errores grandes.
MSE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_1 - \hat{y}_i)^2$	Las mismas de los datos al cuadrado.	Penalización de errores grandes.	No maneja las mismas unidades que los datos.
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_1 - \hat{y}_i)^2}$	Las mismas de los datos.	Penalización de errores grandes, unidades iguales que los datos.	Posible sesgo a errores grandes poco frecuentes.

Fuente: elaboración propia.

## Método

La metodología propuesta en este estudio se fundamenta en el enfoque CRISP-MD, estructurado en cuatro etapas principales, tal como se ilustra en la Figura 6. Este enfoque sistemático comienza con un análisis exploratorio de datos, donde se examina detenidamente el conjunto de datos para comprender sus características y patrones subyacentes. A continuación, se procede a la identificación de las características clave de los datos, lo que permite una mejor comprensión de las

variables significativas que contribuyen al fenómeno en estudio. La tercera etapa consiste en la creación del modelo, donde se emplean técnicas de aprendizaje automático o estadísticas para desarrollar una representación matemática del fenómeno. Finalmente, se realiza una evaluación exhaustiva del modelo, aplicando métricas y pruebas relevantes para determinar su precisión, robustez y aplicabilidad en contextos específicos. Esta metodología integral garantiza un enfoque sistemático y riguroso para el análisis de datos, alineado con los estándares científicos actuales (Schröer *et al.*, 2021).

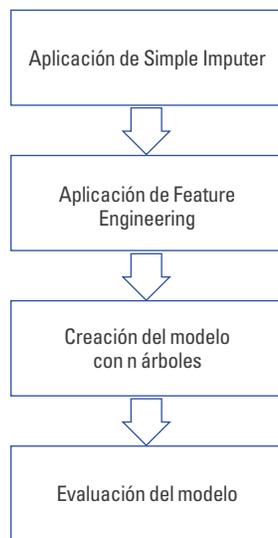


Figura 6. Flujograma de creación del modelo  
Fuente: elaboración propia.

## Aplicación de la imputación simple

Durante la fase de análisis exploratorio de datos (AED), se identificó una deficiencia en el conjunto de datos, particularmente en relación con la falta de información en ciertas variables críticas. Esta carencia requirió la implementación del primer procedimiento de ingeniería de características, utilizando una clase específica del módulo Sci-Kit Learn en Python. Dicha clase ofrece varias estrategias para imputar los valores ausentes, como la media, la mediana, la moda o una constante predefinida. Tras un cuidadoso examen y evaluación de estas metodologías, se determinó que la imputación mediante la media era la más congruente con la naturaleza de los datos en cuestión. Por lo tanto, esta estrategia se aplicó a todas las columnas relevantes en las que se había detectado la omisión de

información, con el objetivo de prevenir cualquier posible sesgo en futuras interpretaciones o análisis, en caso de que el modelo asumiera de manera predeterminada un valor nulo o cero para los datos faltantes.

## Ingeniería de características

A raíz de obtener los datos adecuados, era necesario realizar un ajuste a sus escalas dado que se trataban de diferentes variables. En el lenguaje de programación Python, existen varias herramientas para realizar el escalamiento: *standard*, *min-max scaled*, *quantile scaled*, *max-abs scaled*, *power scaled* y *robust scaled*. Todas estas provienen del módulo Sci-Kit Learn en su sección de *preprocessing*. En la Figura 7, se puede evidenciar de manera gráfica el cambio de escala de los datos utilizados, incluyendo su escala original. El objetivo de la realización de los escalamientos es disminuir la diferencia de unidades de medida entre las variables estudiadas y evitar la consecuencia de posibles sesgos de este escenario.

Se observan diferentes comportamientos de las variables en distintos escenarios, donde las variables ‘Carga’, ‘PAX’, ‘Diferencia’ y ‘Tvuelo\_min’ cambian su escala debido a la característica aplicada. Las variables utilizadas corresponden a las cantidades pertinentes por vuelo en una aeronave específica, a saber: la primera variable se refiere a la cantidad de carga aérea en kilogramos; ‘PAX’ es la abreviación de cantidad de pasajeros; ‘Diferencia’ radica en el procedimiento aritmético de resta entre el promedio de duración del vuelo y la duración estimada en minutos; por último, ‘Tvuelo\_min’ conceptualiza la duración estimada del vuelo en minutos.

## Creación del modelo

La implementación del algoritmo de *random forest* para nuestros datos se realizó a través de la clase Random Forest Regressor; sin embargo, fue necesario dividir los datos obtenidos en dos: datos de entrenamiento y datos de prueba. Los datos de entrenamiento

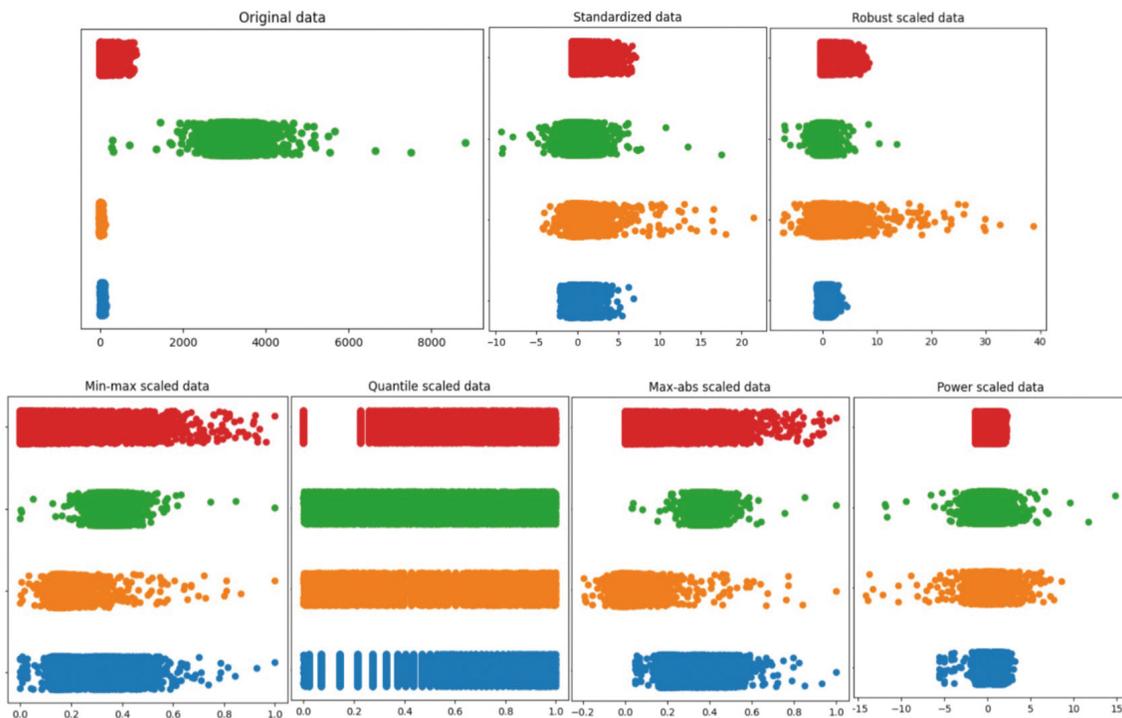


Figura 7. Características aplicadas al conjunto de datos  
Fuente: elaboración propia.

usualmente representan el 80 % del total de los datos disponibles y ayudarán a entrenar el modelo de predicción; por su parte, los datos de prueba son el porcentual restante, en este caso el 20 %, y con estos se realizarán las pruebas con las métricas de MAE, MSE y RMSE, y se evidencia la calidad del modelo. Esta división se realiza con el fin de evitar el *overfitting*.

El *overfitting* es un problema que se puede encontrar al entrenar modelos de predicción supervisados, y tiene lugar cuando el modelo memoriza los datos de entrada y su relación con el resultado esperado, pero no aprende a relacionarlos, lo cual ocasiona un caos cuando se enfrenta a nuevos datos que no estaban en el *dataset* de entrenamiento (Ying, 2019). Un ejemplo de este suceso se evidencia cuando un estudiante de primaria se encuentra en el proceso de aprendizaje de los productos básicos; sin embargo, por diversos factores, no aprende el proceso detrás del producto, que es la abreviación de la adición, sino que memoriza los productos y sus múltiplos, por lo cual cuando se enfrenta a nuevos múltiplos o en un diferente orden no será capaz de responder correctamente.

