

CIENCIA Y PODER AÉREO

Revista Científica de la Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana

ISSN 1909-7050 / E-ISSN 2389-9468

VOL. 20 N.º 1 | ENERO-JUNIO 2025 | Pp. 1-139



ADASTRA

01

Vol. 20

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

Enero-junio del 2025 | pp. 1-139



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. 20 N.º 1 | ENERO-JUNIO 2025 | Pp. 1-139

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
TC. Leidy Diana Girón Hernández

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 20, n.º 1 | enero-junio 2025
Periodicidad semestral
ISSN 1909-7050
E-ISSN 2389-9468
DOI: <https://doi.org/10.18667/issn.1909-7050>
Bogotá, Colombia 2025

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
(601) 2134698 Ext. 72500 - 72625
Biblioteca Escuela de Postgrados de la FAC

Para mayores informes:

Dirección postal | Mailing Address | Endereço postal
Cra. 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

Contenido

Desarrollo Espacial, AD Astra

6-14

Implementación de la doctrina espacial: retos para concebir al espacio como dominio operacional

Implementation of space doctrine: challenges in conceiving space as an operational domain

Implementação da doutrina espacial: desafios para conceber o espaço como um domínio operacional

Alex Jiménez Vélez, Tassio Franchi

15-32

Desarrollo de cohetes híbridos tipo sonda para potenciar la industria aeroespacial en Colombia

Development of hybrid probe rockets to boost the aerospace industry in Colombia

Desenvolvimento de foguetes de sonda híbridos para impulsionar o setor aeroespacial na Colômbia

Santiago Prada Conde, Fabio Arturo Rojas Mora

Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica

33-45

Procedimiento administrativo en la recepción y custodia de los componentes aéreos como bienes incautados

Administrative procedure for the reception and custody of aerial components as seized assets

Procedimento administrativo para recepção e custódia de componentes aéreos como bens apreendidos

Leydyn Marino Tejada Aguilar y Jaime Castilla Barraza

46-58

Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) de las aves en aeropuertos de Colombia

Species-Specific Impact Risk Index (SSIRI) of birds in Colombian airports

Índice de Risco de Impacto Específico (IRIEE) de aves em aeroportos da Colômbia

Holman Enrique Durán Márquez

59-67

Análisis de la influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas

Analysis of the Influence of Adverse Weather on Aircraft Operations

Análise da influência do clima adverso nas operações aéreas

Juan Carlos Daza Rincón, Rafael Enrique Ucros Rojas, Luisa Fernanda Mónico Muñoz

68-77

Regulación del espacio aéreo nacional: estrategias operativas de la Fuerza Aérea Ecuatoriana

Regulation of national airspace: Operational strategies of the Ecuadorian Air Force

Regulamentação do espaço aéreo nacional: Estratégias operacionais da Força Aérea Equatoriana

Víctor Xavier Enríquez Champutiz, Patricio Javier Aguilar Cazar

Tecnología e Innovación

78-88

Extensión de la vida útil para unos sistemas de guiado de bombas GBU-49 de la Fuerza Aérea Colombiana

Extension of service life for GBU-49 bomb guidance systems of the Colombian Air Force

Extensão da vida útil para os sistemas de guiagem de bombas GBU-49 da Força Aérea Colombiana

Mauricio López Gómez, Manuel Ricardo Arias Paredes, José Alfonso Jiménez Garzón

89-103

Artificial Intelligence in the Aviation Operations: A State of the Art

Inteligencia artificial en las operaciones aéreas: un estado del arte

Inteligência artificial nas operações de aviação: Um estado da arte

Cristian Lozano Tafur, Jaime Enrique Orduy Rodríguez, Didier Aldana Rodríguez, David Reinoso Pintor

Gestión y Estrategia

104-113

Inteligencia aérea en apoyo a la interdicción de aeronaves vinculadas al narcotráfico

Air intelligence in support of the interdiction of aircraft linked to drug trafficking

Inteligência aérea em apoio à interdição de aeronaves ligadas ao narcotráfico

Jaime Ramiro Andrade Albuja, Gustavo Adolfo Cedeño Bravo

114-127

Fundamentos y estructura del Colegio del Aire

Fundamentals and structure of the Colegio del Aire

Fundamentos e estrutura do Colegio del Aire

Germán Barragán-Chávez

131-139

Instrucciones para autores | Guidelines for Authors | Diretrizes para autores

Implementación de la doctrina espacial: retos para concebir al espacio como dominio operacional

Fecha de recibido: 25 de abril de 2024	Fecha de aprobado: 05 de julio de 2024
Reception date: April 25, 2024	Approval date: July 5, 2024
Data de recebimento: 25 de abril de 2024	Data de aprovação: 05 de julho de 2024

Alex Jiménez Vélez

<https://orcid.org/0000-0003-4667-0838>
ajimenez@fae.mil.ec

Ph.D. en Ingeniería y Proyectos
Docente e investigador – Escuela de Mando y Estado Mayor del Ejército, Brasil
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de Estudios en Defensa, Fronteras y Migraciones (GEDEFROM)

Ph.D. in Engineering and Projects
Professor and Researcher – Army Command and Staff College, Brazil
Researcher's role: theoretical and writing
Group of Studies on Defense, Borders and Migration (GEDEFROM)

Doutor em Engenharia e Projectos
Professor e investigador – Escola de Comando e Estado - Maior do Exército, Brasil
Papel do investigador: teórico e escritor
Grupo de Estudos de Defesa, Fronteiras e Migrações (GEDEFROM)

Tassio Franchi

<https://orcid.org/0000-0003-3434-5560>
tasfranchi@gmail.com

PhD. en Desarrollo Sustentable
Docente e Investigador - Escuela de Mando y Estado Mayor del Ejército, Brasil
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de Estudios en Defensa, Fronteras y Migraciones (GEDEFROM)

PhD. in Sustainable Development
Professor and Researcher - Army Command and Staff College, Brazil
Researcher's role: theoretical and writing
Group of Studies on Defense, Borders and Migration (GEDEFROM)

Doutor em Desenvolvimento Sustentável
Professor e investigador - Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Brasil
Papel do investigador: teórico e escritor
Grupo de Estudos de Defesa, Fronteiras e Migrações (GEDEFROM)

Cómo citar este artículo: Jiménez Vélez, A. y Franchi, T. (2025). Implementación de la doctrina espacial: retos para concebir al espacio como dominio operacional. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 6-14. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderareero.814>



Implementación de la doctrina espacial: retos para concebir al espacio como dominio operacional

Implementation of space doctrine: challenges in conceiving space as an operational domain

Implementação da doutrina espacial: desafios para conceber o espaço como um domínio operacional

Resumen: El presente artículo, de carácter exploratorio, centra su análisis en el modelo teórico de implementación doctrinal de Nisser basado en la triada autoridad, cultura y credibilidad. Dentro de este contexto, describe los posibles retos que pueden enfrentar varias Fuerzas Aéreas de la región, que buscan implementar en su doctrina al espacio como dominio operacional. Además, se aborda cómo dicha doctrina espacial, en muchos casos, es vista como herramienta de cambio o transformación en su contexto operacional. Se observa que existe determinada estandarización a través de estructuras organizacionales comunes como los Centros de Operaciones Espaciales, que no solo orientan sus esfuerzos a un comando y control espacial y de interoperabilidad regional, sino también al pragmatismo que la estructura mencionada aporta al proceso de implementación de la doctrina.

Palabras clave: doctrina; dominio espacial; militar.

Abstract: This exploratory article focuses on analyzing Nisser's theoretical model of doctrinal implementation, which is based on the triad of authority, culture, and credibility. Within this context, it describes the possible challenges that several Air Forces in the region may face as they seek to incorporate space as an operational domain into their doctrine. Additionally, it addresses how this space doctrine is often viewed as a tool for change or transformation within its operational context. It is observed that there is a certain standardization through common organizational structures such as Space Operations Centers, which not only direct their efforts towards space command and control and regional interoperability but also towards the pragmatism that the mentioned structure brings to the doctrinal implementation process.

Keywords: Doctrine; space domain; military.

Resumo: Este artigo exploratório foca na análise do modelo teórico de implementação doutrinária de Nisser, baseado na tríade autoridade, cultura e credibilidade. Dentro deste contexto, descreve os possíveis desafios que várias Forças Aéreas da região podem enfrentar ao buscar incorporar o espaço como domínio operacional em sua doutrina. Além disso, aborda como essa doutrina espacial, em muitos casos, é vista como uma ferramenta de mudança ou transformação em seu contexto operacional. Observa-se que existe uma certa padronização através de estruturas organizacionais comuns, como os Centros de Operações Espaciais, que não apenas orientam seus esforços para um comando e controle espacial e interoperabilidade regional, mas também para o pragmatismo que a estrutura mencionada traz ao processo de implementação da doutrina.

Palavras-chave: Doutrina; domínio espacial; militar.

Introducción

Se suele definir la Historia como estrategia retrospectiva y la Estrategia como historia prospectiva; lo que mañana será historia es hoy un problema estratégico (Galdón-Domenech y Yaniz-Velasco, 1993; Santé-Abal, 2017). Bajo este contexto, en las maniobras y el empleo del aparato militar se han incorporado nuevos dominios operacionales como el espacio y el ciberespacio, siendo el primero un dominio físico y el segundo un dominio funcional; plasmando su concepción en documentos estratégicos y visiones prospectivas de Estado, así como en el desarrollo de doctrinas y operaciones militares a desarrollarse en dichos dominios (Fernández-Montesinos y Sánchez-Mayorga, 2021).

En el caso del espacio, países como Estados Unidos y Rusia fueron pioneros en el desarrollo de documentos normativos estratégicos en el ámbito espacial, resultado de la experiencia en la carrera espacial que protagonizaron. Sin embargo, con el transcurrir de los años al incorporarse nuevos actores como China, la Unión Europea, el Reino Unido e India, entre otros, la construcción de políticas y estrategias nacionales espaciales se incrementa, evidenciando que en algunos países estas estrategias se enmarcan dentro del sector Defensa, y en el caso del Reino Unido incluso en su título se menciona la operacionalización del dominio espacial, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1.
Algunos ejemplos de países con Estrategias Espaciales de Defensa

País	Documento Normativo	Fecha
Unión Europea	Space Strategy for Security and Defense	03/2023
Reino Unido	Defense Space Strategy: Operationalising the Space domain	02/2022
Estados Unidos	Defense Space Strategy	06/2020
Francia	Rapport du groupe de travail «Espace» Stratégie Spatiale de Défense	06/2019

Fuente: European Commission (2023); Ministry of Defence (1 de febrero de 2022); Department of Defence (s. f.); Ministère des Armées (2019).

A estas estrategias se suman manuales de poder espacial, doctrina y operaciones espaciales que se han desarrollado durante esta última década. Por

ejemplo, documentos como: *The “Lightspeed” Space Power eManual*, del Centro de Poder Aéreo y Espacial Australiano (Defence Space Command, 2022); *UK Space Power*, del Centro de Doctrina y Desarrollo de Conceptos del Reino Unido (Ministry of Defence, 1 de septiembre de 2022); *Spacepower: Doctrine for Space Forces* (United States Space Force, 2020), y *NATO Standard AJP 3-3. Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations* (NATO, 2016). Todos son manuales que han permitido orientar la concepción del empleo, las características y el soporte de este dominio en las operaciones militares, impulsando la generación de nueva doctrina (básica, operacional y táctica) en varias Fuerzas Aéreas del mundo, dada la pertinencia de operación y empleo, no solo por ser el ámbito de su competencia, sino también por su relación connatural con dicho dominio.

A partir de lo anterior, podemos encontrar que en una serie de doctrinas aéreas se conciben definiciones de poder espacial, detallando sus principios, características y operaciones espaciales que se ejecutan dentro de este importante dominio operacional. Incluso en países como Estados Unidos¹, Rusia² o China³, cuyo poder espacial les ha permitido alcanzar el desarrollo de capacidades militares espaciales avanzadas, vemos reflejada en sus estructuras orgánicas la creación de un Comando Espacial (en un inicio) y de su correspondiente Fuerza Espacial (en la actualidad).

Por otra parte, si nos situamos en el contexto de países de la región como Brasil, Chile, Colombia, Perú y Ecuador, que a pesar de no contar con el poderío de las potencias espaciales antes mencionadas, desde años anteriores sus Fuerzas Aéreas han motivado la creación de estructuras operativas espaciales y la

¹ Estados Unidos: Inicialmente formada como Comando Espacial de la Fuerza Aérea el 1 de septiembre de 1982, la Fuerza Espacial se estableció como una rama militar independiente el 20 de diciembre de 2019 (<https://www.spaceforce.mil/About-Us/About-Space-Force/History/>).

² Rusia: Inicialmente se crearon las Fuerzas de Defensa Aeroespacial el 1 de diciembre de 2011, las cuales pasaron a formar parte de una nueva rama de las Fuerzas Armadas de la Federación de Rusia el 1 de agosto de 2015: las Fuerzas Aeroespaciales de Rusia (<https://structure.mil.ru/structure/forces/cosmic/history.htm>).

³ China: Inicialmente en diciembre de 2015 dentro de la Fuerza de Soporte Estratégico del Ejército de Liberación Popular de China se anexaron los dominios espacial y ciberespacial; sin embargo, el 19 de abril de 2024 se establece un nuevo sistema de servicios y armas, creándose como arma la Fuerza Aeroespacial del Ejército de Liberación Popular de China (<http://www.mod.gov.cn/gfbw/xwfy/16302080.html>).

actualización de sus doctrinas básicas (Fuerza Aérea Colombiana [FAC], 2020; Fuerza Aérea Brasileña [FAB], 2020); coinciden en una entidad espacial táctica, denominada Centro de Operaciones Espaciales, importante para el proceso de implementación doctrinal e interoperabilidad regional.

Tabla 2.
Ejemplos de estructuras operativas espaciales creadas en Fuerzas Aéreas de varios países

País	Entidad operacional espacial	Entidad táctica espacial
Brasil	Comando de Operaciones Aeroespaciales	Centro de Operaciones Espaciales
Chile	Comando de Combate	Grupo de Operaciones Espaciales
Perú	Comando de Control Aeroespacial	Centro de Operaciones Espaciales
Colombia	Comando de Operaciones Aéreas y Espaciales / Jefatura de Operaciones Espaciales	Centro de Operaciones Espaciales
Ecuador	Comando de Operaciones Aéreas, Espaciales y Defensa / Jefatura de Operaciones Espaciales	Centro de Operaciones Espaciales

Fuente: elaboración propia con base en experiencia de intercambio y participación operativa espacial.

Influencia del espacio y su poder en el empleo y la doctrina operacional actual

Mencionar conflictos anteriores como la guerra del Golfo, Somalia, Bosnia-Herzegovina y Kosovo, y actuales como el conflicto entre Rusia y Ucrania, nos invita a ser conscientes del resolutivo empleo del poder espacial como elemento clave para neutralizar defensas, paralizar los sistemas de mando y control, cortar el flujo de comunicaciones y destruir el poder militar del adversario, y todo ello con pérdidas escasas y reiterada preocupación por evitar daños colaterales (Bergamaschi, 2013; Rietjens, 2024).

Bajo esas consideraciones, el espacio como dominio operacional se proyecta como una fuerza eminentemente estratégica y un arma ofensiva que permite

la selección de objetivos, que puede ser dirigida contra casi todo lo que conocemos en la superficie, que provoca conmoción física y psicológica al dominar el tiempo como cuarta dimensión, que concibe una guerra paralela y que ha redefinido el principio de masa (Tamame-Camarero, 2002). Por tal razón, el desarrollo y el pensamiento de ese poder espacial debe reflejarse en la generación de una doctrina básica, operacional y táctica empoderada, que guíe su constitución, preparación y empleo (Ministry of Defence, 1 de febrero de 2022; Defence Space Command, 2022).

Por consiguiente, y dada la importancia actual que los procesos de elaboración e implementación de doctrina espacial implican para distintas Fuerzas Aéreas de la región, que buscan lograr un correcto entendimiento de su efecto, se conciben en diferentes casos como multiplicadoras de fuerza o se utilizan en ciertos casos como herramienta de mando, educación, cambio o señalización. El presente estudio tiene como objetivo abordar una reflexión analizando los principales factores a la hora de realizar una adecuada implementación, apoyándose principalmente en un modelo teórico de ejecución de la doctrina (Nisser, 2021).

Modelo teórico de implementación de la doctrina de Nisser

Para el presente estudio, se analizó un modelo que aborde factores o variables importantes en la implementación de la doctrina, escogiendo el modelo teórico planteado por Nisser, quien estructura su análisis en función de tres factores clave: coherencia cultural, autoridad y credibilidad, triada que se ilustra en la Figura 1.

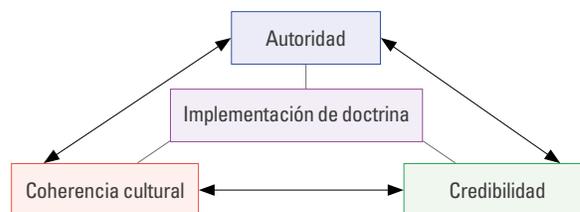


Figura. 1 Modelo teórico de implementación doctrinal
Fuente: Nisser (2021).