Para evitar este inconveniente, se hace uso de la clase *train\_test\_split*, lo que permitirá la división necesaria de los datos. Se hace uso de esta clase para separar los datos y también se da la utilización de la clase de Random Forest Regressor con una cantidad de árboles de decisión indicada por la variable de *n\_estimators*, siendo una cantidad utilizada de 500. Se obtiene el modelo para su ajuste con la opción *fit* y se hace uso de él con las variables independientes de prueba para generar unos valores dependientes con el modelo desarrollado gracias a la función *.predict*.

## Evaluación modelo

Finalmente, tras la obtención de las variables dependientes utilizando el modelo generado, se llevó a cabo una evaluación meticulosa de la predicción mediante la implementación de métricas específicas, como el MAE, el MSE y la RMSE. Para llevar a cabo esta evaluación, se importó la clase *metrics* del módulo Sci-Kit Learn. El proceso de aplicación de estas funciones de evaluación, que toman como entrada los valores de

prueba y los valores pronosticados por el modelo, se da por medio de las funciones *mean\_absolute\_error*, *mean\_squared\_error* y la raíz de la anterior función para sus homólogos MAE, MSE y RMSE, respectivamente.

## Resultados

El modelo predictivo desarrollado utilizando la biblioteca Sci-Kit Learn y la técnica de *random forest* ha demostrado una capacidad adecuada para predecir el consumo de combustible, con errores bajos reflejados en las métricas de MAE, MSE y RMSE. A través de la ingeniería de características y la inclusión de variables como tiempo de vuelo, carga, cantidad de pasajeros y promedio de tiempo de vuelo, se observó una variabilidad significativa en el consumo de combustible. Los resultados destacaron que los incrementos en la carga, los pasajeros y las variaciones en el tiempo de vuelo condujeron a una predicción del consumo de combustible.

Tras llevar a cabo el entrenamiento del algoritmo de aprendizaje supervisado destinado a la predicción del consumo de combustible para vuelos regionales en una aerolínea colombiana, se procedió a una evaluación meticulosa del desempeño del modelo en cada enfoque de ingeniería de características implementado. La evaluación fue diseñada para medir la precisión y eficacia del modelo en la predicción de variables complejas, reflejando así la aplicabilidad de diferentes técnicas de ingeniería de características. Una comparación detallada entre los enfoques se presenta en la Tabla 2, y permite un análisis riguroso y profundo de cómo cada método contribuyó al rendimiento global del modelo. Este análisis comparativo es vital para identificar las técnicas más prometedoras y para orientar futuras investigaciones y desarrollos en la predicción eficiente del consumo de combustible en el contexto de la aviación regional en Colombia.

La tabla presentada ilustra la aplicación de seis técnicas de escalado: *standard scaled*, *min-max scaled*, *quantile scaled*, *max-abs scaled*, *power scaled* y *robust scaled*, las cuales fueron implementadas como parte

del proceso de ingeniería de características en los datos de entrenamiento utilizados en el algoritmo de aprendizaje automático desarrollado. La efectividad de cada técnica se evaluó con rigurosidad mediante tres métricas estandarizadas comúnmente utilizadas en la valoración de algoritmos de pronóstico cuantitativos: el MAE, el MSE y la RMSE. Estas métricas ofrecen una valoración cuantitativa y objetiva de la precisión de los valores pronosticados por el modelo.

Tabla 2.  
Métricas finales

Feature	MAE (kilogramos de combustible)	MSE (kilogramos cuadrados de combustible)	RMSE (kilogramos de combustible)
<i>Standard scaled</i>	23,9867	1319,0599	36,3188
<i>Min-max scaled</i>	23,5430	1286,4400	35,8669
<i>Quantile scaled</i>	23,5402	1286,1340	35,8627
<i>Max-abs scaled</i>	23,5425	1286,3764	35,8660
<i>Power scaled</i>	23,5420	1288,4789	35,8953
<i>Robust scaled</i>	23,5037	1285,0845	35,8480

Fuente: elaboración propia.

Entre las técnicas evaluadas el método *robust scaled* se distinguió por su rendimiento superior, prevaleciendo sobre otras técnicas en todas las métricas cuantitativas analizadas. Con un MAE de 23,5037, un MSE de 1285,0845 y una RMSE de 35,8480, este enfoque demostró una capacidad destacada para generar predicciones precisas del consumo de combustible. Tales predicciones reflejan con gran aproximación el consumo real de combustible en vuelos regionales de una aerolínea comercial colombiana, y evidencian la efectividad del modelo en contextos operativos reales.

Los valores derivados de estas métricas indican que el modelo empleando la técnica de *robust scaled* exhibe un error promedio aproximado de 23 kg de combustible y alcanza un máximo de 36 kg en el escenario menos favorable. Estos hallazgos son prometedores, ya que evidencian un progreso notable en la implementación de inteligencia artificial para la predicción precisa del consumo de combustible dentro del sector aeronáutico colombiano. Además, la adopción de este

modelo podría conducir a una gestión más eficiente del combustible, resultando en una reducción significativa de los costos operativos habituales. Finalmente, los resultados no solo representan un avance tecnológico para la industria aeronáutica, sino que también fomentan la sostenibilidad y la eficiencia económica en Colombia.

## Discusión

En la creación del diseño de un algoritmo de inteligencia artificial para el pronóstico de consumo de combustible, se observó que además de las variables consideradas para el estudio y entrenamiento de la red neuronal, se debieron considerar más factores indispensables que tienen gran relevancia durante el vuelo de cualquier aeronave comercial en Colombia.

- **Condiciones meteorológicas:** La variabilidad en las condiciones meteorológicas afecta significativamente el consumo de combustible al alterar las rutas de vuelo y los tiempos de vuelo. El modelo mostró sensibilidad a estas variaciones dado que no se tuvo ningún estado de clima afectando las métricas de evaluación; sin embargo, la integración de datos meteorológicos más detallados y en tiempo real podría mejorar la robustez del modelo (Cheung *et al.*, 2023).
- **Tráfico aéreo:** Las condiciones de tráfico aéreo, incluyendo la congestión y las rutas alternativas, tienen un impacto significativo en el consumo de combustible. Durante periodos de alta congestión, los aviones pueden requerir rutas más largas o tiempos de espera en vuelo, lo cual inevitablemente aumenta el consumo de combustible. Este factor puede introducir variaciones en el modelo que no fueron completamente anticipadas en las fases iniciales de desarrollo (Rosenow *et al.*, 2019). Aumentar la integración de datos en tiempo real sobre condiciones de tráfico podría mejorar la adaptabilidad y la precisión del modelo.

- **Mantenimiento de los motores:** El estado de mantenimiento de los motores de la aeronave juega un papel crucial en el rendimiento del consumo de combustible. Motores bien mantenidos operan de manera más eficiente, consumiendo menos combustible y reduciendo las emisiones (Hassan *et al.*, 2021). Un modelo que incluya variables relacionadas con el historial de mantenimiento y la salud actual de los motores podría ofrecer predicciones más precisas, pues reflejaría el impacto directo del mantenimiento en el consumo de combustible.

Todos estos factores deben ser considerados en futuras mejoras del modelo para aumentar su precisión y aplicabilidad en condiciones operativas variables. En relación con los resultados obtenidos a través de las métricas de los diferentes *features*, se puede denotar que hay un mejor rendimiento en el *robust scaled*. El escalamiento de los datos que se presentan en este enfoque se produce al eliminar la media y la escala de los datos según los rangos de los cuantiles de manera predeterminada. El rango es entre el primer cuartil (o mediana de la primera mitad de los valores) y el tercer cuartil (o mediana de la segunda mitad de los valores), con lo que representan el vigésimo quinto cuartil y el septuagésimo quinto cuartil (Pedregosa *et al.*, 2011). El escalamiento permite evadir el sesgo que se presenta con valores extremos de los datos, lo cual ocurre al eliminar la media (o promedio) y permite que el valor de los datos cercanos a la distribución tenga un mayor impacto.

La aplicación del enfoque *robust scaled* en los datos de entrenamiento para el modelo de predicción del consumo de combustible resultó en una mejora apreciable, con un aumento cercano al 0,4994 % en las métricas de evaluación en comparación con otros métodos empleados. Es relevante destacar que este escalamiento o enfoque aplicado a los datos contribuyó a atenuar el sesgo y, por lo tanto, a neutralizar los efectos adversos que los valores atípicos pudieran tener en modelos de predicción fundamentados en datos de entrenamiento.

Por otro lado, los datos obtenidos de las métricas presentan una desviación considerable, evidenciando

un desajuste aproximado del 25 % en relación con los datos reales. Este desarreglo podría ser indicativo de la influencia de los factores mencionados antes. Para optimizar el modelo de predicción, se requiere un análisis detallado y riguroso que abarque desde la inclusión de datos faltantes hasta la evaluación de la cantidad de árboles de decisión utilizados en el modelo, y también la consideración de la cantidad de datos de entrenamiento disponibles, además de buscar un conjunto de datos que pueda tener en cuenta.

## Conclusiones

La implementación de algoritmos de *machine learning* para predecir el consumo de combustible en vuelos regionales ha demostrado ser una herramienta eficaz en la mejora de la planificación estratégica de una aerolínea colombiana, cumpliendo así el objetivo principal del estudio. Esta tecnología ha permitido a la aerolínea optimizar la gestión de su inventario de combustible, lo cual se traduce en decisiones más informadas sobre compras y almacenamiento. Al prever con precisión el consumo necesario por vuelo, la empresa ha logrado evitar tanto la escasez como el exceso en sus reservas, optimizando recursos y mejorando las utilidades.

Adicional a lo anterior, la aplicación de estos modelos predictivos ha contribuido a una reducción significativa de los costos operativos. La optimización en la planificación de vuelos ha minimizado los trayectos vacíos o subutilizados, maximizando así la eficiencia operativa y reduciendo gastos superfluos, lo cual se alinea directamente con el objetivo de mejorar la rentabilidad a través de tecnologías avanzadas.

Finalmente, la adopción de algoritmos de *machine learning* ha fomentado la colaboración entre la industria aeronáutica, el gobierno y la academia en Colombia, fortaleciendo el ecosistema tecnológico y promoviendo la innovación y el desarrollo de capacidades locales. Este enfoque colaborativo y de innovación tecnológica ha tenido un impacto positivo en la economía nacional y en la creación de oportunidades laborales en el sector tecnológico.

## Referencias

- Baevski, A., Hsu, W.-N., Xu, Q., Babu, A., Gu, J. y Auli, M. (2022). data2vec: A General Framework for Self-Supervised Learning in Speech, Vision and Language. *Proceedings of Machine Learning Research*, 162, 1298-1312. <https://proceedings.mlr.press/v162/baevski22a.html>
- Cándaño-Viñas, L. y Gómez, M. (2023). El impacto de la COVID-19 en la demanda turística internacional. *ININEE CIENCIA: Revista de Investigación Científica*, 1(1), 23-38. <https://doi.org/10.33110/inineeciencia.v1i1.5>
- Cheung, J. C. H., Wells, C. A. y Steele, E. C. C. (2023). Evaluation of Methods of Estimating Time-Optimal Flight Routes in a Changing Climate. *Meteorological Applications*, 30(2). <https://doi.org/10.1002/met.2121>
- Duarte, J. M. y Berton, L. (2023). A Review of Semi-Supervised Learning for Text Classification. *Artificial Intelligence Review*, 56(9), 9401-9469. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10393-8>
- Espinosa-Zúñiga, J. J. (2020). Aplicación de algoritmos Random Forest y xGBoost en una base de solicitudes de tarjetas de crédito. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 21(3), 1-16. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.022>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M. y Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(85), 2825-2830. <https://tinyurl.com/5r9a3xsy>
- Fieri, B. y Suhartono, D. (2023). Offensive Language Detection Using Soft Voting Ensemble Model. *MENDEL: Soft Computing Journal*, 29(1), 1-6. <https://doi.org/10.13164/mendel.2023.1.001>
- Gallet, A., Rigby, S., Tallman, T. N., Kong, X., Hajirasouliha, I., Liew, A., Liu, D., Chen, L., Hauptmann, A. y Smyl, D. (2022). Structural Engineering from an Inverse Problems Perspective. *Proceedings of the Royal Society*, 478(2257). <http://doi.org/10.1098/rspa.2021.0526>
- Girón-Girón, L. Á. (2023). Estimación de demanda de transporte aéreo de pasajeros desde un enfoque de redes para aeropuertos tipo hub: caso Aeropuerto El Dorado Bogotá (tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio institucional UNAL. <https://tinyurl.com/56beb5c6>
- Hassan, T. H., Sobaih, A. E. E. y Salem, A. E. (2021). Factors Affecting the Rate of Fuel Consumption in Aircrafts. *Sustainability*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/su13148066>
- Hodson, T. O. (2022). Error cuadrático medio (RMSE) o error absoluto medio (MAE): cuándo usarlos o no. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481-5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
- International Air Transport Association (IATA). (2024, abril 5). *Jet Fuel Price Monitor* [en línea]. <https://tinyurl.com/n27pdcaz>
- Janiesch, C., Zschech, P. y Heinrich, K. (2021). Machine Learning and Deep Learning. *Electron Markets*, 31, 685-695. <https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2>
- Lozano, C., Melo, P., Bermúdez, J., González, S. y Fuentes, S. (2023). *Integración de algoritmos de inteligencia artificial en función del pronóstico de consumo de combustible en aeronaves ERJ 145 de una aerolínea colombiana* [ponencia]. VII Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica (CAIA 7), La Plata, Argentina, 29 de noviembre al 1 de diciembre de 2023. <https://tinyurl.com/2sr8kmp6>
- Márquez Díaz, J. (2020). Inteligencia artificial y Big Data como soluciones frente a la COVID-19. *Revista de Bioética y Derecho*, (50), 315-331. <https://tinyurl.com/mr3mvac5>
- Morrison, J. K. D., Bonnefoy, P. A. y Hansman, R. J. (2010). *Investigation of the Impacts of Effective Fuel Cost Increase on the US Air Transportation Network and Fleet* [ponencia]. 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 13-15 de septiembre de 2010. <https://tinyurl.com/vyjhrd9y>
- Mouillet, V., Nuic, A., Casado, E. y López-Leonés, J. L. (2018). *Evaluación de la aplicabilidad de un modelo moderno de rendimiento de aeronaves para la optimización de trayectorias*. IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 23-27 de septiembre de 2018. <https://doi.org/10.1109/dasc.2018.8569732>
- Orellano-Lasprilla, J. L. (2023). *Análisis fluido dinámico computacional de un mezclador estático para combustible de aviación JET A-1 y biodiesel* (tesis de maestría, Universidad ECCI). Repositorio institucional ECCI. <https://doi.org/10.1109/DASC.2018.8569732>
- Panda, M., Mousa, A. A., & Hassanién, A. E. (2021). Developing an efficient feature engineering and machine learning model for detecting IOT-botnet cyber attacks. *IEEE Access*, 9, 91038-91052. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3092054>

- Pizlo, Z. (2001). Perception Viewed as an Inverse Problem. *Vision Research*, 41(24), 3145-3161. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(01\)00173-0](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(01)00173-0)
- Rativa-Sáenz, E. A. (2022). Análisis de series de tiempo para la estimación del consumo combustible en aeronaves ATR42 para aerolínea colombiana (tesis de especialización, Fundación Universitaria Los Libertadores). <https://tinyurl.com/3eaay68a>
- Rosenow, J., Fricke, H., Luchkova, T. y Schultz, M. (2019). Impact of Optimised Trajectories on Air Traffic Flow Management. *The Aeronautical Journal*, 123(1260), 157-173. <https://doi.org/10.1017/aer.2018.155>
- Sardi, A., Sorano, E., Cantino, V. y Garengo, P. (2020). Big Data and Performance Measurement Research: Trends, Evolution and Future Opportunities. *Measuring Business Excellence*, 27(4), 531-548. <https://doi.org/10.1108/mbe-06-2019-0053>
- Schröer, C., Kruse, F. y Gómez, J. M. (2021). A Systematic Literature Review on Applying CRISP-DM Process Model. *Procedia Computer Science*, 181, 526-534. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2021.01.199>
- Singh, V., & Sharma, S. K. (2015). Fuel consumption optimization in air transport: A review, classification, critique, simple meta-analysis, and future research implications. *European Transport Research Review*, 7(2). <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0160-x>
- Ying, X. (2019). An Overview of Overfitting and its Solutions. *Journal of Physics: Conference Series*, 1168. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1168/2/022022>
- Yu, L., Zhao, Y., Tang, L. y Yang, Z. (2019). Online Big Data-Driven Oil Consumption Forecasting with Google Trends. *International Journal of Forecasting*, 35(1), 213-223. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2017.11.005>

# Ciencia y Poder Aéreo

Revista Científica de la Escuela de Postgrados  
de la Fuerza Aérea Colombiana  
ISSN 1909-7050 - E-ISSN 2389-9468

— **Presentación.** La revista científica *Ciencia y Poder Aéreo* es una publicación semestral, editada por la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana. Su objetivo es comunicar los resultados de investigación en los temas de Desarrollo Espacial, AD Astra; Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica; Gestión y Estrategia; Tecnología e Innovación; y Educación y TIC. La publicación busca, además, contribuir al desarrollo tecnológico y científico del país, generando nuevo conocimiento y propiciando espacios de discusión y reflexión.