Factor coherencia cultural

Varios autores que estudian procesos de implementación doctrinal argumentan que las predisposiciones culturales influyen en la manera como se aceptan e implementan nuevas doctrinas de carácter formal (Avant, 1993). De igual modo, Marcus (2018) y Matthews (2012) sostienen que las doctrinas novedosas que proponen un cambio o transformación, como sería el caso de la doctrina espacial objeto de estudio, podrían correr el riesgo de ser ignoradas cuando carecen de coherencia cultural o credibilidad.

Por tanto, el primer elemento o factor *cultural* se define como “las preferencias sobre cómo emplearse o combatir”, lo cual enfatiza aspectos no articulados e irracionales que este factor conlleva; es decir que es posible que no se articulen los supuestos que sustentan dichas preferencias, o que estas sean irracionales, por ejemplo: Ejércitos o Fuerzas que no están dispuestas a absorber lecciones donde entran en conflicto creencias arraigadas.

Además, a este primer factor se suma el término de *coherencia*, entendido como el resultado de una correcta armonía entre los conceptos que prescribe una doctrina formal y la cultura de la organización. Teóricamente, una nueva doctrina cuyo empleo esté en armonía con creencias arraigadas tiene mayores posibilidades de ser implementada con éxito; por el contrario, doctrinas culturalmente incoherentes corren el riesgo de ser rechazadas o percibirse equivocadas, aun cuando prescriban conceptos racionalmente sólidos.

En el caso de la doctrina espacial, podríamos mencionar que estas creencias pueden observarse sobre todo en grupos de pilotos y técnicos aeronáuticos cuyas creencias solo se orientan a su experiencia y conocimiento sesgado al poder aéreo, sosteniendo que el espacio como dominio operacional y su doctrina no corresponde con la realidad de países que carecen de poderío e infraestructura tecnológica espacial.

Factor autoridad

El segundo argumento que plantea este modelo para una implementación exitosa es la necesidad de que

las doctrinas tengan *autoridad*, factor entendido tanto desde un aspecto formal como informal. Formal cuando desde el mando institucional se dispone su implementación y cabal cumplimiento, denotando su importancia para la organización; e informal cuando goza del respaldo por parte de personas de influencia, que aunque carezcan de una posición de poder dentro de la organización, su experiencia y trayectoria avalan su implementación.

En el caso de la doctrina espacial, si bien en la mayoría de Fuerzas Aéreas su proceso de ejecución responde a procesos formales avalados por su mando institucional, también se evidencia que su implementación ha sido más efectiva cuando han dado el aval personal con experiencia y amplia trayectoria operacional.

Además, es importante resaltar que si una doctrina crea un debate multifacético dentro de una organización militar, se puede asumir que ha sido tomada con seriedad y ejerce cierta autoridad (Finkel, 2011). La doctrina espacial responde a un dominio transsuperficial que envuelve a varios dominios operacionales, varios segmentos, varias disciplinas y requiere varios roles, lo cual genera que este tipo de debate se encuentre implícito y hoy en día forme parte del debate de varios procesos de actualización de doctrina en diferentes países.

Así mismo, existe un dilema en doctrinas que ostentan demasiada autoridad, ya que pueden volverse dogmáticas si se obedecen ciegamente. Sin embargo, aunque existe el riesgo de un dogmatismo doctrinal, resulta más probable que las doctrinas no se implementen por falta de autoridad y no que se vuelvan dogmáticas por tener demasiada autoridad (Widén & Olsén 2020). Quizás, este no es el caso para la doctrina espacial dado que es una doctrina relativamente nueva frente a sus predecesoras.

Factor credibilidad

El tercer y último factor de análisis de esta triada que plantea Nisser (2018) nos habla de la importancia de la *credibilidad*, considerada como una explicación racionalista que enfatiza la racionalidad y la articulación; es

decir, la credibilidad considera que los conceptos prescritos en la doctrina probablemente se enmarcan bajo dos lógicas. La primera demuestra que los conceptos funcionan en combates reales o ejercicios de entrenamiento; y la segunda, que los conceptos resultan ser una orientación futura creíble para una Fuerza Aérea que atraviesa un cambio importante.

En el caso de la doctrina espacial, la primera lógica solo está al alcance de países con un poderío espacial mayor, cuyo proceso de desarrollo de conceptos operacionales se encuentra en conceptos de empleo conjunto en ejercicios de entrenamiento real. No es el caso para países o Fuerzas Aéreas con poderío menor, donde la segunda lógica es la más ajustada a su realidad, dado el desarrollo inicial de sus doctrinas y conceptos operacionales de carácter exploratorio o básico.

Por consiguiente, tomando en consideración el modelo propuesto y sus principales factores, la doctrina espacial está llamada a ser un instrumento que cree un fuerte sentido de pertenencia y prescriba soluciones que eliminen la incertidumbre, buscando tener autoridad que le permita tener mayores probabilidades de ser correctamente implementada.

Retos en el proceso de generación e implementación de la doctrina espacial

Dado que las enseñanzas procedentes de las experiencias pueden tener vigencia hoy, pero quedar obsoletas mañana, la doctrina tiene el gran reto de evolucionar periódicamente y adaptarse a este contexto a través de su proceso de implementación doctrinal. Por lo tanto, resulta importante no solo analizar nuestra propia doctrina, amenazas y ámbitos de actuación, sino también examinar posibles escenarios prospectivos que orienten procesos de transformación y vigilancia tecnológica para desarrollar nuevas capacidades y doctrina acordes a escenarios futuros (Carrasco-Juan, 2001; Ruano-Ramos, 2003.; Santé-Abal, 2017).

Además, el mando institucional o la autoridad dispuesta para liderar la implementación de la doctrina espacial tiene la responsabilidad y el reto de emitir directrices claras que permitan comprender los conceptos y fundamentos base de esta nueva doctrina, incorporando continuamente nuevos manuales, nuevos estudios y nuevos procedimientos que se hayan generado ya sea internamente o en relación con otros países.

Otro aspecto a considerar es que el reto ya no está en procesos de actualización de doctrina básica, en los que ya existen muchos manuales y documentos operativos desclasificados. El objetivo actual se centra en el proceso de desarrollo de manuales de doctrina operacional, donde la participación de personal operativo y técnico dentro del componente espacial en varios ejercicios combinados es la clave para adquirir experiencia operacional, que contribuya a la generación de dicha doctrina. Así también, resulta importante la cooperación internacional que busca, a través de alianzas estratégicas con diferentes países, un entrenamiento multinacional en operaciones espaciales a nivel operacional-táctico, en pro de impulsar la interoperabilidad y la estandarización entre estructuras espaciales operativas.

Finalmente, es clave mencionar que la actualización de políticas y estrategias espaciales se da en documentos normativos importantes que orientan y direccionan las capacidades militares a desarrollarse ante nuevas amenazas. Aunque estos documentos no constituyen doctrinas, ni definen capacidades operativas puntuales, las ideas y los conceptos que se conciben en sus textos marcan la posible evolución de acciones militares y empleo operacional bajo este nuevo dominio.

Importancia de la investigación y desarrollo tecnológico en la doctrina espacial

La doctrina plantea directrices que son las pautas de creación de las capacidades militares. Dichas capacidades se ponen a prueba en ejercicios y conflictos, de

cuyas enseñanzas o lecciones aprendidas se derivan los correspondientes ajustes a la doctrina, con el fin de adecuarla a los nuevos escenarios y amenazas. Para este proceso, denominado *proceso doctrinal*, se vuelve clave la interacción que debe existir entre doctrina y tecnología, que permita mantener a una doctrina espacial por delante del material, con una visión profunda del futuro (Santé-Abal, 2017).

Entonces, un elemento predominante y de gran influencia en la generación de doctrina espacial es el científico, ámbito que nos obliga a impulsar una adecuada y específica preparación de nuestro personal, que debe intervenir activamente en procesos de investigación y desarrollo que permitan concebir, a través de nuevos ingenios tecnológicos, el desarrollo de nuevos conceptos, nuevas técnicas y nuevas tácticas en combate (Ruano-Ramos, 2003).

Además, cabe mencionar que la denominada “Revolución en Asuntos Militares”, iniciada hace algunos años por Estados Unidos, supuso cambios fundamentales en la conducción de la guerra que resultaron de la aplicación de nuevas tecnologías como misiles guiados de precisión, sistemas de armas no detectables, sistemas de vigilancia y reconocimientos aéreos y espaciales, y sistemas avanzados de mando, control, comunicaciones e informática, los cuales evidentemente fueron incorporados a las nuevas doctrinas militares y a los conceptos operativos y organizativos (Villanueva-López, 2021).

Así mismo, entre las nuevas características que plantea esta revolución se pueden mencionar: la necesidad de compensar el déficit de personal con mejoras cualitativas, la extensa gama y dispersión de escenarios, y el entorno estratégico, con nuevas amenazas y riesgos impredecibles, demandando avanzada detección y rápida movilización. Todos estos cambios y características hacen más que pensar en la utilización militar del espacio como medio aglutinador de todo (Tamame-Camarero, 2002).

Finalmente, esto nos invita a reflexionar el hecho de que se convierte en un reto mantener nuestras doctrinas en constante actualización, pues siempre deben estar en un grado de investigación y desarrollo más avanzado que sus equipos, con lo cual se nos

permite ser resilientes y proactivos ante la complejidad planteada antes.

Conclusión

El modelo teórico objeto de análisis del presente estudio sugiere que las doctrinas espaciales que sean culturalmente coherentes, respaldadas por la autoridad y que prescriban métodos que se consideran creíbles tienen más probabilidades de ser implementadas.

Además, se resalta la importancia de comprender sus tres factores clave. En el caso de la coherencia cultural, su importancia radica en que es probable que las organizaciones eviten conceptos que están en conflicto ante su normal empleo operacional. La autoridad es importante porque, de lo contrario, una doctrina novedosa como la espacial puede verse como recomendaciones, en lugar de algo que debe cumplirse. Por último los conceptos prescritos por la doctrina espacial deben tener sentido; de lo contrario, las Fuerzas Aéreas continuarán con sus prácticas pasadas y creencias arraigadas.

Una premisa asociada con dos de los factores del modelo es que la cultura es irracional y no articulada, mientras que la credibilidad es racional y articulada, por lo cual el factor cultural resulta más subjetivo e implica mayor articulación y análisis por parte de cada país a la hora de adaptar la doctrina espacial a su contexto.

Otro aspecto relevante que se aborda en el análisis es que la mayoría de doctrinas espaciales que se pretenden implementar en varios países buscan utilizarse como herramienta de cambio o transformación, y al tener coherencia cultural, autoridad y credibilidad, tendrán más probabilidades de lograr el cambio deseado. A su vez, tal conocimiento sería importante no solo para los militares inherentes a este proceso, sino también para los políticos que ejercen control y son llamados a desarrollar políticas y estrategias que se operacionalicen con la doctrina.

Bajo el contexto de los retos planteados, podemos resaltar que la labor de Fuerzas Aéreas en la

actualidad es desarrollar esta capacidad militar para incorporar al espacio dentro de sus operaciones, lo cual implica que en sus cuerpos doctrinales y personal exista una unidad de criterio y conceptualización de este dominio. También, las entidades orgánicas ligadas a este ámbito están obligadas a reconocer y proponer nuevos cambios ante esta nueva realidad, donde ya no existen por creencias arraigadas operaciones confinadas solamente al ámbito aeronáutico, sino que su planeamiento, adiestramiento, desarrollo y acciones son ahora y estarán para siempre interrelacionadas e interdependientes con elementos y capacidades espaciales tanto del sector público como de la empresa privada.

Finalmente, como investigaciones futuras sugerimos ampliar la operacionalización de cada factor estudiado, mejorando el detalle de sus circunstancias, que examine principalmente: ¿cómo los grados de implementación varían entre los casos de doctrinas espaciales en cada país? Nuevos aportes que seguro permitirán desarrollar mejores doctrinas.

Referencias

- Avant, D. D. (1993). The Institutional Sources of Military Doctrine: Hegemons in Peripheral Wars. *International Studies Quarterly*, 37(4), 409-430. <https://doi.org/10.2307/2600839>
- Bergamaschi, J. L. M. (2013). Repensando la geopolítica aeroespacial: hacia una geopolítica del espacio transuperficial.
- Carrasco-Juan, J. A. (2001). Doctrina aeroespacial, necesidades y retos para el ejército del aire. *Boletín de Información*, (269). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4602479>
- Department of Defense. (s. f.). *DoD Space Strategy* [en línea]. <https://www.defense.gov/Spotlights/DOD-Space-Strategy/>
- Defence Space Command. (2022). *The "Lightspeed" Space Power eManual*. Air and Space Power Centre.
- European Commission. (2023). *Joint Communication to the European Parliament and the Council European Union Space Strategy for Security and Defence* [en línea]. <https://secure.ipex.eu/IPEXL-WEB/document/JOIN-2023-09>
- Fernández-Montesinos, F. A. y Sánchez-Mayorga, J. L. (2021). El nuevo dominio operacional: militarización vs. protección de la actividad espacial. *Cuadernos de Estrategia*, (208), 151-212. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8145856>
- Fuerza Aérea Colombiana (FAC). (2020). *Manual de Doctrina Básica Aérea Espacial y Ciberespacial* (5.ª ed.) [en línea]. https://www.fac.mil.co/sites/default/files/linktransparencia/Planeacion/Manuales/manual_de_doctrina_basica_aerea_espacial_y_ciberespacial_fac-0-b_dbaec_2020.pdf
- Fuerza Aérea Brasileña (FAB). (2020). *Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira* [en línea]. https://www2.fab.mil.br/unifa/ppgca/images/conteudo/D-QBRN/DCA_1-1-DOUTRINA_BSICA_DA_FORA_AREA_BRASILEIRA_-VOLUME_1_2020.pdf
- Finkel, M. (2011). *On Flexibility: Recovery from Technological and Doctrinal Surprise on the Battlefield*. Stanford University Press.
- Galdón-Domenech, D. y Yaniz-Velasco, F. (1993). Los estudios estratégicos en el ámbito del Ejército del Aire. *Cuadernos de Estrategia*, (66), 113-139. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2778044>
- Jennings, F. W. (1999). New Doctrine Demands Changes in the Aerospace Force. *Aerospace Power Journal*, 13(1).
- Marcus, R. D. (2018). *Israel's Long War with Hezbollah: Military Innovation and Adaptation under Fire*. Georgetown University Press.
- Matthews, M. (2012). *We Were Caught Unprepared: The 2006 Hezbollah-Israeli War*. Combat Studies Institute.
- Ministère des Armées. (2019, 25 de julio), *Stratégie spatiale de défense, rapport du groupe de travail Espace*. [en línea] <https://www.vie-publique.fr/files/rapport/pdf/194000642.pdf>
- Ministry of Defence. (2022, 1 de febrero). *Defence Space Strategy: Operationalising the Space Domain*. Policy Paper Defence and Armed Forces [en línea]. <https://www.gov.uk/government/publications/defence-space-strategy-operationalising-the-space-domain>
- Ministry of Defence. (2022, 1 de septiembre). *UK Space Power. Development, Concepts and Doctrine Centre* [en línea]. <https://www.gov.uk/government/publications/uk-space-power-jdp-0-40>
- Nisser, J. (2021). Implementing Military Doctrine: A Theoretical Model. *Comparative Strategy*, 40(3), 305-314. <https://doi.org/10.1080/01495933.2021.1912514>

- North Atlantic Treaty Organization (NATO). (2016). *NATO Standard AJP 3-3. Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations*. NATO Standardization Office [en línea]. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a82d7bc40f0b62305b94a32/doctrine_nato_air_space_ops_ajp_3_3.pdf
- Ruano-Ramos, L. F. (2003). Reflexiones sobre la doctrina. *Boletín de Información*, (278), 47-60. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4553417>
- Rietjens, S. (2024). The Space Domain and the Russia-Ukraine War. *Reflections on the Russia-Ukraine War* (M. Rothman, L. Peperkamp y S. Rietjens, eds.). Leiden.
- Santé-Abal, J. M. (2017). La doctrina aeroespacial y la estrategia de seguridad aeroespacial. *Cuadernos de Estrategia*, (192), 105-146. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6268236>
- Tamame-Camarero, J. (2002). El poder aeroespacial ya es un hecho. *Arbor*, 171(674), 217-229. <https://doi.org/10.3989/arbor.2002.i674.1029>
- United States Space Force. (2020). *Spacepower: Doctrine for Space Forces*. Space Capstone Publication.
- Villanueva-López, C. D. (2021). La industria española de defensa ante los nuevos conflictos: capacidades a aportar. *RESI: Revista de Estudios en Seguridad Internacional*, 7(2), 63-81. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8306038>
- Widén, J. y Olsén, T. (2020). Doktrindilemmat: Vad är problemet och hur kan det lösas? *Kungl Krigsvetenskapsakademiens Handlingar Och Tidskrift*, (1), 44-57. <https://fhs.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1462835&dswid=7811>