— **Misión.** La misión de la revista *Ciencia y Poder Aéreo* es fomentar la divulgación del conocimiento en torno al sector aeroespacial mediante la publicación de artículos originales e inéditos en las áreas de Desarrollo Espacial AD ASTRA, Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica, Gestión y Estrategia, Tecnología e Innovación, y Educación y TIC; producto de actividades científicas de investigación con alta calidad y pertinencia social. Se contribuye, de esta manera, al desarrollo económico, industrial y humano del país.

— **Visión.** La revista *Ciencia y Poder Aéreo*, alienada con la estrategia de la Fuerza Aérea Colombiana, será, para el 2042, un referente regional y global para la divulgación del conocimiento científico en la integración de capacidades militares y civiles del sector aeroespacial, en las áreas de Desarrollo Espacial AD ASTRA, Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica, Gestión y Estrategia: modelos de planeación estratégica, Tecnología e Innovación, y Educación y TIC, tanto en el campo

de la ingeniería como en las ciencias sociales. Por lo tanto, la revista hará parte de las mejores bases de datos especializadas y estará indexada en Scopus y Web of Science.

— **Público.** La revista *Ciencia y Poder Aéreo* está dirigida a la comunidad científica nacional e internacional, estudiantes, profesores, docentes, investigadores; miembros de las Fuerzas Militares y del sector aeroespacial.

— **Política Editorial.** Dentro de la Política editorial de la revista *Ciencia y Poder Aéreo* se incluye un aparte dirigido a la ética frente a las responsabilidades del autor, del árbitro y el proceso de evaluación, así como del proceso editorial.

— **Ética de la Revista.** La revista se acoge a las *Ethical guidelines for journal publication* de Elsevier. Según estas, los artículos presentados a la revista deben ser originales e inéditos y estos no deben estar simultáneamente en proceso de evaluación ni tener compromisos editoriales con ninguna otra publicación. Si el manuscrito es aceptado, el editor espera que su aparición anteceda a cualquier otra publicación total o parcial del artículo. Cuando la revista tiene interés de publicar un artículo que ya ha sido previamente publicado, el autor deberá solicitar la autorización correspondiente a la editorial que realizó la primera publicación y dirigirla al editor.

— **Reserva de Derechos.** Excepto cuando se indique lo contrario, el contenido en este sitio es licenciado bajo una licencia Creative Commons Atribución 4.0 internacional. La licencia permite a cualquier usuario descargar, imprimir, extraer, archivar, distribuir y comunicar públicamente este artículo, siempre y cuando el crédito se dé a los autores de la obra: al autor (es) del texto y a la revista científica *Ciencia y Poder Aéreo* de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.

# Ciencia y Poder Aéreo

**Scientific Journal of the Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana**  
ISSN 1909-7050 - E-ISSN 2389-9468

— **Aim and Scope.** *Ciencia y Poder Aéreo* is a biannual scientific journal, of open access, which receives articles indistinctly in Spanish, English and Portuguese, and is edited by the Escuela de Postgrados Fuerza Aérea. It is aimed to contribute to the dissemination of research results on the fields Space Development, AD Astra; Operational Safety and Aviation Logistics; Management and Strategy; Technology and Innovation; and Education and TIC. The journal also seeks to contribute to Colombian technological and scientific development, generating new knowledge and creating opportunities for discussion and reflection.

— **Mission.** The mission of the *Ciencia y Poder Aéreo* journal is to promote the dissemination of knowledge about the aerospace sector through the publication of original and unpublished articles in the areas of AD Astra Space Development, Operational Safety and Aeronautical Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation and Education and TIC; product of scientific research activities with high quality and social relevance. In this way, it contributes to the economic, industrial and human development of the country.

— **Vision.** The journal *Ciencia y Poder Aéreo*, aligned with the strategy of the Fuerza Aérea Colombiana, will be, by 2042, a regional and global benchmark for the dissemination of scientific knowledge in the integration of military and civil capabilities of the aerospace sector, in the areas of

AD Astra Space Development, Operational Safety and Aeronautical Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation, and Education and TIC, both in the field of engineering and social sciences. Therefore, the journal will be part of the best specialized databases and will be indexed in Scopus and Web of Science.

— **Audience.** *Ciencia y Poder Aéreo* is addressed to the national and international scientific community, students, professors, trainers, researchers, members of the Colombian Military Forces, and members of the aerospace industry.

— **Editorial Policy.** In its editorial policy, *Ciencia y Poder Aéreo* includes a code of ethics on the responsibilities of authors and reviewers, and on the evaluation and the editorial process.

— **Journal Ethics.** The journal complies with Elsevier Ethical Guidelines for Journal Publication. According to these, submissions must be original and unpublished works and must not be simultaneously in evaluation nor have editorial commitments with any other publication. If the manuscript is accepted, the editor expects its appearance to precede any other full or partial publication. When the journal is interested in publishing a paper that has already been published, the author must request authorization from the publisher that made the first publication and refer this information to the editor.

— **Copyright and Licensing.** Except when otherwise indicated, this site and its contents are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. Under the terms of this license, users are free to download, print, extract, archive, distribute and publicly communicate the content of articles, provided that proper credit is granted to authors and *Ciencia y Poder Aéreo*, scientific journal of the Escuela de Postgrados Fuerza Aérea.

# Ciencia y Poder Aéreo

Revista científica da Escuela de Postgrados  
de la Fuerza Aérea Colombiana  
ISSN 1909-7050 - E-ISSN 2389-9468

— **Enfoque e alcance.** A revista científica *Ciencia y Poder Aéreo* é uma publicação semestral, acesso aberto, que recebe artigos indistintamente em espanhol, inglês e português e é editada pela Escuela de Postgrados Fuerza Aérea. Seu objetivo é comunicar os resultados de pesquisa nos temas de Desenvolvimento Espacial, AD Astra; Segurança Operacional e Logística na Indústria Aeronáutica; Gestão e Estratégia; Tecnologia e Inovação; e educação e TIC. Além disso, a publicação busca contribuir ao desenvolvimento tecnológico e científico do país, gerando novo conhecimento e propiciando espaços de discussão e reflexão.

— **Missão.** A revista *Ciencia y Poder Aéreo* tem como missão promover a difusão do conhecimento sobre o setor aeroespacial por meio da publicação de artigos originais e inéditos nas áreas de Desenvolvimento Espacial AD Astra, Segurança Operacional e Logística Aeronáutica, Gestão e Estratégia, Tecnologia e Inovação, e Educação e TIC, produto de atividades de pesquisa científica de alta qualidade e relevância social. Desta forma, contribui para o desenvolvimento econômico, industrial e humano do país.

— **Visão.** A revista *Ciencia y Poder Aéreo*, alinhada com a estratégia da Fuerza Aérea Colombiana, será, até 2042, uma referência regional e global para a difusão do conhecimento científico na integração das capacidades militares e civis do setor aeroespacial, nas áreas de Desenvolvimento Espacial AD Astra, Segurança Operacional e Logística Aeronáutica, Gestão

e Estratégia, Tecnologia e Inovação, e Educação e TIC, ambos no campo da engenharia e ciências sociais. Assim, a revista fará parte das melhores bases de dados especializadas e será indexada na Scopus e Web of Science.

— **Público.** A revista *Ciencia y Poder Aéreo* está dirigida à comunidade científica nacional e internacional, estudantes, professores, docentes, pesquisadores; membros das Forças Militares, e da indústria aeroespacial.

— **Política Editorial.** Na Política editorial da revista *Ciencia y Poder Aéreo* é incluída uma seção destinada à ética em relação as responsabilidades do autor, do árbitro e do processo de avaliação assim como do processo editorial.

— **Ética da Revista.** A revista está sujeita às *Ethical guidelines for journal publication* de Elsevier. De acordo com estas, os artigos submetidos à revista devem ser originais e inéditos e não devem estar simultaneamente em processo de avaliação em outras publicações ou órgãos editoriais. Caso o manuscrito for aceito, o editor esperará que sua publicação seja antes de qualquer outra publicação total ou parcial do artigo. Quando a revista tiver interesse em publicar um artigo que já tenha sido previamente publicado, o autor deverá solicitar a autorização correspondente à editorial que fez a primeira publicação e enviá-la ao editor.

— **Direitos de autor e licença de uso.** Exceto quando for indicado o contrário, o conteúdo deste site será licenciado sob uma licença Creative Commons Attribution 4.0 Internacional. A licença permite que qualquer usuário baixe, imprima, extraia, archive, distribua e comunique publicamente este artigo, desde que seja dado o devido crédito aos autores: ao(s) autor(es) do texto e a *Ciencia e Poder Aéreo*, revista da Escuela de Postgrados Fuerza Aérea.

# Instrucciones para autores

## — Clasificación de los artículos científicos

La revista *Ciencia y Poder Aéreo* evalúa artículos que generen nuevo conocimiento. Dentro de estos se encuentran:

**a. Artículo de investigación.** Es un documento que presenta de manera detallada los resultados originales derivados de proyectos de investigación o desarrollo tecnológico. Debe estar estructurado en introducción, revisión de literatura, metodología, discusión y conclusiones. El resumen debe ser de 150-250 palabras, el cual debe tener la misma estructura del artículo de investigación. Se recomienda que referencie mínimo 20 documentos, en su mayoría artículos de revistas indexadas, capítulos de libros y libros con DOI. Las palabras clave deben ser máximo 6. Recomendamos que estas sean tomadas del Nasa Thesaurus o del Unesco Thesaurus (ciencias sociales).

**b. Artículo de reflexión.** Es un documento original que ofrece una perspectiva analítica, reflexiva o crítica sobre un tema específico. Estos artículos deben contener una propuesta teórica o conceptual original, que pueda contribuir científicamente en las áreas de interés de la revista. El artículo tendrá que ser claro, coherente y seguir una estructura lógica. El resumen debe ser de 150-250 palabras, el cual debe tener claro el contexto del estudio, cuál es el problema, cuál es la posición y cómo se argumentará en favor de esta. Se recomienda que referencie mínimo 20 documentos en su mayoría a artículos de revistas indexadas, capítulos de libros y libros. Recomendamos que estas sean tomadas del Nasa Thesaurus o del Unesco Thesaurus (ciencias sociales).

**c. Artículo de revisión.** Es un documento que organiza, sistematiza y analiza resultados de investigación relevantes para los temas generales de la revista. Este tipo de artículos son escritos por autores que tienen un dominio en un área de investigación representada en los artículos que ha publicado. Se aceptarán revisiones de literatura, sistemáticas o metaanálisis. Los resúmenes expondrán el objetivo, los métodos (para revisiones sistemáticas o metaanálisis), los resultados y las conclusiones. El mínimo de artículos de revistas indexadas, capítulos de libros y libros que deben referenciar estos documentos son 50.

Los artículos se publicarán en español, inglés y portugués. La revista *Ciencia y Poder Aéreo* admite la presentación de artículos cuyas áreas temáticas coincidan con los que se describen a continuación:

- Desarrollo Espacial, AD Astra
- Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica.
- Gestión y Estrategia.
- Tecnología e Innovación.
- Educación y TIC.

Busca que los temas referidos estén en lo posible relacionados con el sector aeroespacial y afines, con énfasis en la ingeniería aeronáutica.

## — Directrices para autores

- Se recuerda que los artículos deben ser enviados por medio de la plataforma Open Journal System (<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>) o al correo [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)
- Es necesario cumplir con los requisitos para el documento depositados en la sección “Requisitos del texto”, dentro de los cuales se detalla el tipo de archivo preferido, el formato del documento, la fuente preferida, el puntaje de la letra, el interlineado, así como el manual de estilo seguido por *Ciencia y Poder Aéreo*.
- También se hace preciso seguir las recomendaciones éticas y del proceso consignadas en “Responsabilidades del autor”, como, el envío de una ficha de presentación; las consideraciones sobre la autoría y problemas con esta; la necesidad de proporcionar información veraz sobre la financiación y afiliación institucional; el permiso para enviar su documento a una evaluación por pares; el permiso a usar sus datos para plataformas como Publindex o Crossref; el compromiso de que el artículo es original, no se ha postulado simultáneamente a otras revistas, no es redundante, y la cesión de derechos de propiedad intelectual o patrimonial a la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.

## Normas generales

Todo artículo debe:

- Ser un documento o artículo original, no publicado previamente y no considerado en otra revista.
- Estar científicamente documentado, presentar coherencia y cohesión.

- Explicar el tipo de artículo: si corresponde a un artículo de investigación, de reflexión o de revisión.
- Detallar el proyecto de investigación, el registro (en caso de contar con este) o datos relacionados con el trabajo a presentar.
- Exponer de manera veraz la filial institucional de los autores, su perfil profesional y datos de contacto, la función desempeñada (intelectual, experimental o de escritura). También contar con un ORCID y un CVLAC, en caso de estar vinculado a una institución colombiana. Se recomienda incluir su nombre normalizado preferido teniendo en cuenta las consideraciones de la International Registry of Authors-Links to Identify Scientists (<https://www.iralis.org/>).
- Detallar si se encuentra inmerso en conflictos de interés.
- Cada propuesta de artículo se somete a la evaluación de pares, cuyo concepto es importante para la decisión de su publicación.
- Exponer posibles conflictos de interés.
- Los datos aquí depositados serán usados para la plataforma Publindex y Crossref.

## — Requisitos y estructura de los artículos

### Requisitos del texto

- Los artículos deben tener una letra Times New Roman, 12 puntos, interlineado sencillo.
- Las figuras, tablas y ecuaciones siguen las normas APA, la séptima edición. Por ejemplo, numerarlas y citarlas dentro del documento, tener en cuenta cómo se titulan cada una de ellas, basarse en el tipo de notas que debe tener cada una de ellas, describir cuál es la fuente de cada una.
- Siglas: se citará la primera vez el nombre completo y entre paréntesis la sigla. Posteriormente, solo se usará la sigla. Las siglas que se introduzcan deberán usarse a lo largo del texto.
- Citación y referencias: la citación y referencias se deben editar con base en las normas APA, séptima edición.
- Las notas al pie de página se utilizarán solo para aportes sustantivos al texto.

### Estructura para los tipos de artículos

El título debe estar en español, inglés y portugués. Como nota al pie, indicar el tipo de artículo, la información sobre la financiación de la investigación y datos asociados a esta —su grupo de investigación, el registro de proyecto, la entidad

financiadora u otra información que se considere—. El título debe tener máximo 15 palabras. Tiene que aclarar el tema del artículo y ser específico.

**Resumen:** deben estar escritos en español, portugués e inglés entre 150 y 250 palabras.

Los resúmenes de artículos de investigación (resúmenes analíticos) tienen la estructura de introducción, objetivos, método, resultados, conclusiones.

Los resúmenes de artículos de reflexión (resúmenes analíticos sintéticos) presenta los aspectos significativos del texto de una manera lógica. Este también resalta los resultados que obtuvo el autor.

Los resúmenes de artículos de revisión presentan los principales puntos de análisis (resúmenes descriptivos) ofreciendo los principales hallazgos a partir de esta comparación. En el caso de artículos de revisión sistemática o metaanálisis se sigue una estructura como la de los artículos de investigación.

**Palabras clave:** debe tener 3 a 6 en orden alfabético (tener en cuenta las palabras temáticas que proporcionan los tesauros recomendados en “Clasificación de los artículos”). Estas separadas por punto y coma (;).

Los artículos de investigación deben tener una introducción (hacer mención al problema de investigación); un método; unos resultados; la discusión; las conclusiones, recomendaciones o agradecimientos (opcional).

Las referencias deben estar en orden alfabético, siguiendo las normas APA, séptima edición. Se recomienda que sean mayoritariamente artículos en revistas indexadas o libros de editoriales académicas, haber sido publicadas en los últimos cinco años, y tener doi.

En un fichero aparte se debe incluir datos del autor: nombres, apellidos, breve currículo, filial institucional, dirección electrónica y postal (dirección lugar de trabajo o de correspondencia), números telefónicos de contacto y adscripción académica o profesional, función dentro de la realización del artículo (intelectual, experimental o escritura).