Desarrollo de cohetes híbridos tipo sonda para potenciar la industria aeroespacial en Colombia

| Fecha de recibido: 02 de julio de 2024 | Fecha de aprobado: 14 de agosto de 2024 |

| Reception date: July 2, 2024 | Approval date: August 14, 2024 |

| Data de recebimento: 02 de julho de 2024 | Data de aprovação: 14 de agosto de 2024 |

Santiago Prada Conde

<https://orcid.org/0009-0000-0671-6964>
s.prada1@uniandes.edu.co

Mag. en Ingeniería Mecánica
Investigador - Universidad de Los Andes, Colombia
Rol del investigador: experimental y escritura
Grupo de Conversión de energía del Departamento de Ingeniería Mecánica

Master in Mechanical Engineering
Teacher and researcher - Universidad de Los Andes, Colombia
Researcher's role: experimental and writing
Energy Conversion Group of the Department of Mechanical Engineering

Mestrado em Engenharia Mecânica
Docente e investigador - Universidad de Los Andes, Colombia
Papel do investigador: experimental e escrito
Grupo de Conversão de Energia do Departamento de Engenharia Mecânica

Fabio Arturo Rojas Mora

<https://orcid.org/0000-0001-5351-3369>
farojas@uniandes.edu.co

Ph. D. en Ingeniería Mecánica
Investigador - Universidad de Los Andes, Colombia
Rol del investigador: experimental y escritura
Grupo de Conversión de energía del Departamento de Ingeniería Mecánica

Ph. D. in Mechanical Engineering
Teacher and researcher - Universidad de Los Andes, Colombia
Researcher's role: experimental and writing
Energy Conversion Group of the Department of Mechanical Engineering

Doutor em Engenharia Mecânica
Docente e investigador - Universidad de Los Andes, Colombia
Papel do investigador: experimental e escrita
Grupo de Conversão de Energia do Departamento de Engenharia Mecânica

Cómo citar este artículo: Prada Conde, S. y Rojas Mora, F. A. (2025). Desarrollo de cohetes híbridos tipo sonda para potenciar la industria aeroespacial en Colombia. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 15-32. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.833>



Desarrollo de cohetes híbridos tipo sonda para potenciar la industria aeroespacial en Colombia

Resumen: Los cohetes sonda, utilizados en investigaciones espaciales, transportan cargas a altitudes elevadas y permiten estudios variados en breves tiempos espaciales. Son herramientas rentables por su naturaleza no orbital y la ausencia de propulsores costosos, lo cual los hace ideales en estudios de áreas inaccesibles para satélites. Recientemente, los cohetes híbridos tipo sonda fusionan características de motores de combustibles sólido y líquido, y han emergido como soluciones innovadoras, ofreciendo ventajas en rendimiento, seguridad y control. Estos cohetes usan propulsores que contienen elementos en fases sólidas y líquidas o gaseosas. A pesar de desafíos técnicos como la eficiencia de combustión reducida, han ganado relevancia en aplicaciones académicas y recreativas.

La metodología de este estudio combina enfoques cuantitativos y cualitativos para entender la tecnología tipo sonda global, identificar características de cohetes híbridos y explorar oportunidades para su implementación en Colombia. Por su parte, La propulsión híbrida se alinea con las oportunidades y los desafíos del entorno aeroespacial colombiano, ofreciendo una alternativa técnica y estratégica. Los resultados finales, como la construcción del cohete AINKAA H1, validan la viabilidad de desarrollar cohetes híbridos en Colombia. Finalmente, es esencial que Colombia fortalezca su infraestructura y sus colaboraciones para aprovechar oportunidades y consolidarse en el mercado espacial global.

Palabras clave: cohetes sonda; industria aeroespacial; propulsión híbrida.

Development of hybrid probe rockets to boost the aerospace industry in Colombia

Abstract: Sounding rockets, used in space research, carry payloads to high altitudes and allow varied studies in short space times. They are cost-effective tools due to their non-orbital nature and the absence of expensive propellants, which makes them ideal for studies in areas inaccessible to satellites. Recently, hybrid sounding rockets fuse characteristics of solid and liquid fuel engines and have emerged as innovative solutions, offering advantages in performance, safety and control. These rockets use propellants containing elements in solid and liquid or gas phases. Despite technical challenges such as reduced combustion efficiency, they have gained relevance in academic and recreational applications.

The methodology of this study combines quantitative and qualitative approaches to understand the global probe technology, identify characteristics of hybrid rockets and explore opportunities for their implementation in Colombia. Hybrid propulsion is aligned with the opportunities and challenges of the Colombian aerospace environment, offering a technical and strategic alternative. The final results, such as the construction of the AINKAA H1 rocket, validate the feasibility of developing hybrid rockets in Colombia. Finally, it is essential for Colombia to strengthen its infrastructure and collaborations to take advantage of opportunities and consolidate its position in the global space market.

Keywords: Sounding rockets; aerospace industry; hybrid propulsion.

Desenvolvimento de foguetes de sonda híbridos para impulsionar o setor aeroespacial na Colômbia

Resumo: Os foguetes de sondagem, usados em pesquisas espaciais, transportam cargas úteis a grandes altitudes e permitem estudos variados em curtos espaços de tempo. Eles são ferramentas econômicas devido à sua natureza não orbital e à ausência de propulsores caros, o que os torna ideais para estudos de áreas inacessíveis aos satélites. Recentemente, os foguetes de sondagem híbridos combinam características de motores de combustível sólido e líquido e surgiram como soluções inovadoras, oferecendo vantagens em termos de desempenho, segurança e controle. Esses foguetes usam propulsores que contêm elementos nas fases sólida e líquida ou gasosa. Apesar dos desafios técnicos, como a redução da eficiência da combustão, eles ganharam relevância em aplicações acadêmicas e recreativas.

A metodologia deste estudo combina abordagens quantitativas e qualitativas para entender a tecnologia global da sonda, identificar as características dos foguetes híbridos e explorar as oportunidades de sua implementação na Colômbia. A propulsão híbrida se alinha com as oportunidades e os desafios do ambiente aeroespacial colombiano, oferecendo uma alternativa técnica e estratégica. Os resultados finais, como a construção do foguete AINKAA H1, validam a viabilidade do desenvolvimento de foguetes híbridos na Colômbia. Por fim, é essencial que a Colômbia fortaleça sua infraestrutura e colaborações para aproveitar as oportunidades e consolidar sua posição no mercado espacial global.

Palavras-chave: Foguetes de sondagem; setor aeroespacial; propulsão híbrida.

Introducción

La industria aeroespacial es un sector en rápida evolución que juega un papel crucial en el desarrollo económico y tecnológico de los países. En Colombia, aunque se han logrado avances importantes, como el lanzamiento de satélites (Fuerza Aérea Colombiana [FAC], s. f.) y la colaboración con agencias internacionales (FAC, 22 de junio 2023), persisten desafíos significativos, en particular en el ámbito de la propulsión de cohetes (Robayo-Salazar *et al.*, 2020). Como detalla Morante-Granobles (2021) en la revisión de los clústeres aeroespaciales en Colombia, el país enfrenta desafíos significativos en términos de desarrollo tecnológico e infraestructura, lo cual limita su competitividad en el escenario aeroespacial global. Por su parte, se hace evidente que la falta de desarrollo en tecnologías de propulsión que puedan competir a nivel internacional limita la capacidad del país para avanzar en la carrera espacial.

Este estudio se enfoca en los cohetes híbridos tipo sonda, una tecnología emergente que combina las características de los motores de propulsión sólida y líquida (Sutton y Biblarz, 2016). La propulsión híbrida no solo representa una opción técnicamente viable, sino también una solución económicamente accesible para el desarrollo de sistemas de tipo cohete en Colombia (Urrego-Peña, 2019). Además, dada la ubicación estratégica del país cerca de la línea del ecuador, la implementación de este tipo de tecnología podría optimizar las operaciones espaciales y reducir los costos de lanzamientos significativamente (Poveda-Zamora, 2020). A su vez, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) ha identificado un “triple desarrollo” como fundamental para el avance espacial del país, destacando el potencial del sector espacial para impulsar el desarrollo sostenible, fomentar el crecimiento económico y social, y fortalecer las capacidades tecnológicas e industriales de Colombia (Barrero-Barrero, 2021).

El objetivo de este artículo es analizar el potencial de los cohetes híbridos tipo sonda para catalizar el desarrollo aeroespacial en Colombia. Se evaluará su viabilidad técnica y tecnológica, y se propondrá

un marco de implementación adaptado a las condiciones del país. La investigación incluye una revisión sistemática utilizando palabras clave de la bibliografía, estudios de casos internacionales y una evaluación detallada del primer prototipo funcional desarrollado en Colombia: el AINKAA H1 (Prada-Conde, 2023).

La industria aeroespacial colombiana, si bien en crecimiento, enfrenta limitaciones en cuanto a infraestructura y desarrollo tecnológico. Este artículo busca contribuir al fortalecimiento de este sector, proporcionando una alternativa innovadora que podría posicionar a Colombia como un actor relevante en la industria aeroespacial global.

Cohetes sonda

Los cohetes sonda son vehículos espaciales diseñados específicamente para la investigación, capaces de transportar cargas útiles a altitudes elevadas en la atmósfera. Estos cohetes, que actúan como laboratorios móviles, han sido fundamentales para realizar estudios en diversas condiciones, desde microgravedad hasta investigaciones astrofísicas (Seibert, 2006). Aunque su tiempo en el espacio es limitado, generalmente entre cinco y veinte minutos, y su velocidad es moderada, son herramientas ideales para ciertos experimentos científicos (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2023). Además, en regiones del espacio inaccesibles para los satélites, estos cohetes ofrecen soluciones valiosas para realizar mediciones. Su carácter no orbital y la ausencia de necesidad de propulsores costosos los convierten en opciones económicas viables frente a misiones orbitales (NASA, s. f.).

Propulsión híbrida

Un cohete de propulsión híbrida se caracteriza por tener un motor cuyo propelente se compone de dos elementos en distintas fases: uno sólido y otro que puede ser líquido o gaseoso (Sutton y Biblarz, 2016). Estos motores presentan varias ventajas en comparación con los motores de propulsión sólida o líquida, como una mayor seguridad, control de empuje, robustez, versatilidad, y una naturaleza más económica.

No obstante, también enfrentan desafíos, tales como una eficiencia de combustión reducida, tiempos de respuesta más lentos y variaciones en la relación oxidante/combustible (Sutton y Biblarz, 2016). A pesar de estos retos, los cohetes híbridos han encontrado su lugar como cohetes sonda en diversas aplicaciones, tanto en el ámbito académico como entre aficionados, lo cual ha llevado a una continua inversión en investigación para superar sus limitaciones y mejorar su eficiencia (Chiaverini y Kuo, 2007).

Metodología

El estudio implementa un enfoque mixto, combinando una revisión cualitativa y cuantitativa de programas internacionales reconocidos, junto con el desarrollo experimental de un cohete de propulsión híbrida. Esta metodología se describe a través de cuatro etapas esenciales.

Etapa 1: Revisión sistemática

Se llevó a cabo una revisión sistemática utilizando palabras clave relevantes para identificar y analizar los principales programas de cohetes sonda a nivel mundial. Las bases de datos consultadas incluyeron, entre otras, agencias espaciales como la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la ESA (European Space Agency), la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) y la ISRO (Indian Space Research Organization), donde se buscaron artículos, informes técnicos y publicaciones que abordaran el desarrollo y las aplicaciones de cohetes sonda. Estos programas fueron seleccionados en función de su relevancia para la aplicabilidad en contextos similares al colombiano.

Etapa 2: Análisis de cohetes híbridos operativos

Esta fase consistió en la recopilación y el análisis de datos técnicos sobre cohetes híbridos funcionales ya probados, enfocados en características clave como la

carga útil, el apogeo, su empuje nominal y la seguridad operativa. Se utilizaron datos reportados por organizaciones reconocidas, tales como HyImpulse, Nammo y HyEnD-Universidad de Stuttgart, y se contrastaron con las innovaciones tecnológicas en propulsión híbrida para evaluar su aplicabilidad en cohetes tipo sonda.

Etapa 3: Análisis contextual para la implementación en Colombia

Se llevó a cabo un análisis contextual detallado para estudiar las oportunidades y los desafíos de implementar tecnologías de cohetes híbridos tipo sonda en Colombia. Este análisis considera aspectos como las ventajas geográficas de Colombia para lanzamientos espaciales, la disponibilidad de materiales, y la infraestructura existente, así como las políticas gubernamentales y normativas que podrían influir en el desarrollo de estos cohetes en el país.

Etapa 4: Validación experimental

Con el fin de validar la viabilidad del desarrollo de cohetes híbridos en Colombia, se diseñó y desarrolló el prototipo AINKAA H1, el primer cohete híbrido del país. El motor de este prototipo, el Zeus 1 (Prada-Conde, 2023), fue sometido a pruebas en banco estático para evaluar su rendimiento bajo condiciones controladas. Para validar las especificaciones teóricas del cohete, se realizaron tres pruebas de encendido del motor, las cuales fueron monitoreadas para registrar parámetros clave como el empuje generado, el tiempo de quemado y la estabilidad del motor. Los resultados se compararon con las simulaciones teóricas realizadas como parte del proceso de diseño de este prototipo.

Resultados

Etapa 1: Industria de cohetes sonda alrededor del mundo

Mientras que Estados Unidos fue pionero y mantiene un programa activo de cohetes sonda para el estudio

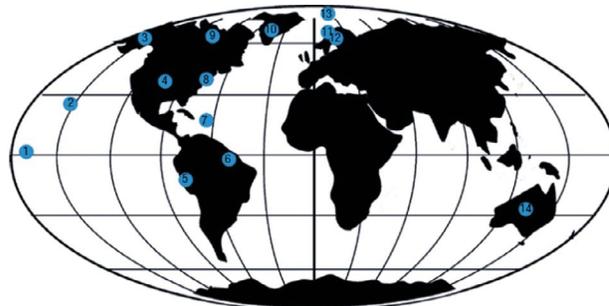
de la atmósfera superior, otros países no se han quedado atrás. Japón, India, Noruega, Suecia y Brasil cuentan, actualmente, con programas robustos y disponen de instalaciones de lanzamiento en funcionamiento. Así mismo, Países como Alemania, Francia, Italia, España, Dinamarca, Australia, Canadá y Pakistán han llevado a cabo lanzamientos de este tipo. Además de las instalaciones de lanzamiento fijas, también se han utilizado varios sitios remotos en campañas para lanzamientos con fines especiales. Estos han incluido Perú, Groenlandia, Puerto Rico y el norte de África (Larsen, 2003). Algunos de los programas de cohetes tipo sonda más destacados son:

- **NASA (Estados Unidos):**

Durante más de cuatro décadas, el programa Sounding Rocket ha aportado significativamente al programa espacial nacional con valiosas contribuciones científicas, técnicas y educativas (NASA, 2023). Este se destaca como uno de los programas de vuelo más robustos, versátiles y costo-efectivos de la NASA. Actualmente, cuenta con dieciséis vehículos cohetes sonda distintos, los cuales abarcan desde el cohete Orion de aproximadamente 5,6 metros de altura, el cual logra un apogeo de alrededor de 85 km, hasta el cohete de cuatro etapas Black Brant XII, que supera los 20 metros de altura, y es capaz de levantar desde 450 kg a una altitud de 500 km hasta 110 kg a cerca de 1400 km de apogeo. Cada vehículo, con sus características únicas, refleja la versatilidad y evolución de la tecnología, adaptándose a las distintas necesidades y objetivos de las misiones de este programa.

Como lo muestra la Figura 1, este programa cuenta con campos de lanzamiento alrededor del mundo, y se destacan lugares como Alaska, Nuevo México, Virginia, Noruega, Suecia y Australia, junto con sitios temporales en Groenlandia, las Islas Marshall, Puerto Rico y Brasil. Estas plataformas brindan un amplio acceso a fenómenos de interés para la comunidad científica. Las áreas de investigación más comunes en donde se emplean estos cohetes sondas van desde la física de plasma, la astrofísica y física solar, hasta la biología (NASA, 2021). Según la descripción dada, el programa proporciona todo el personal y el equipo necesarios

para llevar a cabo misiones exitosas en cualquier parte del mundo, adaptándose a los requerimientos para cada tipo de carga útil.



Sitios de lanzamiento pasados y presentes en todo el mundo utilizados por el Programa de Cohetes Sonda para realizar investigaciones científicas:

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. Kwajalein Atoll, Islas Marshall | 8. Wallops Istanas, VA |
| 2. Barking Sands, HI | 9. Fort Churchill, Canadá |
| 3. Poker Flat, AK | 10. Groenlandia (Thule y Sondre Stromfjord) |
| 4. White Sands, NM | 11. Andaya, Noruega |
| 5. Punta de Lobos, Perú | 12. Esrange, Suecia |
| 6. Alcantara, Brasil | 13. Svalbard, Noruega |
| 7. Camp Tortuguero, Puerto Rico | 14. Australia (Equatorial Launch Australia (ELA) y Woomera) |

Figura 1. Lugares de lanzamiento del programa “Sounding Rocket”

Fuente: adaptado al castellano de NASA (2021).