## — Preparación de envíos

Como parte del proceso de envíos, los autores están comprometidos a comprobar que su envío cumpla todos los requisitos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

1. El trabajo enviado no ha sido publicado previamente ni se ha enviado simultáneamente a otra revista.
2. El manuscrito está en formato Microsoft Word (forma de fichero electrónico .doc).
3. Los artículos deben tener una letra Times New Roman, 12 puntos, interlineado sencillo.
4. Se han presentado las referencias bibliográficas en orden alfabético siguiendo los lineamientos de las normas APA, séptima edición.
5. Todas las figuras y tablas se han situado en la posición correspondiente y no al final del texto. Estas deben ser citadas a lo largo del documento. Todas las figuras (gráficos, imágenes, fotografías) y tablas deben ser enviadas por separado en la máxima calidad o en formato editable para efectos de diseño.
6. El trabajo enviado ha sido preparado para la revisión ciega por pares, es decir, se han eliminado las referencias y los nombres de los autores de todas las partes del artículo y se han sustituido por la palabra «autor» (propiedades del documento incluidas).
7. Se han adjuntado los datos del autor en un fichero aparte con nombre, apellidos, breve currículo, filial institucional, dirección electrónica y postal (dirección lugar de trabajo o de correspondencia), números telefónicos de contacto y adscripción académica o profesional, rol (intelectual, experimental o escritura).
8. Las referencias son en su mayoría a artículos de revistas indexadas o libros académicos de máximo cinco años. Estas poseen doi o en su defecto tienen un enlace que no está caído.
9. Cesión de los derechos de propiedad intelectual. La propiedad intelectual hace referencia a las creaciones artísticas, industriales o científicas. La revista rige sus políticas de cesión de derechos de acuerdo con los siguientes principios:
  - Se han diligenciado y firmado el formato: Carta de Presentación, Licencia de Uso y Cesión de Derechos Patrimoniales. Allí los autores dejan de manifiesto que son los autores originales de las obras (también se incluyen aspectos referidos a la licencia de uso y derechos patrimoniales).
  - El equipo editorial queda, por lo tanto, exonerado de cualquier obligación o responsabilidad por cualquier acción legal que pueda suscitarse derivada de la obra depositada por la vulneración de derechos de terceros, sean de propiedad intelectual o industrial, de secreto comercial o cualquier otro.
  - Es responsabilidad de los autores obtener los permisos necesarios de las imágenes que estén sujetas a copyright.
  - Si por último se decide no publicar el artículo en la revista, la cesión de derechos mencionada quedará sin efecto, de modo que el autor recuperará todos los derechos de explotación de la obra.
  - El envío de los artículos no implica la obligatoriedad de publicarlos, pues serán sometidos a evaluación de pares ciegos; aquellos textos que a juicio del editor, el Comité Editorial o el Comité Científico llenen los requisitos exigidos y sean trabajos relacionados con el Desarrollo Espacial, AD Astra; la Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica; la Gestión y Estrategia; la Tecnología e Innovación; y la Educación y TIC.
  - Si no se indica lo contrario, se entienden aceptados la política de confidencialidad y el aviso legal de la revista en el momento de completar la entrega de su artículo y en el momento de ejecutar el formulario de registro en sitio web: [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com).

Los autores son responsables del contenido de sus artículos y materiales asociados, garantizando su originalidad y carácter inédito. La revista *Ciencia y Poder Aéreo* realiza la verificación de todos los manuscritos presentados para publicación mediante el uso del software antiplagio *iThenticate*, de tal manera que se garantice la originalidad de los manuscritos. En caso de detectar plagio, el manuscrito será descartado para su publicación.

#### Nota:

Para información adicional sobre los siguientes aspectos consulte la página web de la revista

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/about/submissions>

**Política de prevención de plagio**  
**Política de dictaminación**  
**Política de revisión y publicación**  
**Política de acceso abierto**  
**Derechos de autor y licencia de uso**

---

#### Postule sus documentos a través de la plataforma:

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>

Dirija sus inquietudes al correo electrónico:

✉ [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)

---

# Guidelines for Authors

## — Classification of Articles

*Ciencia y Poder Aéreo* accepts submissions that involve the generation of new knowledge. Among these, the following are included:

**a. Research article.** Document that presents the original results of research or technological development projects in detail. It must include introduction, literature review, methodology, discussion, and conclusions. The abstract must be 150-250 words and follow the same structure as the content of the paper. The list of references should include a minimum of 20 peer-reviewed works (especially journal articles, book chapters and books with a DOI number). A maximum of 6 keywords is recommended. These should be taken from Nasa Thesaurus or Unesco Thesaurus (Social Sciences).

**b. Research-based reflection article.** Original work that offers analytical, reflexive or critical perspectives on a specific topic. These articles must present an original theoretical or conceptual proposal that scientifically contributes to the areas of interest of the journal. The article must be clear, coherent, and follow a logical structure. The abstract should contain 150-250 words and be clear about the context of the study, the research problem, the position of the author(s), and how this will be supported through arguments. The list of references should include a minimum of 20 peer-reviewed works, particularly journal articles, book chapters and books. A maximum of 6 keywords is recommended. These should be taken from Nasa Thesaurus or Unesco Thesaurus (Social Sciences).

**c. Review Article.** Document that organizes, systematizes and provides an analysis of research results relevant to the subject areas covered by the journal. This type of article is prepared by authors with a strong domain of certain research areas, represented by the number of contributions they have published. Literature, systematic or meta-analysis reviews will be accepted. The abstract will state the objective, method (for systematic reviews or meta-analyses), results, and conclusions of the study. A minimum of 50 peer-reviewed journal articles, book chapters and/or books must be included in the list of references.

Manuscripts in Spanish, English and Portuguese will be published. *Ciencia y Poder Aéreo* accepts submissions whose subject areas match those described below:

- Space Development, AD Astra
- Operational Safety and Aviation Logistics.
- Management and Strategy.
- Technology and Innovation.
- Education and ICT.

The journal seeks that the topics addressed by authors are associated to the aerospace industry and other related sectors, with a particular focus on aeronautical engineering.

## — Guidelines for Authors

- Authors should submit their articles using the Open Journal System platform (<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>) or send them to the e-mail address [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)
- It is necessary to comply with the requirements established in the “Text requirements” section, within which the preferred file type, document format, font, font size, and line spacing are described. The style manual prepared by *Ciencia y Poder Aéreo* must also be considered before submissions.
- It is also necessary to follow the ethical and process recommendations set forth in the “Duties of authors” section, such as sending a presentation form; considerations about authorship and related issues; the need to provide accurate information on funding and institutional affiliation; permission to submit documents for peer-reviewing; grant permission to use their data in platforms such as Publindex or Crossref; stating that the article is original, has not been submitted simultaneously to other journals, and is not redundant; and accepting the transfer of intellectual or patrimonial property rights to the Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.

## General Guidelines

All submissions must:

- Be an original document, not previously published nor submitted to another journal.
- Be scientifically documented and display coherence and internal unity.

- Indicate the type of article: research paper, research-based reflection paper or review paper.
- Indicate the research project, registration (if available) and/or any related data.
- State the institutional affiliation of all authors, their professional profile and contact details, as well as their role (intellectual, experimental or writing of the paper). Authors should also include their ORCID and CVLAC information, in case of working for an institution in Colombia. It is recommended to follow the guidelines of the International Registry of Authors-Links to Identify Scientists (<https://www.iralis.org/>) for including authors names.
- Declare any conflicts of interest.
- Be subject to a peer-review process, whose concept is relevant for deciding upon their publication.
- Allow the use of information in Publindex and Crossref platforms.

## — Manuscript Requirements and Structure

### Text Requirements

- Articles must use Times New Roman font type, 12 points, single line spacing.
- Figures, tables and equations must follow APA standard, 7th edition. For example, these elements must be consecutively numbered and cited within the text, taking into account the correct style for titles, notes and source.
- Acronyms will be fully named the first time they are mentioned, with its abbreviation presented in brackets. Subsequently, only the acronym will be used. Acronyms previously introduced should be used throughout the text.
- Cites and references should follow the American Psychological Association (APA) standard, 7th edition.
- Footnotes will be only be used for adding relevant information to support the text.

### Structure for Each Type of Article

The title of all articles should be included in Spanish, English, and Portuguese. As a footnote, state the type of article, information regarding the research and other related data (research group, project registration, funding entity, and other information). The title must have a maximum of 15 words. Authors must state the subject area of their paper.

**Abstract:** should be included in Spanish, English, and Portuguese and have 150-250 words in length.

The abstract of research papers should follow this structure: introduction, methodology, results, and conclusions.

The abstract of reflection articles (synthetic abstracts) present the significant aspects of the study in a logical way, highlighting the results obtained by authors.

The abstract of review articles present the main points of analysis (descriptive summary), offering the main findings from their comparison. In the case of systematic review or meta-analysis studies, a structure similar to that of research articles should be followed.

**Keywords:** 3 to 6 in alphabetical order (consider the thematic words provided by thesauri in the “Classification of Articles” section) and separated by a semicolon (;).