- **ISRO (India):**

En 1963, con la creación de la Estación de Lanzamiento de Cohetes Ecuatoriales de Thumba (TERLS), cerca del ecuador magnético en Thumba, la aeronomía y las ciencias atmosféricas en India experimentaron un avance significativo. El lanzamiento del primer cohete sonda desde TERLS en 1963 marcó el inicio del Programa Espacial Indio (ISRO, 2023). Estos cohetes, inicialmente importados de Rusia y Francia, permitieron estudios de la atmósfera y el desarrollo de sistemas aeroespaciales propios.

A partir de 1965, la ISRO comenzó a lanzar cohetes sonda fabricados en India, con lo que logró desarrollar gradualmente su industria aeroespacial local (ISRO, 2023). El RH-75 fue el primer cohete sonda completamente indio, seguido por los modelos RH-100 y RH-125. Este programa sentó las bases de la tecnología de vehículos de lanzamiento de la India, proporcionando una experiencia crucial para el desarrollo de vehículos espaciales y motores sólidos. Desde entonces,

la familia de cohetes Rohini (RH) han facilitado numerosas misiones científicas nacionales e internacionales (ISRO, 2023).

Actualmente, los cohetes de sondeo operativos incluyen tres versiones: RH-200, RH-300-Mk-II y RH-560-Mk-III. Estos cubren un rango de carga útil de 8 a 100 kg y un alcance de apogeo de 80 a 475 km. Sus características principales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.
Cohetes sonda indios operativos

Vehículo	RH-200	RH-300-Mk-II	RH-560-Mk-II
Etapas	2	1	2
Longitud (m)	3,6	4,9	7,7
Peso (kg)	108	510	1350
Carga útil (kg)	10	60	100
Apogeo (km)	80	160	470
Objetivo	Meteorología	Atmósfera media	Atmósfera superior

Fuente: ISRO (2023).

En la Tabla 1, se presentan los cohetes operativos de la ISRO, los cuales pueden ser de una o dos etapas, además de presentar diversas capacidades de carga útil y apogeo según su objetivo de investigación. Hasta el momento, se han lanzado más de 1545 cohetes RH-200, demostrando el alto nivel de calidad y confiabilidad de este cohete (ISRO, 2023).

Finalmente, gracias a los avances significativos en la ingeniería aeroespacial impulsados por el programa de cohetes sonda, el 23 de agosto de 2023 la India marcó un hito histórico al convertirse en el cuarto país en posicionarse sobre la Luna, además de ser pionero en la exploración de un área cercana al polo sur lunar (Parra, 2023).

- **Programas europeos:**

La base de lanzamientos de Andøya Space es pionera en servicios de lanzamiento suborbital desde los años sesenta, con un récord de más de mil cohetes sonda destinados a la investigación de la atmósfera ártica, alcanzando altitudes de hasta 1600 km (Andøya Space, 2023). Estratégicamente ubicada, esta instalación ha sido el escenario de experimentos de microgravedad de la ESA, proporcionando cerca de seis minutos de experimentación en ingravidez, con cohetes que

regresan al Atlántico Norte en tan solo quince minutos. Con dos centros de lanzamiento, en Andøya y Ny-Ålesund (Svalbard, Noruega), Andøya Space (2023) ofrece versatilidad en trayectorias de cohetes y acceso a todas las capas atmosféricas.

Por otro lado, la ESA ha empleado cohetes sonda durante más de treinta años en Esrange, ubicado en el norte de Suecia, para investigar fenómenos de microgravedad con diversas aplicaciones (Swedish Space Corporation [ssc], 2023). Esrange, bajo la propiedad y operación de la ssc desde 1966, sirve actualmente como punto de lanzamiento para la comunidad científica internacional en investigaciones atmosféricas y de microgravedad.

En Europa, existen tres diferentes líneas de cohetes sonda ofrecidas a cualquier cliente que pague por investigaciones en microgravedad. Normalmente, estas misiones son utilizadas por la ESA y la Agencia Espacial Alemana (DLR), pero en el pasado también fueron empleadas por usuarios japoneses como la JAXA (ESA, 2014). Los tres modelos que emplea la ESA son Texus, Maser y Maxus, y sus principales características se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2.
Características de los cohetes sonda utilizados por ESA

Vehículo	Texus	Maser	Maxus
Etapas	2	2	1
Longitud (m)	13	13	16,2
Peso (kg)	6150	6150	12300
Carga útil (kg)	400	400	800
Empuje etapa 1 (kN)	102	102	430
Empuje etapa 2 (kN)	240	240	-
Apogeo (km)	260	260	705

Fuente: ESA (2014).

- **JAXA (Japón):**

En 2003, la JAXA se estableció al fusionar el Instituto de Ciencias Espaciales y Astronáuticas (ISAS), la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial del Japón (NASDA) y el Laboratorio Aeroespacial Nacional del Japón (NAL). El ISAS, ahora una de las cuatro secciones clave de la JAXA, se dedica a promover la ciencia espacial en Japón en colaboración con universidades y contribuye al avance espacial del país (JAXA, 2020).

Los cohetes sonda del ISAS han sido fundamentales en campos como la astrofísica y la física del plasma espacial. El ISAS desarrolla innovadores sistemas aeroespaciales y utiliza tres cohetes sonda principales: S-310, S-520 y SS-520, lanzados principalmente desde el Centro Espacial Uchinoura en Kimotsuki, Japón. Además, el modelo S-310 ha apoyado observaciones en la Antártida y Noruega, y el modelo SS-520 ha sido lanzado en Noruega para estudios de la magnetosfera (JAXA, 2020).

Los cohetes japoneses son utilizados para observaciones científicas y experimentos a altitudes máximas de 190 km y 1000 km. Mientras que los cohetes S-310 y S-520 se destinan principalmente a observaciones atmosféricas en altitudes elevadas y a experimentos de recuperación, el cohete SS-520 se especializa en observaciones de la magnetosfera sobre Spitsbergen, Noruega (IHI Aerospace, 2018). En la Tabla 3 se muestran las características principales de estos motores:

Tabla 3.
Características de los cohetes sonda utilizados por la JAXA

Vehículo	S-310	S-520	SS-520
Longitud (m)	7,1	8	9,6
Diámetro (m)	0,31	0,52	0,52
Peso total (kg)	700	2100	2600
Carga útil (kg)	50	95/150	140
Apogeo (km)	150	300	800

Fuente: JAXA (2020).

- **INPE (Brasil):**

Desde 1965, Brasil ha llevado a cabo campañas de lanzamiento de cohetes sonda, iniciadas con la puesta en marcha del Centro de Lanzamiento Barreira do Inferno (CLBI). El Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) ha sido el principal proveedor de estos vehículos en el país. Además, el IAE ha suministrado vehículos para programas internacionales, incluyendo los programas de microgravedad Texus y Maser de la ESA, con lanzamientos realizados en territorio europeo (Da Motta-Silva y Perondi, 2020).

Por su parte, dentro de este programa brasileño, Sonda se refiere a una serie de cohetes sonda propulsados por combustible sólido y producidos por el

Instituto Nacional de Investigación Espacial del Brasil (INPE). Esta serie de cohetes, iniciada en la década de 1960, fue utilizada para investigaciones atmosféricas (Robledo-Ascencio, 2012). Posteriormente, esta familia de cohetes dio paso a la familia vs, que, hasta 2020, ha registrado más de cincuenta lanzamientos exitosos desde Brasil, Suecia, Noruega y Australia.

Tabla 4.
Características de los primeros cohetes brasileiros del programa Sonda

Vehículo	Sonda 15	Sonda 26	Sonda 37	Sonda 48
Masa total (kg)	100	400	1500	7200
Altura (m)	4,5	5,6	8	11
Diámetro (m)	0,11	0,3	0,3	1,01
Etapas	2	1	2	2
Empuje (kN)	27	36	102	203
Apogeo (km)	65	180	600	800
Lanzamientos	226	15	31	4

Fuente: Robledo-Ascencio (2012).

En la Tabla 4, se presentan las características técnicas principales de los motores Sonda brasileiros, los cuales funcionaron desde 1965 hasta 1989, sumando un total de 276 lanzamientos, lo que impulsó significativamente el desarrollo industrial del país (Robledo-Ascencio, 2012).

A su vez, en la Tabla 5 se presentan los parámetros más relevantes de los motores de la familia de cohetes sonda brasileiros de la familia vs, los cuales son la base del programa espacial de Brasil (Robledo-Ascencio, 2012).

Tabla 5.
Características principales de los cohetes sonda brasileiros de la familia vs

Vehículo	VS-30	VS-40	VS-50
Longitud (m)	7,43	9,5	12
Diámetro (m)	0,56	1,01	1,46
Peso total (kg)	1460	6800	15000
Carga útil (kg)	260	500	500
Apogeo (km)	160	950	En desarrollo
Empuje en despegue (kN)	102	207	550

Fuente: Robledo-Ascencio (2012).

Etapa 2: Cohetes híbridos tipo sonda

Actualmente, la mayoría de los cohetes de tipo sonda utilizan motores de combustible sólido, ya que su diseño e implementación es más simple en términos técnicos. Sin embargo, los cohetes híbridos ofrecerían una serie de ventajas que los convierten en una opción atractiva para ser implementados como cohetes sonda (Chiaverini y Kuo, 2007). Entre algunas características se tienen las siguientes:

- **Mayor controlabilidad:** Los cohetes híbridos pueden controlarse durante el vuelo mediante la regulación del flujo del combustible. Esto permite realizar maniobras más precisas, desde cambios en la trayectoria hasta la posibilidad de tener un descenso controlado.
- **Mayor seguridad:** Los cohetes híbridos son más seguros que los cohetes sólidos, ya que pueden apagarse en caso de emergencia, mientras que los motores sólidos permanecen encendidos hasta agotar por completo su combustible. Por su parte, al almacenar el oxidante y el combustible por separado, se reduce la probabilidad de autoignición o una explosión súbita (Sutton y Biblarz, 2016), situaciones que son de alto riesgo al utilizar combustibles sólidos.
- **Menor costo:** En términos económicos, la fabricación de los cohetes híbridos representa una menor inversión que los cohetes líquidos, sin embargo, estos son más caros que los cohetes sólidos.

De igual forma, para enriquecer la discusión, es necesario presentar las desventajas relevantes de los motores híbridos (Chiaverini y Kuo, 2007):

- **Mayor complejidad:** Los cohetes híbridos requieren dos sistemas de almacenamiento, uno para el combustible y otro para el oxidante, lo cual aumenta la complejidad del diseño y la fabricación del cohete.
- **Menor eficiencia:** Los cohetes híbridos son menos eficientes que los cohetes líquidos, es decir

que requieren más propelente para alcanzar la misma altitud. Esta reducción en la eficiencia proviene de factores como bajas tasas de regresión y baja densidad aparente del combustible, además de los cambios de relación de oxidante y combustible en función del consumo del grano sólido (Prada-Conde, 2023).

- **Mayor riesgo de combustión incompleta:** La combustión incompleta puede provocar la formación de gases tóxicos o inflamables, lo cual representa un riesgo para los operadores del cohete, así como un posible aumento en la contaminación del ambiente.

A lo largo de la última década, las universidades, instituciones de investigación y empresas internacionales han impulsado significativamente la tecnología de propulsión híbrida. Se han investigado nuevos combustibles, como las mezclas basadas en cera de abejas (Osorio-Tovar, 2022), para optimizar la tasa de regresión y, por tanto, motores más compactos con alta densidad de empuje (Schmierer *et al.*, 2019). Estas mejoras han posibilitado la implementación de cohetes híbridos en sistemas de propulsión para cohetes sonda y vehículos lanzadores de pequeños satélites.

Ejemplos notables incluyen el lanzamiento exitoso del Heros 3 en 2016, que empleó óxido nitroso y parafina como combustible (Kobald *et al.*, 2017), y el lanzamiento exitoso del cohete Nucleus de Nammo, que utilizó peróxido de hidrógeno y un combustible basado en HTPB (Nammo, 2018). De igual forma, el desarrollo de Hylmpulse, el primer motor de 10 kN con rendimiento estable por más de 10 segundos utilizando parafina y oxígeno líquido. Estos eventos subrayan el potencial de los cohetes híbridos como sistemas de propulsión de bajo costo y alto rendimiento.

A nivel global, instituciones como JAXA y NASA están investigando y optimizando aún más estos motores, y diversas empresas emergentes se suman al desarrollo, aunque la comercialización masiva aún está pendiente (Schmierer *et al.*, 2019). En la Tabla 6, se listan algunas de las empresas que han logrado avances significativos con este tipo de propulsión.

Tabla 6.
Empresas emergentes y establecidas activas en el campo de la propulsión

Empresa	País	Negocio	Combustible	Oxidante
Hylmpulse	Alemania / Unión Europea	SR, 500 kg LV	Basado en parafina	LOX
Nammo	Noruega	SR, <150 kg LV	HTPB	H ₂ O ₂
The Spaceship Company	Estados Unidos	Suborbital	Poliamida	N ₂ O
Space Propulsion Group	Estados Unidos	Orbital	Basado en parafina	LOX y otros
TISpace	Taiwán	SR, 300 kg LV	HTPB	N ₂ O
Gilmour Space	Australia	SR, 400 kg LV	Combustible impreso 3D	H ₂ O ₂
Rocket Crafters	Estados Unidos	LV	ABS impreso 3D	N ₂ O
T4I	Italia	Propulsión orbital	Basado en parafina	H ₂ O ₂
Space Forest	Polonia	Cohete sónico	Basado en parafina	N ₂ O
Space Link	Eslovenia	Cohete sónico	Basado en parafina	LOX
Equatorial Space Ind.	Singapur	65 kg LV	Basado en parafina	LOX

SR = Cohete sónico LV = Vehículo de lanzamiento

Fuente: adaptada al castellano a partir de Schmierer *et al.* (2019).

En la Tabla 6, se proporciona la comparación de varias empresas de propulsión espacial a nivel global. Es notable la variedad de tecnologías de combustibles estudiados incluyendo parafina y HTPB hasta innovaciones utilizando impresión 3D. Además, es necesario destacar la variedad de aplicaciones de este tipo de propulsión en cohetes sónicos y cohetes sonda hasta vehículos de lanzamiento suborbital. Este panorama demuestra una industria en crecimiento, con múltiples actores buscando innovar y posicionarse en el mercado con este tipo de tecnologías. En la tabla 7, se presenta la información técnica de los cohetes híbridos más relevantes para el presente artículo.

Tabla 7.
Características principales de cohetes híbridos tipo sonda

Vehículo	Hylmpulse	Nucleus	N2ORTH
Longitud (m)	14	9,5	7,8
Diámetro (m)	0,64	0,37	0,26
Peso total (kg)	1200	820	95
Carga útil (kg)	250	70	0
Apogeo (km)	200	100	64
Empuje nominal (kN)	75	30	15
Tiempo de quemado (s)	30	40	25

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7, se presentan las características principales de cohetes híbridos tipo sonda con los mejores rendimientos encontrados durante la revisión técnica. El cohete Hylmpulse, fabricado por la empresa de mismo nombre, es el primero de este tipo en utilizar oxígeno líquido como oxidante. Al tener capacidad para una carga útil de 250 kg y alcanzar un apogeo de 200 km, demuestra un desempeño sobresaliente (Hylmpulse, 2021). El Nucleus, un cohete que presta servicio comercial, es capaz de desarrollar un empuje nominal de 30 kN, llevando consigo 70 kg de carga útil a 100 km de altitud.

Finalmente, el N2ORTH, desarrollado por el grupo de investigación HyEnD de la Universidad de Stuttgart (Alemania), es uno de los cohetes híbridos más potentes y avanzados hasta la fecha. El martes 18 de abril de 2023, N2ORTH alcanzó una altitud de 64 km, lo cual casi duplica el récord de altitud anterior para los híbridos construidos por estudiantes, establecido en 2016 con el cohete Heros 3, desarrollado por el mismo equipo (HyEnD, 2023).

En cuanto a la Tabla 8, se presentan las características principales de cohetes híbridos desarrollados por grupos de investigación universitarios. Los cohetes

Compass (Oechsle *et al.*, 2022) y Heros (Schmierer *et al.*, 2015), desarrollados por HyEnD, son prototipos experimentales que, a través de estudios rigurosos, lograron establecer un diseño óptimo para la construcción del N2ORTH (HyEnD, 2023). Finalmente, el cohete Phoenix-1B Mk-II, desarrollado por un grupo de investigación de la Universidad de KwaZulu-Natal, logró un apogeo de 35 km con un empuje nominal de 7,25 kN en una campaña de lanzamientos del año 2021, con lo que alcanzó el récord del cohete Heros (Aerospace Systems Research Institute [ASRI], s. f.).

Tabla 8.
Características principales cohetes híbridos experimentales

Vehículo	Compass	Heros	Phoenix-1B Mk-II
Longitud (m)	2,45	7,5	4,9
Diámetro (m)	0,122	0,22	0,17
Peso total (kg)	15	75	88
Carga útil (kg)	0	1	0
Apogeo (km)	3	32	35
Empuje nominal (kN)	0,8	10	7,25
Tiempo de quemado (s)	12	15	14

Fuente: elaboración propia.

Este panorama de desarrollo de propulsión híbrida global nos permite establecer un estado del arte inicial para la posible implementación de este tipo de cohetes en programas de cohería sonda en Colombia. Sin embargo, como una conclusión prematura, en este punto se hace evidente la necesidad de aumentar los esfuerzos en investigación y desarrollos de la propulsión híbrida, con el fin de lograr rendimientos semejantes a los motores sólidos.

Etapa 3: Oportunidades para la implementación de cohetes híbridos tipo sonda en Colombia

La evolución constante del sector aeroespacial en Colombia, desde la concepción de la FAC hasta el lanzamiento reciente del satélite FACSAT-2 en abril de 2023 (FAC, 2023), se ha desarrollado gracias a la sinergia entre la academia, la industria y el Estado, junto con

alianzas internacionales. El conjunto de estos actores es denominado “la triple hélice de la cadena aeroespacial colombiana” (Revista Contacto, 2022). Los recursos con los que cuenta Colombia, aprovechados por esta sinergia, conciben una serie de oportunidades emergentes por considerar para el desarrollo de un programa de cohetes sonda en el país:

- **Ventajas geográficas:**

La ubicación de Colombia cerca de la línea del ecuador es estratégicamente ideal para el lanzamiento de cohetes sonda y satélites. Debido a la rotación terrestre, esta zona proporciona un impulso adicional a los lanzamientos, lo cual se traduce en un menor consumo de combustible y un aumento en la capacidad de carga útil. Esta ventaja pone a Colombia en una posición privilegiada en comparación con naciones más alejadas del ecuador y permite una optimización tanto en los costos como en las operaciones espaciales (Álvarez-Calderón, 2020).

- **Sostenibilidad y rentabilidad del sector espacial:**

Se prevé que la industria espacial continúe su tendencia de crecimiento acelerado, con expectativas de ingresos globales superando el trillón de dólares hacia 2040 (Knowledge at Wharton, 4 de junio de 2019). Colombia, dadas sus ventajas geográficas, tiene una oportunidad única de integrarse en este mercado en crecimiento, ofertando servicios de lanzamiento que son competitivos y rentables a nivel global (Poveda-Zamora, 2020). Adicionalmente, la consolidación y expansión de la red satelital colombiana, impulsada por la soberanía del país sobre su órbita geostacionaria, exige la disponibilidad de cohetes sonda para el avance tecnológico y de entendimiento en materia espacial, facilitando así el crecimiento de esta industria en el país, tal como se vio en países como India y Brasil.

- **Oportunidades geopolíticas:**

Las alianzas geopolíticas actuales ofrecen retos y ventajas para Colombia. La adhesión a los acuerdos Artemis por parte de Colombia (NASA, 2022), que establecen un conjunto de principios prácticos para guiar la cooperación en materia de exploración espacial

entre naciones, ofrece un escenario interesante a nivel de cooperación internacional. Es claro que las relaciones internacionales serán determinantes en las futuras colaboraciones y en el despliegue de infraestructura espacial en territorio colombiano.

- **Políticas internas:**

Colombia ha estado trabajando en establecer una presencia en el ámbito aeroespacial y del espacio ultraterrestre, lo cual se refleja en varias leyes y políticas públicas. A continuación, se presentan algunos de los esfuerzos y estructuras legislativas relevantes:

Ley 2302 de 2023: Establece medidas para asegurar la defensa e integridad territorial de Colombia en el espacio, promoviendo el desarrollo del sector espacial bajo el liderazgo estatal. Asegura la alineación con la Constitución y los tratados internacionales, y busca que las actividades espaciales, incluyendo la Luna y otros cuerpos celestes, no comprometan la seguridad, la defensa, las operaciones aéreas y espaciales, ni la soberanía nacional.

Proyecto de Ley 023 de 2023: Crea la Agencia Nacional de Seguridad Digital y Asuntos Espaciales, que tendrá la responsabilidad de coordinar, definir y hacer seguimiento a las políticas de seguridad digital y del sector espacial.

Proyecto de Ley 373 de 2023: Establece un marco regulatorio para el desarrollo del sector espacial colombiano. El proyecto propone, entre otras cosas, la creación de zonas francas destinadas a empresas del sector espacial, el apoyo a la investigación y el desarrollo espacial, y la promoción de la apropiación social del conocimiento espacial.

En general, Colombia está dando pasos importantes para desarrollar su sector espacial, estableciendo un marco legal y político favorable para el desarrollo del sector, promoviendo medidas para incentivar la investigación, el desarrollo y la aplicación de las tecnologías espaciales. Por su parte, la creación de entidades como la Comisión Colombiana del Espacio (CCE) y la Corporación Científica del Sector Aeroespacial (COCSA) refleja el compromiso nacional creciente por el desarrollo científico y tecnológico para el beneficio del país.

- **En cuanto a la propulsión híbrida:**

El desarrollo de un programa de cohetes tipo sonda en Colombia requiere superar desafíos significativos en términos de infraestructura, aspectos socioeconómicos y normativas, especialmente en lo que respecta a la gestión de ciertos propelentes (Urrego-Peña, 2019). En este contexto, la propulsión híbrida emerge como una solución técnica y económicamente viable. Combustibles como la parafina y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), que son de fácil acceso y tienen un costo moderado en Colombia, se presentan como opciones viables para el desarrollo y la investigación de motores experimentales (Arteaga-Moreno, 2018). Además, la integración de métodos de manufactura aditiva simplifica la producción de componentes complejos y permite la creación de geometrías específicas para el diseño de combustibles.

En resumen, la propulsión híbrida no solo se perfila como una alternativa técnica adecuada para Colombia, sino también como una estrategia alineada con las particularidades y los desafíos del entorno aeroespacial colombiano. Esta tecnología podría ser el punto de partida para los estudios y desarrollos de infraestructura necesarios, impulsando así las ciencias y la industria espacial en el país.

Etapa 4: Validación experimental, desarrollo del cohete AINKAA H1

Para generar el diseño del cohete AINKAA H1, se parte del diagrama de la Figura 2 en el cual se consideran los sistemas principales que conforman un cohete:

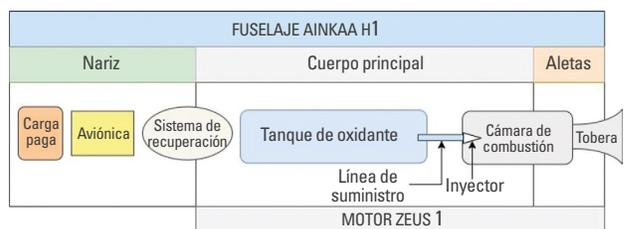


Figura 2. Esquema del diseño conceptual del AINKAA H1
Fuente: elaboración propia.

El cohete AINKAA H1 está compuesto por un fuselaje que incluye la nariz o cofia, el cuerpo principal y

las aletas. Dentro de la nariz se aloja la carga útil, junto con la aviónica encargada del control del motor y la medición de variables de interés, así como el sistema de geolocalización. Además, el cohete está equipado con un sistema de separación que permite desprender la nariz del cuerpo principal y activar el mecanismo de recuperación. Las aletas, acopladas al fuselaje, proporcionan la estabilidad necesaria durante el vuelo. En la Figura 3, se presenta el diseño propuesto para el prototipo del cohete AINKAA H1.

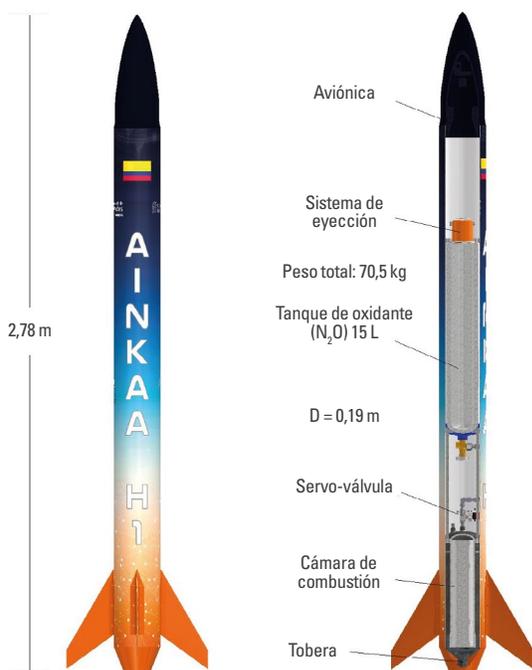


Figura 3. Diseño del cohete AINKAA H1
Fuente: elaboración propia.

A su vez, en el diseño del motor híbrido Zeus 1 se identifican dos conjuntos principales: el tanque de oxidante y la cámara de combustión, componentes que están conectados a través de la línea de suministro, la válvula reguladora y el inyector. El diseño del motor se centra en dos objetivos clave: su caracterización en pruebas de banco y el desarrollo del sistema de propulsión para el cohete AINKAA H1, con el fin de desarrollar una misión aeroespacial buscando alcanzar la estratosfera, alrededor de 7 km de altitud (Prada-Conde, 2023).

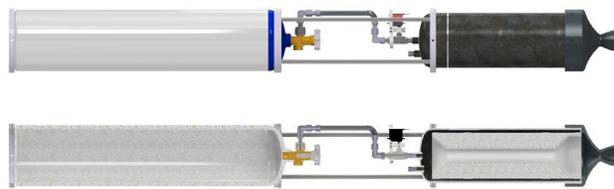


Figura 4. Modelo del motor Zeus 1
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4, es posible observar el diseño general del motor Zeus 1. De izquierda a derecha se tiene: el tanque de oxidante, la línea de suministro con la electroválvula diseñada para controlar la apertura y el cierre del paso de oxidante, el inyector, la cámara de combustión y la tobera. Se diseñó una unión conformada por mamparos y barras de acero para mantener alineado el tanque de oxidante y la cámara de combustión. Para la mezcla de propelente híbrido, se eligió ABS como combustible y óxido nitroso (N_2O) como oxidante. En el corte de sección transversal del motor, es posible observar el grano de combustible ubicado dentro de la cámara de combustión.

Tabla 9.
Características principales del AINKAA H1

Balística teórica	
Número de etapas del cohete	1
Empuje [N]	2000
Tiempo de quemado [s]	10
Peso total del cohete [kg]	70,5
Apogeo total [msnm]	7000
Tiempo total de vuelo [s]	220
Diámetro [m]	0,19
Longitud total [m]	2,8
Oxidante	N_2O
Combustible	ABS

Fuente: elaboración propia.

El diseño conceptual del AINKAA H1 se establece como un cohete de una única etapa, con un empuje teórico de 2 kN y un tiempo de quemado de 10 segundos. El peso total estimado es de 70,5 kg, con el objetivo de alcanzar un apogeo de 7 km de altitud. A pesar de sus dimensiones compactas, con un diámetro de

0,19 metros y una longitud de 2,8 metros, el cohete mantiene un rendimiento significativo, tal como se resume en la Tabla 9, que presenta las características principales del cohete AINKAA H1.

- **Prototipado:**

En la Tabla 10, se presenta la descripción detallada del desarrollo y las pruebas de los prototipos del cohete AINKAA H1 y el motor Zeus 1:

Tabla 10.
Descripción de los componentes del fuselaje del AINKAA H1

Fuselaje	
Componente	Descripción
Cofia	Elaborada mediante manufactura aditiva, la nariz o cofia incluye un soporte para ubicar la cámara de grabación de vuelo con la cual se hará registro de la misión desde el cohete.
Cuerpo principal	Para la fabricación del cuerpo principal del fuselaje, se tiene una lámina de aluminio 1100 comercial que fue rolada a un diámetro de 197 mm por 2200 mm de longitud.
Aletas	Cuatro piezas elaboradas mediante manufactura aditiva. Cada una de las aletas presenta seis agujeros para ensamblar mediante tornillos al fuselaje. Estas aletas se diseñaron buscando un área mayor en la base y generando una disminución gradual hasta la punta, con el fin de soportar las cargas aerodinámicas durante el vuelo.
Boattail	Pieza elaborada a partir de una lámina de aluminio rolada en forma de cono. Esta pieza se acopla directamente al cuerpo de fuselaje mediante soldadura.

Fuente: elaboración propia.

El fuselaje del cohete ha sido diseñado con un enfoque tanto funcional como estructural, teniendo en cuenta las demandas de vuelo y la eficiencia en el montaje. La nariz y las aletas están fabricadas mediante manufactura aditiva, lo cual demuestra una gran adaptabilidad en el diseño y la producción. Esto permite la integración de componentes adicionales, como la cámara para el registro del vuelo, además de proporcionar un espacio de 1,7 litros para la aviónica y la carga útil del cohete, así como la instrumentación necesaria para la documentación de la misión.

El cuerpo principal, fabricado con una lámina de aluminio comercial, combina robustez, resistencia y un peso ligero, ideal para el vuelo. El diseño de las aletas garantiza la estabilidad aerodinámica del cohete durante el vuelo, actuando como superficie de control

que asegura una trayectoria recta y previene movimientos indeseados o giros. Finalmente, el *boattail*, una sección cónica en la parte posterior del fuselaje, está diseñado para mejorar la aerodinámica, reduciendo la resistencia del aire y optimizando el flujo de gases de escape, lo cual mejora la eficiencia del vuelo, especialmente durante el ascenso a alta velocidad. En conjunto, el diseño del fuselaje resulta en una combinación de diferentes técnicas de manufactura con un enfoque práctico de ingeniería, buscando un costo accesible y la reducción de los tiempos de fabricación.

Tabla 11.
Descripción componentes del motor Zeus 1

Motor Zeus 1	
Componente	Descripción
Tanque de oxidante	Cilindro fabricado con aleación de aluminio 6061-T6 de alta resistencia con capacidad para 15,7 litros que soporta hasta 2216 PSI (15,3 MPa). Este material garantiza la integridad estructural del motor y proporciona un bajo peso para el cohete, lo que permite llegar a un mayor apogeo.
Válvulas de suministro	Este diseño se compone de una válvula de diafragma que soporta 3500 PSI accionado por un servomotor de alto torque con engranaje de metal de alta precisión y caja de aluminio.
Cámara de combustión	Una sección de 400 mm de tubo petrolero tri-norma A53/A106 - API 5L7GR B SCH 40 por diámetro de 6 pulgadas.
Tobera	Tobera en forma acampanada que se obtuvo mediante el mecanizado de una pieza de fundición en hierro nodular perlítica-ferrítica.

Fuente: elaboración propia.

El prototipo del motor Zeus 1 se destaca por su construcción cuidadosa, enfocada en la resistencia y la confiabilidad. El tanque de oxidante, fabricado con aleación de aluminio 6061-T6, ofrece no solo ligereza, sino también la capacidad de soportar presiones extremadamente altas, con un límite máximo de 2216 PSI. Las válvulas de suministro son especialmente robustas, integrando una válvula de diafragma apta para 3500 PSI, operada por un servomotor con engranajes metálicos precisos en una carcasa de aluminio. La cámara de combustión está fabricada a partir de un segmento de tubo petrolero tri-norma, lo cual asegura su resistencia tanto al calor como a la presión. Por último, la tobera, mecanizada a partir de hierro nodular perlítico-ferrítico, garantiza una alta resistencia a las

temperaturas extremas y previene la erosión causada por la expulsión de gases.

- **Experimentación en banco estático:**

El motor Zeus 1 fue sometido a tres pruebas en banco estático, en las cuales demostró un comportamiento sólido y confiable. En cada prueba, el motor exhibió un desempeño consistente, cumpliendo con los objetivos establecidos. Estos resultados positivos refuerzan la confiabilidad y la calidad del diseño del motor híbrido, proporcionando una base sólida para validar la metodología propuesta (Prada-Conde, 2023).

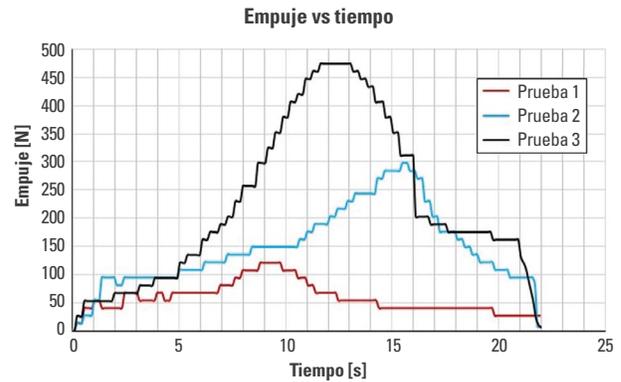


Figura 5. Montaje experimental del motor Zeus 1
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5, se presenta el montaje experimental utilizado para la caracterización del prototipo del motor Zeus 1. Las pruebas experimentales incluyeron tres encendidos, con una duración total de 20 segundos cada uno. El objetivo de estas pruebas fue caracterizar el empuje generado por el motor, así como medir las presiones y temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión y la tobera (Prada-Conde, 2023). A continuación, se presentan los resultados experimentales obtenidos.