Research papers must include the following sections: introduction (mention the research problem), methodology, results, discussion, conclusions, recommendations, and acknowledgments (optional).

References must be in alphabetical order, following APA standard, 7th edition. These should correspond to peer-reviewed journal articles, books published by academic editorials, have a doi number, and have been published during the last five years.

In a separate file include author(s) information, name and surname, brief curriculum vitae, institutional affiliation, e-mail and postal address (workplace address and/or mail address), contact phone numbers and academic or professional relation, and role within the production of the article (intellectual, experimental or writing of the paper).

## — Preparing your Submission

As part of the submission process, authors are committed to verifying that the submitted documents meet all of the requirements described below. Submissions that do not meet these guidelines will be returned to authors.

1. The submitted work has not been previously published nor sent simultaneously to another journal.
2. The manuscript is in Microsoft Word, Open Office or RTF format (electronic file .doc, .rtf or .odt).
3. Articles must use Times New Roman font type, 12 points, single line spacing.
4. References are presented in alphabetical order, following the guidelines of the APA standards, 7th edition.

5. All figures and tables are properly placed within the document and not at the end of the text. These should be cited in the document. All figures (graphs, images, photographs) and tables should be separately sent in high quality or an editable format for design purposes.
6. The submitted paper should be prepared for the blind peer-reviewing process, that is, references to authors' identity and names have been removed from all the document and replaced by the word «author(s)» (document properties included).
7. Authors' data should be attached in a separate file, including name and surname, brief curriculum vitae, institutional affiliation, e-mail and postal address (workplace address and/or mail address), contact phone numbers and academic or professional relation, and role within the production of the article (intellectual, experimental or writing of the paper).
8. References mostly correspond to articles in peer-reviewed journals or academic books published during the last five years. These have a doi number or an operating link.
9. Transfer of intellectual property rights. Intellectual property refers to artistic, industrial or scientific creations. The journal adopts the following principles for the transfer of intellectual property rights:
  - All authors must complete and sign the form “Presentation letter and License Use – Economic rights,” in which they manifest that they are the original authors (aspects related to the license of use and economic rights are also included).
  - The editorial team is, therefore, exonerated from any obligation or responsibility for any legal action that may arise from the submitted work regarding the violation of the rights of third parties, whether they are intellectual or industrial property, trade secret or any other.
  - It is the responsibility of authors to obtain the necessary permissions for the use of images subject to copyright.
  - In case authors decide not to publish their paper in the journal, the aforementioned rights assignment will have no effect and authors will recover all the rights for exploiting their work.
  - Submitting an article does not imply that the journal must publish such contribution, since all submissions that, in the opinion of the Editor, the Editorial Committee or the Scientific Committee, meet the requirements and address the fields of Space Development, AD Astra; Operational Safety and Aeronautical Logistics;

Management and Strategy; Technology and Innovation; and Education and TIC will be subject to a peer-review process.

- Unless otherwise stated, the confidentiality policy and the legal notice of the journal are understood as accepted at the time of completing the submission of your paper and the registration form on the website: [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)

Authors are responsible for the content of their papers and associated materials and declare their originality and unpublished character. *Ciencia y Poder Aéreo* examines all the manuscripts submitted for publication using the anti-plagiarism software iThenticate, which exposes the percentage of similarity of a given work with others already published or available in databases, thus establishing its degree of originality. *Ciencia y Poder Aéreo* follows the process recommended by the Committee on Publication Ethics regarding a possible suspicion of plagiarism. Thus, if a text reports a similarity rate of 20%, the editorial team will request adjustments to the document. When this similarity represents a greater rate or corresponds to complete and significant blocks of text, the document will be considered plagiarized and the editorial team will proceed to ask the authors for explanations. If these are not satisfactory, the manuscript will be automatically rejected.

#### Note:

For additional information on the following aspects, please visit the journal website:

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/about/submissions>

**Plagiarism Prevention Policy**  
**Initial Assessment Policy**  
**Peer-reviewing Process**  
**Open Access Policy**  
**Copyright and Licensing**

---

#### Submit your documents through the platform:

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>

Direct your questions to the e-mail:

✉ [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)

---

# Diretrizes para autores

## — Classificação dos artigos científicos

A revista *Ciencia y Poder Aéreo* avalia artigos de pesquisa que promovam novos conhecimentos. Dentro destes pode-se encontrar:

**a. Artigo de pesquisa.** Documento que apresenta de forma detalhada os resultados originais derivados de projetos de pesquisa ou desenvolvimento tecnológico. Deve estar estruturado em introdução, revisão da literatura, metodologia, discussão e conclusões. O resumo deve ter no mínimo 150 e, no máximo 250 palavras, e deve ter a mesma estrutura do artigo de pesquisa. É recomendado que, no mínimo, 20 documentos sejam referenciados, em sua maioria artigos de revistas indexadas, capítulos de livros e livros com DOI. As palavras-chave devem ser no máximo 6. Do mesmo modo, é recomendado que estas sejam tomadas do Nasa Thesaurus ou de Unesco Thesaurus (ciências sociais).

**b. Artigo de reflexão.** Documento original que apresenta uma perspectiva analítica, reflexiva ou crítica sobre uma temática específica. Contudo, este artigo deve conter uma proposta teórica ou conceitual original que possa contribuir cientificamente nas áreas de interesse da revista. O artigo tem que ser claro, coerente e seguir uma estrutura lógica. O resumo deve ter de 150 a 250 palavras, e deve ter claro o contexto do estudo, qual é o problema, qual é o ponto de vista e como se argumentará a favor desta. É recomendado que, no mínimo, 20 documentos sejam referenciados, em sua maioria artigos de revistas indexadas, capítulos de livros e livros com DOI. Do mesmo modo, é recomendado que estas sejam tomadas do Nasa Thesaurus ou de Unesco Thesaurus (ciências sociais).

**c. Artigo de revisão.** Documento onde se organizam, sistematizam e analisam os resultados de pesquisa relevantes para as temáticas gerais da revista. Este tipo de artigos são escritos por autores que dominam uma área de pesquisa e esse conhecimento é representado nos artigos que tem publicado. Serão aceitas revisões de literatura, sistemáticas e meta-análises. Os resumos devem ter o objetivo, os métodos (para revisões sistemáticas ou meta-análise), os resultados e as conclusões. É recomendado que, no mínimo, 50 documentos sejam referenciados de revistas indexadas, capítulos de livros e livros.

Os artigos serão publicados em espanhol, inglês e português. A revista *Ciencia y Poder Aéreo* aceita a apresentação de artigos cujas áreas temáticas coincidam com as descritas abaixo:

- Desenvolvimento Espacial, AD Astra
- Segurança Operacional e Logística na Indústria Aeronáutica
- Gestão e Estratégia
- Tecnologia e Inovação
- Educação e TIC

Os temas referidos devem estar, na medida do possível, relacionados com a indústria aeroespacial e áreas afins, com ênfase nas engenharias de referência aeronáutica.

## — Diretrizes para autores

- Os autores devem submeter seus artigos, através do nosso portal Open Journal System (<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>), ou ao e-mail: [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)
- É necessário satisfazer os requisitos para o documento estabelecido na seção “Requisitos do texto”, onde é especificado o tipo de arquivo preferido, o formato do documento, a fonte preferida, a pontuação da letra, o espaçamento entre linhas, assim como o manual de estilo seguido por *Ciencia y Poder Aéreo*.
- Também, é preciso seguir as recomendações éticas do processo consignadas em “Responsabilidades do autor”, como, o envio de uma ficha de apresentação, as considerações sobre a autoria e problemas com esta; a necessidade de disponibilizar informação veraz sobre o financiamento e a filiação institucional; a permissão para enviar seu documento para ser avaliado por pares; a permissão para usar seus dados para plataformas como Publindex o Crossref; o compromisso de que o artigo é original, não tem sido submetido simultaneamente para outras revistas, não é redundante, e a cessão de direitos de propriedade intelectual ou patrimonial à Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.

## Normas gerais

Todo artigo deve:

- Ser um documento ou artigo original, não ter sido publicado ou considerado em outra revista.

- Estar cientificamente documentado, ser coerente, e ter unidade.
- Indicar o tipo de artigo: um artigo de pesquisa, de reflexão ou de revisão.
- Indicar o projeto de pesquisa, registro (em caso de contar com este) e/ou dados relacionados ao trabalho que será apresentado.
- Apresentar a filiação acadêmica do autor(es), perfil profissional e dados de contato, função desempenhada (intelectual, experimental ou de escritura). Também contar com um ORCID e uma CVLAC, caso estiver vinculado a uma instituição colombiana. É recomendado incluir seu nome normalizado preferido, levando em conta as considerações da International Registry of Authors-Links to Identify Scientists (<https://www.iralis.org/>).
- Declarar se o autor está vinculado a conflitos de interesse.
- Cada proposta de artigo é submetida a avaliação por pares, cujo conceito é importante para a decisão de sua publicação.
- Declarar potenciais conflitos de interesses.
- Os dados proporcionados serão usados para a plataforma Publindex e Crossref.