En la Gráfica 1, se muestran las curvas de la fuerza generada por el motor a lo largo del tiempo durante las tres pruebas de encendido. Como se puede observar, el empuje sigue una tendencia característica: incrementa durante los primeros 15 segundos de operación y luego disminuye gradualmente hasta llegar a cero. Es importante destacar que los primeros 5 segundos representados en la gráfica corresponden al tiempo de activación del ignitor, lo cual explica un leve aumento

inicial del empuje, seguido por un incremento acelerado y, finalmente, una disminución del empuje debido al exceso de oxidante en la cámara de combustión (Prada-Conde, 2023).

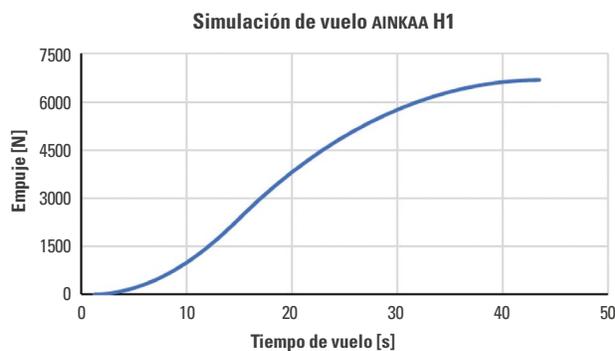


Gráfica 1. Curva de empuje contra tiempo de tres encendidos del motor Zeus 1
Fuente: Prada-Conde (2023).

- **Simulaciones de vuelo:**

Las simulaciones de vuelo del cohete AINKAA H1 se llevaron a cabo utilizando el *software* Rocksim, una herramienta que permite diseñar un cohete y simular su vuelo para evaluar parámetros como la altitud máxima, la velocidad alcanzada y la duración del vuelo. Este *software* facilita la manufactura del cohete al evitar la adquisición de piezas innecesarias y proporciona una estimación de la estabilidad y seguridad del diseño. Con el tiempo, se ha observado que los datos calculados con Rocksim se acercan considerablemente a los datos experimentales reales, lo cual respalda su alta confiabilidad.

Como se muestra en la Gráfica 2, el cohete diseñado presenta una trayectoria de vuelo segura y un comportamiento balístico deseado, alcanzando una altitud máxima de 7000 metros y un tiempo de vuelo hasta el apogeo de aproximadamente 42 segundos. Las condiciones de simulación se ajustaron de acuerdo con el reporte meteorológico de un día soleado en la Base Aérea Coronel Luis Arturo Rodríguez Meneses, en Marandúa, Vichada, con vientos entre 9 km/h y ráfagas de hasta 14 km/h, una temperatura media de 27 °C (máxima de 33 °C y mínima de 21 °C), y una elevación de la zona de lanzamiento de 87 msnm.



Gráfica 2. Curva de altitud contra tiempo de la simulación de vuelo del cohete AINKAA H1

Fuente: elaboración propia.

Discusión

El desarrollo del cohete AINKAA H1 y del motor híbrido Zeus 1 representa un hito significativo en la capacidad técnica de Colombia y subraya las oportunidades que el país tiene para innovar en el sector aeroespacial. La implementación de técnicas avanzadas de manufactura, como la manufactura aditiva, no solo presenta una notable adaptabilidad en el diseño y la producción de componentes aeroespaciales, sino que también refleja un enfoque estratégico en la optimización de costos y la reducción de los tiempos de fabricación. Este enfoque es crucial en un sector donde la eficiencia y la capacidad de adaptación a las necesidades específicas de cada misión son factores determinantes.

El motor Zeus 1 se destaca por su construcción robusta, diseñada específicamente para garantizar resistencia y confiabilidad bajo condiciones extremas. Las pruebas en banco estático han demostrado que el diseño del motor no solo cumple con los parámetros de rendimiento deseados, sino que también ofrece un margen de seguridad considerable, lo cual es esencial para operaciones de alta confiabilidad. Estas pruebas validan el enfoque de diseño adoptado y proporcionan una base sólida para futuras iteraciones y mejoras en el motor. Es necesario resaltar que el Zeus 1 fue una primera iteración de un diseño de motor que tiene un amplio margen de mejora y que seguramente se podrá obtener un mejor rendimiento con la inversión de más recursos para su desarrollo.

A nivel internacional, el cohete AINKAA H1 puede ser comparado con otros proyectos similares desarrollados por grupos universitarios, como el cohete Compass. Aunque el Compass es un vehículo de menor tamaño y capacidad en comparación con el AINKAA H1, su apogeo máximo de 3 km es significativamente menor que el apogeo teórico de 7 km del AINKAA H1. Esta comparación subraya el rendimiento superior del cohete colombiano y destaca la efectividad del diseño y los materiales seleccionados. Lo que realmente distingue al proyecto AINKAA H1 es su enfoque en la adaptabilidad y la versatilidad durante el proceso de fabricación, que no solo permite una reducción de costos, sino que también asegura una operación confiable, lo cual es crucial en misiones que demandan precisión y seguridad.

Además, es importante destacar el papel fundamental que ha jugado la formación de redes estratégicas en el éxito del proyecto. Estas redes, que incluyen la colaboración entre universidades, industria y entidades del Estado colombiano, han facilitado el intercambio de conocimientos, recursos y capacidades técnicas necesarias para llevar a cabo un proyecto de esta envergadura. La sinergia creada a través de estas colaboraciones ha sido un elemento clave para superar los desafíos inherentes al desarrollo de tecnología aeroespacial avanzada en un contexto nacional con recursos limitados.

En resumen, el cohete AINKAA H1 y el motor Zeus 1 no solo son demostraciones de la capacidad técnica alcanzada, sino que también representan un modelo a seguir para futuros desarrollos en el sector aeroespacial colombiano. La combinación de innovación en diseño, adaptabilidad en producción y colaboración estratégica posiciona a estos proyectos como referentes en la industria, y sienta las bases para el crecimiento y la consolidación de la capacidad aeroespacial en Colombia.

Conclusiones

El desarrollo del cohete AINKAA H1 y del motor híbrido Zeus 1 representa un avance significativo en la

capacidad tecnológica de Colombia, demostrando el potencial del país para innovar en la industria aeroespacial. Tales logros subrayan la importancia de aprovechar la ventaja geográfica de Colombia, situada cerca del ecuador, una ubicación que históricamente ha sido clave en proyectos de lanzamientos espaciales en otros países, como el caso del Centro Espacial de Kourou en la Guayana Francesa. Colombia, al igual que otras naciones con una posición geográfica estratégica, tiene la oportunidad de utilizar esta ventaja para reducir costos y mejorar la eficiencia de los lanzamientos, con lo cual abre nuevas posibilidades para el desarrollo espacial.

Es esencial que el país invierta en el desarrollo de infraestructuras críticas que respalden estos avances tecnológicos. Ejemplos específicos incluyen la creación de centros de lanzamiento especializados, como lo es la Base Aérea de Marandúa que ya se perfila como un sitio con un potencial significativo para convertirse en un puerto espacial. Además, es necesario establecer laboratorios de investigación equipados con tecnología de punta para la fabricación y prueba de componentes aeroespaciales como el Centro de Operaciones Espaciales de la FAC (SpOC), situado en las instalaciones de la Escuela Militar de Aviación, en la ciudad de Cali. Nuevas infraestructuras no solo permitirían el crecimiento de la industria aeroespacial en Colombia, sino que también servirían como catalizadores para atraer inversiones y fomentar la investigación avanzada en el país.

El impacto positivo del crecimiento del sector aeroespacial en otras naciones proporciona un modelo a seguir para Colombia. En países como India y Brasil, el desarrollo de sus programas espaciales ha generado un aumento significativo en la creación de empleos tanto directos como indirectos, ha impulsado la educación técnica y científica, y ha fomentado el avance tecnológico en múltiples sectores. Colombia tiene la oportunidad de replicar estos beneficios, impulsando el empleo de alta calificación, fortaleciendo la educación en STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) y promoviendo la transferencia de tecnología en la industria nacional.

Finalmente, el éxito del cohete AINCAA H1 y del motor Zeus 1 refuerza la necesidad de continuar invirtiendo en investigación y desarrollo dentro del campo aeroespacial. Es crucial que se implementen políticas públicas que apoyen la creación de un ecosistema robusto para la investigación y la innovación, además de fomentar la colaboración entre el Gobierno, la academia y la industria. Este proyecto establece un precedente que debe ser aprovechado para asegurar que Colombia no solo participe, sino que también se posicione como un líder en el ámbito aeroespacial en América Latina.

Referencias

- Aerospace Systems Research Institute (ASRI). (s. f.). *Phoenix-1B Mk II*. University of KwaZulu-Natal [en línea]. <https://aerospace.ukzn.ac.za/rocket-projects/phoenix/phoenix-1b-mk-ii/>
- Álvarez-Calderón, C. E. (2020). *El cielo no es el límite: el futuro estelar de Colombia*. Editorial Universidad Católica.
- Andøya Space. (2023). *Sounding rocket launch services* [en línea]. <https://andoyaspace.no/what-we-do/sub-orbital/sounding-rockets/>
- Arteaga-Moreno, L. A. (2018). *Design, Construction and Tests of a Rocket Propulsion Motor with Hybrid Propellant in a Static Bank* [tesis doctoral, Universidad de los Andes].
- Barrero-Barrero, D. (2021). Fuerza Aérea Colombiana: motor propulsor hacia el espacio ultraterrestre del país hacia un triple desarrollo. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 87-101. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8475676>
- Chiaverini, M. y Kuo, K. (2007). *Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion*. Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica.
- Congreso de la República. (2023, 12 de julio). *Ley 2302 de 2023. Por medio de la cual se adoptan medidas para garantizar la defensa e integridad territorial en el ámbito espacial y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial 52.454.
- Da Motta-Silva, F. y Perondi, L. F. (2020). A Proposal of a Life-Cycle for the Development of Sounding Rockets Missions. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 13. <https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1193>

- European Space Agency (ESA). (2014). *ESA User Guide to Low Gravity Platforms* [en línea]. <http://wsn.spaceflight.esa.int/docs/EUG2LGPr3/EUG2LGPr3-0-Start.pdf>
- European Space Agency (ESA). (2014). (2023). *Sounding Rockets* [en línea]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Sounding_rockets
- Fuerza Aérea Colombiana (FAC). (2023, 22 de junio). Agencia Espacial Europea y Fuerza Aérea Colombiana fortalecen cooperación en el ámbito espacial. Sala de Prensa Fuerza Aérea Colombiana [en línea]. <https://www.fac.mil.co/es/noticias/agencia-espacial-europea-y-fuerza-aerea-colombiana-fortalecen-cooperacion-en-el-ambito>
- Fuerza Aérea Colombiana (FAC). (s. f.). FACSAT-2 *Chiribiquete* [en línea]. <https://poderespacial.fac.mil.co/facsat-2>
- Geneviève, B. (2013). *Development of a Hybrid Sounding Rocket Motor* [tesis de maestría, University of KwaZulu-Natal]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/10413/8973>
- HyEnD. (2023). *Pushing the Limits of Hybrid Propulsion. Student Rocketry Team of the University of Stuttgart* [en línea]. <https://hyend.de/>
- HyImpulse. (2021). *Sounding Rocket* [en línea]. <https://www.hyimpulse.de/en/products/4-project-2-sounding-rocket>
- IHI Aerospace. (2018). *Sounding Rocket* [en línea]. <https://www.ihj.co.jp/ia/en/products/space/s/index.html>
- Indian Space Research Organization (ISRO). (2023). *Sounding Rockets* [en línea]. <https://www.isro.gov.in/soundingRockets.html>
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). (2020). *Sounding Rockets* [en línea]. https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/sounding_rockets/
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). (2020). *What is ISAS?* [en línea]. <https://www.isas.jaxa.jp/en/about/outline/>
- Joya Olarte, R. A. (2007). Libertad 1. Primer satélite colombiano en el espacio. Observatorio Astronómico Universidad Sergio Arboleda [en línea]. <https://www.usergioarboleda.edu.co/satelite-libertad-1/>
- Knowledge at Wharton*. (2019, 4 de junio). Why Big Business is Making a Giant Leap into Space [en línea]. <https://knowledge.wharton.upenn.edu/article/commercial-space-economy/#:~:text=The%20global%20space%20industry%20is,recent%20report%20by%20the%20firm>
- Kobald, M., Fischer, U., Tomilin, K., Petrarolo, A. y Schmierer, C. (2017). Hybrid Experimental Rocket Stuttgart: A Low-Cost Technology Demonstrator. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 55(2), 484-500. <https://doi.org/10.2514/1.A34035>.
- Larsen, M. (2003). Observation Platforms. Rockets. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (G. R. North, J. Pyle y F. Zhang, eds.; pp. 1449-1454). Clemson University.
- Morante-Granobles, D. F. (Comp.). (2021). *Clústeres aeroespaciales. Polo de desarrollo en Colombia*. Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez.
- Nammo. (2018). *Nucleus Sounding Rocket* [en línea]. <https://www.nammo.com/product/nucleus-sounding-rocket/>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (s. f.). *About Sounding Rockets* [en línea]. https://www.nasa.gov/mission_pages/sounding-rockets/missions/index.html
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2013). *It is Rocket Science. Remarkable Discoveries from NASA's Sounding Rocket Program*. Scientific Colloquium, Goddard Space Flight Center, noviembre de 2013.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2021). *NASA Sounding Rockets Annual Report 2021*. https://sites.wff.nasa.gov/code810/files/Annual_Report_2021.pdf
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2023). *NASA Sounding Rockets User Handbook* [en línea]. <https://sites.wff.nasa.gov/code810/files/SRHB.pdf>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2022, 10 de mayo). *Colombia firma los Acuerdos Artemis* [en línea]. <https://www.nasa.gov/humans-in-space/colombia-firma-los-acuerdos-artemis/>
- Oechsle, M., Dobusch, J., Gritzka, M. y Jochum, P. (2022). *Design and Launch of the Hybrid Rocket Demonstrator Compass*. 2nd International Conference on Flight Vehicles, Aerothermodynamics and Re-entry Missions & Engineering. Heilbronn, Alemania.
- Osorio-Tovar, J. (2022). *Computational Study of Hybrid Propulsion with Beeswax as Solid Propellant* [trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/55603>
- Parra, S. (2023). India hace historia y ya es el cuarto país que llega a la Luna. *National Geographic* [en línea]. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/india-hace-historia-ya-es-cuarto-pais-que-llega-luna_20606
- Poveda-Zamora, G. A. (2020). Revisión teórica y aplicación práctica de las ciencias del espacio para reducir el consumo de combustibles en cohetes y vehículos espaciales. *Revista Ciencia y Poder Aéreo*, 15(1), 152-160. <https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/657/943>

- Prada-Conde, S. (2023). *Desarrollo e implementación del software Hybmotor para el diseño de motores híbridos tipo cohete* [tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/69356>
- Revista Contacto. (2022). Las hélices claves para potenciar la cadena aeroespacial [en línea]. <https://revistacontacto.uniandes.edu.co/contacto-25-cadena-aeroespacial/las-helices-claves-para-potenciar-la-cadena-aeroespacial/>
- Robayo-Salazar, R., Meneses-Suta, J., Pinto-Álvarez, C., Guzmán-Grajales, C., Rey-González, N. y Bazurdo-Castañeda, J. (2020). *Proyectos en cohetería experimental en la EMAVI-FAC como un pilar para fomentar el desarrollo aeroespacial de la región* [ponencia]. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2020. <https://doi.org/10.26507/ponencia.861>
- Robledo-Ascencio, J. C. (2012). Importancia del diseño y construcción de cohetes sonda en Latinoamérica, Brasil y Argentina. *TecnoESUFA: Revista de Tecnología Aero-náutica*, 18. <https://publicacionesfac.com/index.php/TecnoESUFA/article/view/376?articlesBySameAuthorPage=2>
- Schmierer, C., Kobald, M., Tomilin, K., Fischer, U., Rehberger, M. y Schlechtriem, S. (2015). *HEROS - Sounding Rocket Development by the HyEnD Project* [ponencia]. 6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences. Cracovia, Polonia.
- Schmierer, C., Kobald, M., Fischer, U., Tomilin, K., Petrarolo, A. y Hertel, F. (2019). *Advancing Europe's Hybrid Rocket Engine Technology with Paraffin and LOX* [ponencia]. 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences. Madrid, España.
- Seibert, G. (2006). *The History of Sounding Rockets and Their Contribution to European Space Research*. ESA Publications Division.
- Space Foundation. (2022). *Space Industry Growth: Where Are the Opportunities in 2022?* CI&E News [en línea]. <https://cie.spacefoundation.org/space-industry-growth-where-are-the-opportunities-in-2022/#:~:text=The%20global%20space%20economy%20hit,global%20space%20ecosystem%20is%20vast>
- Swedish Space Corporation (ssc). (2023). *Espace Space Center* [en línea]. <https://ssc.space.com/esrange/>
- Sutton, G. P. y Biblarz, O. (2016). *Rocket Propulsion Elements* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Urrego-Peña, J. A. (2019). *Research in Experimental Rocketry: Study of Influence of Geometric and Manufacture Parameters in Combustion of Polymeric Hybrid Rocket Fuel Grains* [tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/41265>

Procedimiento administrativo en la recepción y custodia de los componentes aéreos como bienes incautados

| Fecha de recibido: 06 de marzo de 2024 | Fecha de aprobado: 18 de julio de 2024 |

| Reception date: March 06, 2024 | Approval date: July 18, 2024 |

| Data de recebimento: 06 de março de 2024 | Data de aprovação: 18 de julho de 2024 |

Leydyn Marino Tejada Aguilar

<https://orcid.org/0000-0002-8627-260X>
40957651@espograpnp.com

Abogado

Mayor - Policía Nacional Del Perú, Perú
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica

Lawyer

Major - Peruvian National Police, Peru
Researcher's role: theoretical and writing
Operational Safety and Aeronautical Logistics Group

Advogado

Mayor - Policía Nacional Peruana, Peru
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de Segurança Operacional e Logística Aeronáutica

Jaime Castilla Barraza

<https://orcid.org/0000-0001-8234-9449>
jaime.castilla@upn.pe

Ph. D en Derecho

Docente e investigador – Universidad Privada del Norte, Perú
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica

Ph. D in Law

Professor and Researcher - Universidad Privada del Norte, Peru
Researcher's role: theoretical and writing
Operational Safety and Aeronautical Logistics Group

Doutoramento em Direito

Docente e investigador - Universidad Privada del Norte, Peru
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de Segurança Operacional e Logística Aeronáutica

Cómo citar este artículo: Tejada Aguilar, L. M. y Castilla Barraza, J. (2025). Procedimiento administrativo en la recepción y custodia de los componentes aéreos como bienes incautados. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 33-45. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.809>



Procedimiento administrativo en la recepción y custodia de los componentes aéreos como bienes incautados

Resumen: El objetivo de esta investigación es analizar el procedimiento administrativo en la recepción y custodia de los componentes aéreos como bienes incautados en el Almacén General de la Dirección de Aviación Policial. Con este propósito, se empleó un enfoque cualitativo, haciendo uso de la entrevista como técnica de recopilación de datos. Los resultados destacan una serie de desafíos en este proceso para la operación de la Dirección de Aviación Policial, de la Policía Nacional del Perú. Entre los hallazgos más relevantes se incluye la deficiencia de los procedimientos normativos y de un mejor sustento legal que respalde la recepción y custodia de componentes aéreos, lo cual genera dificultades en la valorización de los bienes en el inventario. Asimismo, se identificó la necesidad de capacitar al personal y la disponibilidad de expertos como elementos críticos para garantizar la eficiencia y eficacia en el proceso de recepción y custodia de componentes aéreos que son producto de la incautación. La gestión de documentación y la trazabilidad de los componentes aéreos incautados por parte de las autoridades peruanas se destacaron como aspectos esenciales para el control y seguimiento de los componentes, y la escasa documentación requerida dificulta estos procesos.

Palabras clave: capacitación; gestión de documentación; procedimientos normativos; trazabilidad.

Administrative procedure for the reception and custody of aerial components as seized assets

Abstract: The objective of this research is to analyze the administrative procedure in the reception and custody of airborne components as seized assets in the General Warehouse of the Police Aviation Directorate. To achieve this purpose, a qualitative approach was employed, using interviews as a data collection technique. The results highlight a series of challenges in this process for the operation of the Police Aviation Directorate of the National Police of Peru. Among the most relevant findings is the deficiency of regulatory procedures and the need for better legal support to back the reception and custody of airborne components, which generates difficulties in the valuation of assets in the inventory. Additionally, the need for staff training and the availability of experts were identified as critical elements to ensure efficiency and effectiveness in the reception and custody process of airborne components resulting from seizure. The management of documentation and the traceability of seized airborne components by Peruvian authorities were highlighted as essential aspects for the control and monitoring of components, and the lack of required documentation complicates these processes.

Keywords: Training, documentation management, normative procedures, traceability.

Procedimento administrativo para recepção e custódia de componentes aéreos como bens apreendidos

Resumo: O objetivo desta pesquisa é analisar o procedimento administrativo na recepção e custódia de componentes aéreos como bens apreendidos no Armazém Geral da Direção de Aviação Policial. Para alcançar este propósito, foi empregada uma abordagem qualitativa, utilizando a entrevista como técnica de coleta de dados. Os resultados destacam uma série de desafios neste processo para a operação da Direção de Aviação Policial da Polícia Nacional do Peru. Entre os achados mais relevantes está a deficiência dos procedimentos normativos e a necessidade de um melhor apoio legal que respalde a recepção e custódia dos componentes aéreos, o que gera dificuldades na valorização dos bens no inventário. Além disso, foi identificada a necessidade de treinamento de pessoal e a disponibilidade de especialistas como elementos críticos para garantir a eficiência e eficácia no processo de recepção e custódia de componentes aéreos resultantes de apreensão. A gestão de documentação e a rastreabilidade dos componentes aéreos apreendidos pelas autoridades peruanas foram destacadas como aspectos essenciais para o controle e monitoramento dos componentes, e a escassa documentação exigida dificulta esses processos.

Palavras-chave: Gestão de documentação, Treinamento, procedimentos normativos, rastreabilidade.

Introducción

La Policía Nacional del Perú es una institución tutelar del Estado peruano, la cual ha marcado hitos históricos importantes, devolviéndole la paz social al Perú, y garantizando, manteniendo y restableciendo su orden interno. De esa forma, busca el irrestricto cumplimiento de las leyes, prestando ayuda y seguridad a las personas y al patrimonio, público o privado, así como en la prevención y lucha contra la delincuencia, en cumplimiento del mandato constitucional de la Ley 1267 de 2016 (Ley de la Policía Nacional del Perú).

Con este marco normativo, la Policía Nacional del Perú cuenta con varias unidades de apoyo, siendo una de ellas la Dirección de Aviación Policial (Diravpol), que depende orgánica y funcionalmente del Comando de Asesoramiento General. La Diravpol está encargada de planear, organizar, coordinar, dirigir y ejecutar las operaciones aéreas, según requerimiento de las unidades policiales dependientes del Ministerio del Interior. Esta unidad especializada presta apoyo en las operaciones de erradicación e interdicción al tráfico ilícito de drogas, la minería informal, y la lucha contra el terrorismo y el crimen organizado, entre otras operaciones destinadas a combatir las múltiples manifestaciones del delito y orientadas al desarrollo nacional.

Para contextualizar este rol, se tiene que Namemesa y Ocampo-Muñoz (2018) refieren que en Colombia la aviación desempeña un papel fundamental en el progreso, tanto en situaciones de guerra como en tiempos de paz y crisis. Su responsabilidad es proporcionar apoyo a todos los elementos involucrados, ofreciendo seguridad, rapidez y eficiencia en el cumplimiento de los objetivos estratégicos, por lo que requiere recursos logísticos especializados.

Desde una perspectiva administrativa y logística, la aviación es una actividad compleja que subsume otras, entre las cuales se puede mencionar el abastecimiento de combustible, el mantenimiento, los repuestos, las herramientas, los lubricantes y los seguros. En el caso de Perú, se ha de considerar como marco legal la Ley 30225 de 2019 y su reglamento, que norma y regula las contrataciones de bienes, servicios y obras del

Estado. Sin embargo, existen otras formas de adquisición dentro de la administración, como son los bienes incautados, decomisados y declarados en pérdida por delitos en agravio del Estado. Frente a ello, se busca otorgar a dichos bienes un valor social, por lo que el Programa Nacional de Bienes Incautados (Pronabi, 2023) cedió a la Diravpol diecisiete aeronaves de ala fija entre pequeña y mediana envergadura.

De estas diecisiete aeronaves, solo cinco tienen el estatus de operativas, dos están en pérdida total y diez han sido dadas de baja o se encuentran en proceso de ello. Por dicha razón, los componentes aéreos de aeronaves han ingresado al margesí de bienes en el Almacén de la Diravpol, y se han producido ciertas dificultades en el cumplimiento de las normas y los procedimientos administrativos para la recepción y custodia de componentes aéreos. No obstante, estas aeronaves incautadas y cedidas en uso por el Pronabi, para fortalecer el parque aeronáutico y las operaciones aéreo-policiales en el uso de las aeronaves de la Diravpol, le generan inconvenientes de orden logístico. La problemática existente es que no es posible registrar el bien de una manera correcta, por lo tanto, no se puede considerar como parte de los inventarios valorizados, lo cual lleva a falencias en la correcta catalogación para su registro en el Sistema Integrado de Gestión Administrativa, debido a que requiere que este componente sea valorizado. Lo anterior trae como consecuencia que transcurra el tiempo sin poder darles uso, puesto que no superan las exigencias mínimas de mantenimiento al ser evaluados, dejando así de darles un valor y una finalidad social.

En tal sentido, esta investigación favorece a la administración de la Diravpol en el análisis de los procedimientos especiales para la recepción y custodia de los bienes cedidos en uso, en la pretensión de que la Policía Nacional del Perú les dé un mejor uso. Conforme se ha detallado, la temática ha dado lugar a la pregunta de investigación: ¿de qué forma se da la gestión del procedimiento administrativo en la recepción y custodia de los componentes aéreos como bienes incautados en el Almacén General de la Diravpol?

En términos conceptuales, el proceso administrativo implica seguir un control para alcanzar la mayor

eficacia posible, incluyendo aspectos que la organización por sí sola no puede englobar, tales como la planificación y la dirección. Estos conceptos indican que, por falta de un procedimiento en particular, el resultado es adverso en muchas ocasiones (Chiavenato, 2019). Además, existen dos conceptos básicos relacionados directamente con el procedimiento administrativo: (a) la organización, entendida como un conjunto de personas, procesos y organizaciones expresados armónicamente para lograr objetivos; y (b) la departamentalización, entendida como la división del trabajo en áreas, divisiones y departamentos, a partir del objetivo de la organización, teniendo ventajas como la especialización, la coordinación y el control (Cano-Plata, 2017). En ese sentido, estos componentes no pueden registrarse conforme demanda el Sistema Integrado de Gestión Administrativa, ya que solamente son internados con un informe técnico, una tarjeta de condición y un acta de internamiento, lo cual proviene de la División de Mantenimiento Aeronáutico (Divmaer).

De acuerdo con Cano-Plata (2017), toda organización es considerada como un sistema administrativo se compone de cuatro elementos: (a) las entradas, que son los insumos o recursos necesarios que recibe; (b) los procesos, que subsume a las actividades, acciones o tareas realizadas por la organización para transformar o procesar los insumos; (c) las salidas, que son los bienes o servicios generados alineados con la misión organizacional; y, (d) la retroalimentación o información de retorno, que consiste en las acciones o informaciones que se generan en torno a las salidas y que proporcionan una evaluación de los procesos organizacionales.

Estos conceptos, que se deducen en paralelo con el procedimiento que se realiza en el Almacén de la Diravpol, y de acuerdo con lo establecido en la Directiva N.º 0004-2021-EF/54.01, permiten la regulación de la gestión de almacenamiento y distribución de bienes muebles del sector público, a partir del proceso administrativo de almacenamiento:

- (a) recepción, que son actividades realizadas desde el momento en que los bienes muebles llegan al

almacén hasta su ubicación, donde se realiza la verificación preliminar;

- (b) verificación y control de calidad, en lo que se realiza la evaluación y comprobación de la calidad de los bienes recibidos, asegurando que cumplan con los estándares requeridos;
- (c) internamiento, que consiste en el ingreso formal de los bienes al sistema de almacenamiento;
- (d) registro, en lo que se documenta y registra la información relevante de los bienes almacenados para su correcta administración; y
- (e) custodia, que implica la responsabilidad de resguardar y mantener la integridad de los bienes, asegurando su conservación y evitando pérdidas o daños.

Es necesario establecer procedimientos claros para la recepción, la custodia y el manejo de los bienes en el almacén por razones como: control de calidad, seguridad de los bienes, eficiencia operativa y cumplimiento normativo. De tal modo, resulta necesario comprobar los procedimientos que se realizan en el Almacén de la Diravpol, en correspondencia con la recepción de los componentes aéreos provenientes del Pronabi, con el fin de orientar una gestión de calidad (López-Rey, 2011). Dichos conceptos, de acuerdo con la realidad problemática planteada, evidencian vacíos normativos y de procedimientos que amparen el registro de los componentes aeronáuticos que no cuentan con fecha de caducidad, operatividad y que acrediten su valoración como bienes incautados.

Para un entendimiento mayor de la problemática, se presentan algunos antecedentes de investigación. En Perú, Ramírez-Cabanillas (2019) elaboró un estudio sobre la simplificación del procedimiento que realiza el Pronabi, concluyendo que la debilidad del procedimiento es la asignación temporal de bienes decomisados por el Ministerio Público. El estudio señala que la falta de transparencia en la selección de beneficiarios de los bienes incautados podría generar dudas sobre la equidad y la justicia en la asignación de estos, sobre todo en la falta de valor social que no se cumpliría sin una correcta asignación.

En dicho contexto, Castillo-Mayanga (2021) realizó una investigación para validar la propuesta de mejora de la gestión mediante procesos y lograr el cumplimiento de los objetivos institucionales en el Pronabi. Planteó que, al diseñar una propuesta de mejora de procesos, se contribuye al cumplimiento de los objetivos establecidos en el programa nacional de bienes incautados, lo cual establece la importancia de administrar y disponer los bienes de origen ilícito provenientes de delitos contra la administración pública, entre otros delitos. Salazar-Cubas y Salazar Quesquén (2018) realizó un estudio sobre gestión de almacén y control de materiales, en el que concluye que se deben implementar políticas internas, regulaciones y funciones que faciliten el manejo eficaz del almacén, además de contar con el personal capacitado y especializado en el área, asegurando un seguimiento continuo y un aprovechamiento adecuado de los bienes para evitar pérdidas o deterioros materiales.

Como antecedentes internacionales, Pavel (2020) realizó una investigación sobre el proceso administrativo de responsabilidad patrimonial en España, analizando dicho procedimiento en las entidades. Concluyó que existe la necesidad de reevaluar el marco normativo del procedimiento de responsabilidad patrimonial, así como la conveniencia de contar con un proceso mejorado que beneficie a la institución misma en términos de responsabilidad patrimonial.

Tregubov (2023) realizó un estudio con el objetivo de explorar la detención administrativa como una forma de coerción procesal en los asuntos internos de la Federación de Rusia. Empleó un análisis cualitativo de las leyes y prácticas existentes en torno a la detención administrativa. Los resultados indican que la detención administrativa se aplica con frecuencia, contrario a su designación como medida excepcional. Concluye que es necesario mejorar el apoyo procesal y organizativo, junto con propuestas de cambios legislativos para mejorar la eficacia de la detención administrativa.

Markova (2020), por su parte, realizó un estudio sobre la correlación entre los conceptos de «procedimiento administrativo» y «proceso administrativo» en el derecho administrativo ruso. Empleó una revisión analítica de las doctrinas y los conceptos existentes,

centrándose en criterios específicos como el alcance, el propósito funcional y el propósito objetivo. Los resultados revelan una ambigüedad y confusión significativas en torno a estos conceptos, lo cual sugiere que el proceso administrativo es más abstracto y doctrinal, mientras que el procedimiento administrativo es normativo y debe definirse legislativamente. La conclusión hace hincapié en la necesidad de definiciones más claras para mejorar la seguridad jurídica.

La presente investigación examina las normas y los procedimientos establecidos para la recepción y custodia, por parte del Almacén General, de los componentes aéreos incautados que son cedidos en uso por el Pronabi a la Diravpol, orientado al fortalecimiento del parque aeronáutico y con ello las operaciones aéreas de la Policía Nacional del Perú. No obstante, este hecho ha sido observado por los diferentes órganos de control, causando inconvenientes de carácter administrativo.

Objetivo

El presente estudio tiene por objetivo: analizar el procedimiento administrativo en la recepción y custodia de los componentes aéreos como bienes incautados en el Almacén General de la Diravpol.