## — Requisitos e estrutura dos artigos

### Requisitos do texto

- Os artigos devem ter uma fonte Times New Roman; tamanho da letra 12, espaçamento simples.
- Equações, tabelas e figuras devem ser citadas no texto de acordo com as normas da APA, 7ª edição. Por exemplo, numerar e citar estas dentro do documento, levando em conta o título de cada uma delas e descrevendo qual é a fonte de cada uma.
- Siglas: o nome completo será citado pela primeira vez e a abreviação entre parêntesis. Posteriormente, apenas a sigla será usada. As siglas introduzidas devem ser usadas em todo o texto.
- Citação e referências: as citações e as referências devem ser editadas com base às normas da APA, 7ª edição.
- As notas de rodapé serão usadas apenas para contribuições substantivas ao texto.

### Estrutura para os tipos de artigos

**Título:** em espanhol, inglês e português. Como nota de rodapé, indicar o tipo de artigo, informações sobre a pesquisa e outros dados relacionados – grupo de pesquisa, registro do projeto, entidade que o financia ou outras informações

relevantes. O título deve ter no máximo 15 palavras. O autor deve esclarecer o assunto do artigo e ser específico.

**Resumo:** em espanhol, português e inglês, deve ter no mínimo, 150 palavras, e no máximo 250 palavras.

Os resumos dos artigos de pesquisa (resumos analíticos) têm a seguinte estrutura: introdução, objetivos, métodos, resultados, conclusões.

No caso de artigos de reflexão (resumos analíticos sintéticos) devem-se apresentar os aspectos significativos do texto de uma maneira lógica, destacando os resultados obtidos pelo autor.

Os resumos de artigos de revisão apresentam os principais pontos da análise (resumos descritivos) oferecendo as principais descobertas partindo desta comparação. No caso dos artigos de revisão sistemática ou meta-análise segue-se uma estrutura similar à dos artigos de pesquisa.

**Palavras-chave:** de 3 a 6 em ordem alfabética (levar em conta as palavras temáticas fornecidas por tesouros sugeridas em “Classificação de artigos”). Separar por ponto e vírgula (;).

Os artigos de pesquisa devem ter uma introdução (abordar o problema de pesquisa); metodologia; resultados; discussão; conclusões, recomendações ou agradecimentos (opcional).

As referências devem estar em ordem alfabética de acordo com as normas da APA, 7ª edição. É recomendado que a maioria das fontes sejam artigos em revistas indexadas ou livros de editoras acadêmicas que tenham sido publicados nos últimos cinco anos, e tenham DOI.

Em um arquivo separado, devem-se incluir detalhes do(s) autor (res), nome, sobrenome, currículo breve, filiação acadêmica, e-mail e endereço postal (endereço do trabalho e/ou correspondência), número de telefone e vinculação acadêmica e profissional, função/papel dentro da realização do artigo (intelectual, experimental ou escritura).

## — Processo de submissão

Como parte do processo, os autores comprometem-se a verificar se a submissão atende a todos os itens apresentados abaixo. As submissões que não atenderem as diretrizes serão devolvidas aos autores.

1. O trabalho submetido não foi publicado anteriormente nem foi enviado simultaneamente para outras revistas.
2. O manuscrito está no formato Microsoft Word (Forma de arquivo eletrônico .doc.).
3. Os artigos devem ter uma fonte Times New Roman; tamanho da letra 12, espaçamento simples.

4. As referências bibliográficas tem sido apresentadas em ordem alfabética, de acordo com as diretrizes das normas APA, 7ª edição.
5. Todas as figuras e tabelas foram colocadas na posição correspondente e não no final do texto, e devem ser citadas ao longo do documento. Todas as figuras (gráficos, imagens, fotografias) e tabelas devem ser enviadas separadamente em máxima qualidade ou em formatos editáveis, caso precisarem ser editadas para efeitos de design.
6. O artigo submetido foi preparado para revisão cega por pares, ou seja, as referências e nomes dos autores foram removidos de todas as partes do artigo e substituídos pela palavra “autor” (incluindo as propriedades do documento).
7. Os dados do autor foram anexados em um arquivo separado, com nome, sobrenome, resumo breve, afiliação acadêmica, e-mail e endereço postal (endereço do trabalho ou correspondência), números de telefone de contato e filiação acadêmica ou profissional, papel (intelectual, experimental ou escritura).
8. Na maioria das referências são de artigos em revistas indexadas ou livros acadêmicos publicados, no máximo, há cinco anos.
9. Cessão de direitos de propriedade intelectual. Propriedade intelectual refere-se a criações artísticas, industriais ou científicas. A revista rege-se por políticas de direitos de acordo com seguintes princípios:
  - Foi concluída e assinada A “Carta de apresentação e a licença de uso e Cessão de direitos econômicos e declaração de conflito de interesse”. O Documento que declara que são os autores originais do manuscrito. (Este documento inclui aspectos relacionados à licença de uso e direitos patrimoniais).
  - A equipe editorial é, portanto, exonerada de qualquer obrigação ou responsabilidade por ações legais que surjam do trabalho apresentado relacionados à violação de direitos de terceiros, sejam eles propriedade intelectual ou industrial, sigilo comercial ou qualquer outro.
  - É responsabilidade dos autores obter as autorizações necessárias das imagens sujeitas a copyright.
  - Caso for decidido não publicar o artigo na revista, a cessão de direitos acima mencionada não terá efeito, deste modo o autor recuperará todos os direitos de exploração da obra.
  - O envio dos artigos não implica que a revista esteja na obrigação de publicá-los, pois eles serão submetidos à avaliação de pares-cegos; os textos que, na opinião do editor do Comitê Editorial ou do Comitê Científico,

atendam aos requisitos exigidos e sejam trabalhos relacionados à Desenvolvimento Espacial, AD Astra; Segurança Operacional e Logística na Indústria Aeronáutica; Tecnologia e Inovação; Gestão e Estratégia; Educação e TIC, ou relacionados à indústria aeroespacial ou a setores relacionados.

- Caso contrário, a política de confidencialidade e o aviso legal da revista são entendidos como aceitos no momento de concluir a submissão do artigo e no momento de preencher o formulário registro no site [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com).

Os autores são responsáveis pelo conteúdo dos seus artigos e materiais associados, garantindo sua originalidade e caráter inédito. A revista *Ciencia y Poder Aéreo* verifica todos os manuscritos submetidos para publicação usando o software anti-plágio iThenticate, que expõe a percentagem de semelhança que uma obra tem com os outros escritos já publicados ou encontrados em bancos de dados, com o propósito de garantir a originalidade dos manuscritos. *Ciencia y Poder Aéreo* se acolhe ao processo de fluxo recomendado pelo Committee on Publication Ethics acerca de uma possível suspeita de plágio. Deste modo, se o texto superar um 20% de semelhança, a equipe editorial procederá a pedir ajustes no documento. Quando essa semelhança representar uma percentagem maior ou corresponder a fragmentos completos e significativos do texto, a equipe concluirá que o texto foi plágio e pedirá explicações aos autores. Caso as explicações não forem satisfatórias, o manuscrito será rejeitado.

#### Nota:

Para informações adicionais sobre os seguintes aspectos, consulte o site da revista:

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/about/submissions>

#### Política de Prevenção de Plágio

#### Avaliação por pares

#### Revisão e publicação

#### Política de acesso aberto

#### Direitos de autor e licença de uso

---

#### Envie seus documentos pela plataforma:

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>

Em caso de dúvidas ou perguntas entre em contacto:

✉ [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)

---



02

Vol. 19

Institución Universitaria, Resolución MEN No. 1906/Agosto 2002 / No. 21057 Noviembre/2016

Julio-diciembre del 2024 | pp. 1-146

**CIENCIA Y PODER AÉREO**

Revista Científica de la Escuela de Postgrados de la FAC

Vol. 19 n.º 2 | julio-diciembre del 2024 | pp. 1-146 | ISSN 1909-7050 E-ISSN 2389-9468

Doi: <https://doi.org/10.18667/issn.1909-7050> | Bogotá, Colombia | Periodicidad semestral