Método

Esta investigación fue del tipo básico, ya que busca ampliar los conocimientos sobre la temática en cuestión. Considerando que el diseño de la investigación es esencial para comprender la dinámica de la experiencia compartida entre el investigador y los participantes, Janesick (2020) se basó en una perspectiva fenomenológica-hermenéutica. En este sentido, el estudio se basa en la contribución de un grupo de seis participantes, teniendo en consideración los criterios de inclusión (pertenencia a la Unidad, la especialidad como operador logístico y la participación en las distintas actividades de logística y administración, desempeñando sus funciones en el Almacén de la

Diravpol) y los criterios de exclusión (participantes que no pertenecen a esta Unidad Policial, que carecen de experiencia en logística por no tener una comprensión adecuada de los procesos logísticos y aquellos que no tienen vínculo con el Almacén de la Diravpol. Estos criterios se han establecido cuidadosamente para garantizar que los participantes sean los más adecuados para abordar la problemática de la investigación.

Este artículo, de enfoque cualitativo, se centra en la explicación de los sucesos y utiliza técnicas como la entrevista y la observación (Toscano-Hernández *et al.*, 2020). Para su desarrollo, parte de la situación problemática, específicamente en lo vinculado con el procedimiento administrativo de recepción, verificación y control de calidad y el registro de los componentes aéreos incautados en el Almacén General de la Diravpol. Se guía por los criterios de rigurosidad propuestos por Guba y Lincoln (2000), con una guía de entrevista como instrumento, que ha sido sometida al juicio de expertos. Además, se debe tener en cuenta que existen diversas opciones para el procesamiento de datos, y la elección se fundamenta en el campo de investigación, las habilidades del equipo de trabajo, el *software* disponible, la cantidad y calidad de datos recolectados, de acuerdo con Borda *et al.* (2017). En la investigación, se ha contado con el apoyo de ATLAS.ti; y para la codificación, se apeló al uso de la inteligencia artificial a través de ChatGPT, conforme a Lopezosa *et al.* (2022). En cuanto a las consideraciones éticas, el estudio ha sido transparente al exponer los alcances de la investigación y sus implicaciones para los participantes (Morales-González *et al.*, 2011).

Resultados

En relación con la subcategoría del proceso de recepción de un componente aeronáutico producto de una incautación, se debe realizar previamente su verificación física, “observando la cantidad, número de parte y fecha de fabricación, así como también otro tipo de documentación, tales como un informe técnico, tarjeta

de condición, requerida para realizar actividades aeronáuticas” (Entrevistado 5).

El proceso comienza con la recepción de componentes, los cuales deben ser verificados para asegurar que cumplen con las normas y especificaciones aplicables a las actividades de aviación. En caso de dudas sobre su procedencia, es fundamental que el área especializada, específicamente la División de Mantenimiento Aeronáutico, realice la verificación, el control y la trazabilidad de manera rigurosa, a pesar de las dificultades que puedan surgir debido a la escasa documentación histórica de los componentes, provenientes de aeronaves incautadas.

La recepción de componentes provenientes de bienes incautados es un proceso crucial que implica diversas etapas administrativas interconectadas. La fase inicial, conocida como adjudicación provisional, consiste en la asignación preliminar de los componentes incautados por la fuerza pública y administrados por Pronabi, los cuales son entregados a la Diravpol con el propósito de ser utilizados y de otorgarles un valor social que cumpla con una finalidad pública. Este proceso puede estar condicionado por factores como las necesidades institucionales y las prioridades operativas en la lucha contra la criminalidad, especialmente en el caso de la Diravpol, que actúa como una unidad de apoyo a las Unidades Operativas de la Policía Nacional del Perú.

Esta etapa es la base del manejo administrativo de bienes incautados, es decir que “implica una serie de tareas críticas especializadas, desde la correcta identificación de los componentes hasta su ingreso al inventario del almacén para su custodia y posterior disposición final” (Entrevistado 1), puesto que debe garantizarse que cada componente aeronáutico esté en condición física y operativa, toda vez que existen normas y manuales de estricto cumplimiento.

En ese entendido, el proceso de la recepción de componentes que son incautados inicia cuando “ingresan a la entidad a mérito Resolución Administrativa para su alta de los bienes, tomando conocimiento el Área de Abastecimiento y con memorándum se dispone la recepción al almacén general” (Entrevistado 3). Para ello, la Diravpol establece las responsabilidades

del Almacén, siendo el primer filtro de la entidad, por lo tanto, debe contar con la designación de personal especializado encargado de la inspección, el registro de datos, la gestión de la documentación y la toma de decisiones sobre la aceptación o el rechazo de componentes de manera responsable.

Es necesario establecer criterios claros para la aceptación o el rechazo de componentes, dado que es fundamental para mantener la integridad y la procedencia de los bienes incautados. Según el Entrevistado 2, “cualquier componente que no cumpla con estos estándares debe ser rechazado”, y se debe contar con una lista de documentación requerida para este procedimiento. Cada componente que pretende ingresar debe estar respaldado por registros y documentación que indiquen su origen, su historial y su estado actual, en los que se encuentra el sustento para la admisión de componentes para ser incorporados al inventario del almacén. Se basa en la evaluación de su cumplimiento con los criterios establecidos, tras suscribirse las actas respectivas y los formatos, los cuales llegan a ser los documentos legales que registran formalmente la transferencia de los componentes al almacén de la Diravpol.

Sobre la subcategoría de verificación y control de calidad, en el contexto de la gestión de componentes incautados, se deben explorar aspectos relacionados como las pruebas de calidad, la documentación de

control, el documento de conformidad, “los formatos de verificación y control, la revisión de componentes, el área de verificación y control, el cumplimiento de normas, el entrenamiento logístico y los formatos de observaciones” (Entrevistado 6).

En este contexto, se corrobora que la verificación de calidad es una práctica esencial para el control de los componentes aéreos incautados. Estas pruebas pueden incluir análisis físicos, químicos o técnicos, con el fin de garantizar que los componentes cumplan con los estándares establecidos, así como la precisión y confiabilidad de los resultados. Para ello, es necesario contar con la documentación de control, que es crucial para respaldar el proceso de verificación y control de calidad. Esto implica la creación y el mantenimiento de registros detallados que documenten todas las etapas del proceso, “desde la planificación de las pruebas hasta los resultados obtenidos sobre el documento de conformidad es un elemento clave que certifica que un componente cumple con los estándares de calidad y seguridad establecidos, procedimientos que no se realizan normalmente” (Entrevistado 3).

Los formatos de verificación y control son herramientas utilizadas para estandarizar el proceso de verificación; sin embargo, la revisión de componentes es una etapa crítica en la verificación y el control de calidad. Esta etapa puede incluir la identificación de los criterios utilizados para determinar la aceptación

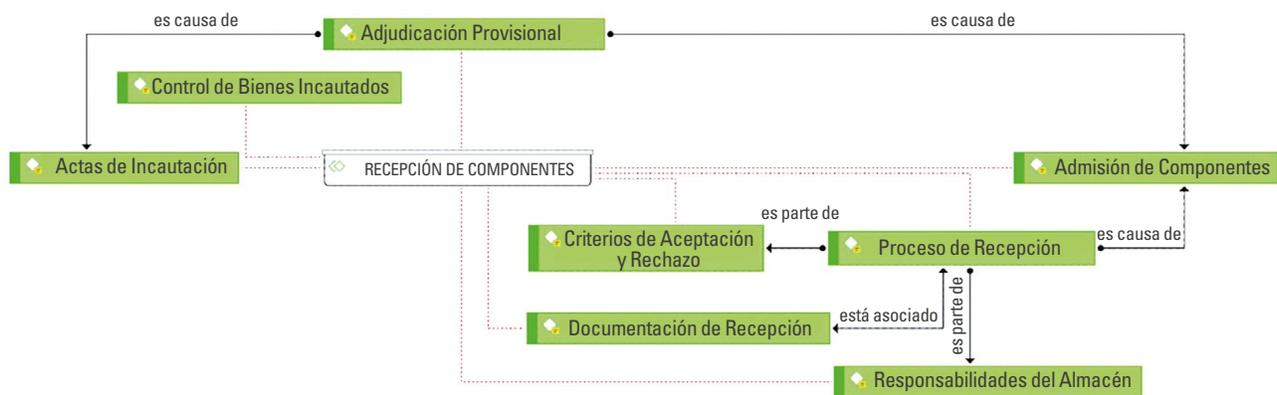


Figura 1. Red semántica de la subcategoría de recepción de componentes
Fuente: elaboración con ATLAS.ti.

o el rechazo de un componente, así como los procedimientos para abordar discrepancias o problemas identificados durante la revisión. En cuanto al área de verificación y control, implica evaluar su diseño y operación, lo que incluye la disposición de equipos, la capacitación del personal y las medidas de seguridad en el manejo de componentes. Es requisito el cumplimiento de normas y estándares de aviación, lo cual implica “asegurarse de que todas las actividades de verificación y control estén en consonancia con las regulaciones aplicables a las actividades de aviación y sobre todo de mantenimiento, por lo que es necesario ser realizado por un personal especializado del Almacén” (Entrevistado 3).

Por tal motivo, todo el proceso requiere un entrenamiento logístico y contar con la “calificación y certificación, que es fundamental para garantizar que el personal encargado de la verificación, control

y sistemas” (Entrevistado 5) esté adecuadamente capacitado y pueda proponer mejoras en función de las necesidades y experiencias del personal. Por último, se debe estandarizar el uso de los formatos de observación y guías, ya que son herramientas que permiten que el personal registre observaciones relevantes durante el proceso de verificación y control. Verificar cómo se utilizan estos formatos y cómo se manejan las observaciones puede proporcionar información sobre la administración interna de la Diravpol y la solución de problemas en este procedimiento.

Sobre la subcategoría de registro de componentes en el contexto de la gestión de bienes incautados, se examinan aspectos relacionados como la herramienta de registro, el archivo de entradas y salidas, los problemas administrativos, las mejoras en el procedimiento y los desafíos, teniendo en cuenta la sistematización de los sistemas administrativos. En cuanto a la

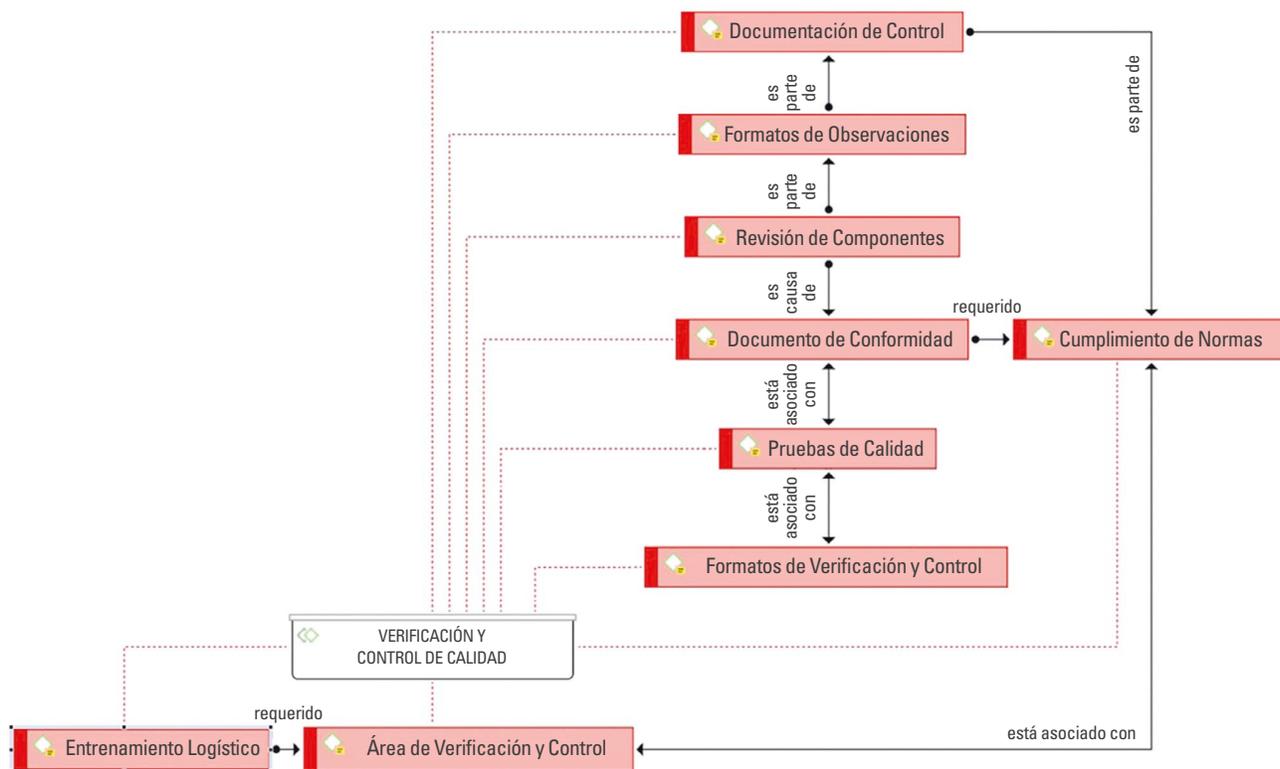


Figura 2. Red semántica de la subcategoría de verificación y control de calidad.
Fuente: elaboración con ATLAS.ti.

herramienta de registro, es fundamental en la recepción de componentes incautados, debido a que es la interfaz a través de la cual se documenta, valoriza y registra cada componente. La calidad y eficiencia de esta herramienta “puede tener un impacto significativo en la exactitud de los registros y en la velocidad del proceso y una gestión eficiente y precisa de los componentes, en la actualidad se emplea el registro en el Sistema Integrado de Gestión Administrativa” (Entrevistado 5).

Sobre “el archivo de entradas y salidas de manera documental se gestiona el control de kárdex, es la base de datos que registra todos los movimientos de los componentes en el almacén y cuentan con un Programa de Sistema Logístico Interno no diseñado para realizar movimiento de componentes aeronáuticos y demás enseres de aviación” (Entrevistado 1). Por lo anterior, se suscitan problemas administrativos, incluyendo retrasos en la documentación, errores en el registro o la falta de seguimiento adecuado.

Investigar estos problemas cualitativamente implica identificar las causas subyacentes, como la falta de capacitación del personal, la complejidad de la herramienta de registro, la sobrecarga de trabajo, y la falta de catalogación y valoración de los bienes que son internados. Estos hallazgos pueden servir de base para soluciones efectivas, a través de mejoras en el procedimiento. La presente investigación cualitativa puede ayudar a identificar áreas de mejora del procedimiento de registro, lo cual podría incluir la simplificación de formularios, la capacitación del personal en el uso de

la herramienta de registro o la implementación de procesos más eficientes para la documentación.

Las opiniones y las experiencias del personal involucrado en el proceso logístico son valiosas para proponer mejoras concretas. Es necesario establecer desafíos administrativos adaptables de acuerdo con los parámetros de la Directiva N.º 0004-2021-EF/54.01, que regula la gestión de almacenamiento y distribución de bienes muebles del sector público. La teoría sobre el proceso debe enfrentar una variedad de problemas, como la falta de recursos, la complejidad de la legislación aplicable o la falta de personal especializado.

Con respecto a los resultados, estos se han desarrollado siguiendo la secuencialidad de los objetivos del presente estudio. En el objetivo principal, se planteó la importancia de describir el procedimiento administrativo en la recepción y custodia de los componentes aéreos como bienes incautados en el Almacén General de la Diravpol. Por lo tanto, se ha considerado conveniente dividir este procedimiento administrativo en tres subcategorías: (1) recepción de los componentes incautados; (2) verificación y control de calidad de los componentes; y (3) registro de los componentes. Cada una de estas etapas es crítica e importante para garantizar la custodia de estos activos y su posterior utilización o disposición por parte de la División de Mantenimiento, según el requerimiento de necesidades, con el objetivo de mantener operativa la flota aeronáutica de la Diravpol.

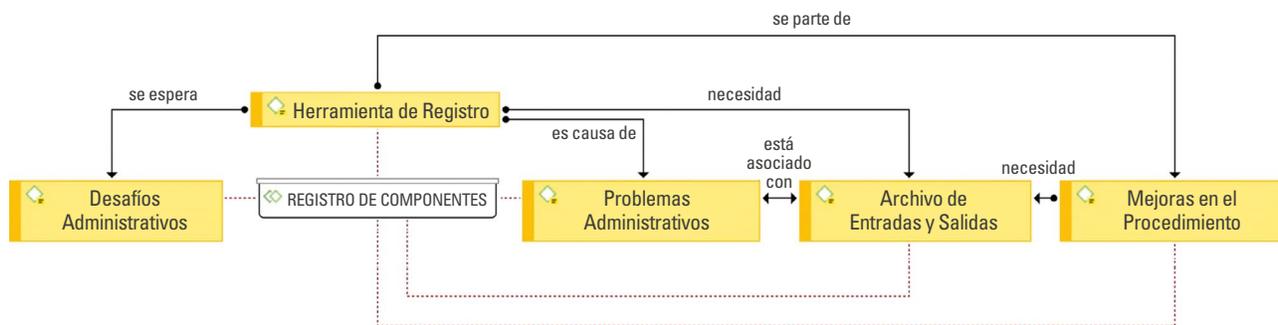


Figura 3. Red semántica de la subcategoría registro de componentes

Fuente: elaboración con ATLAS.ti.

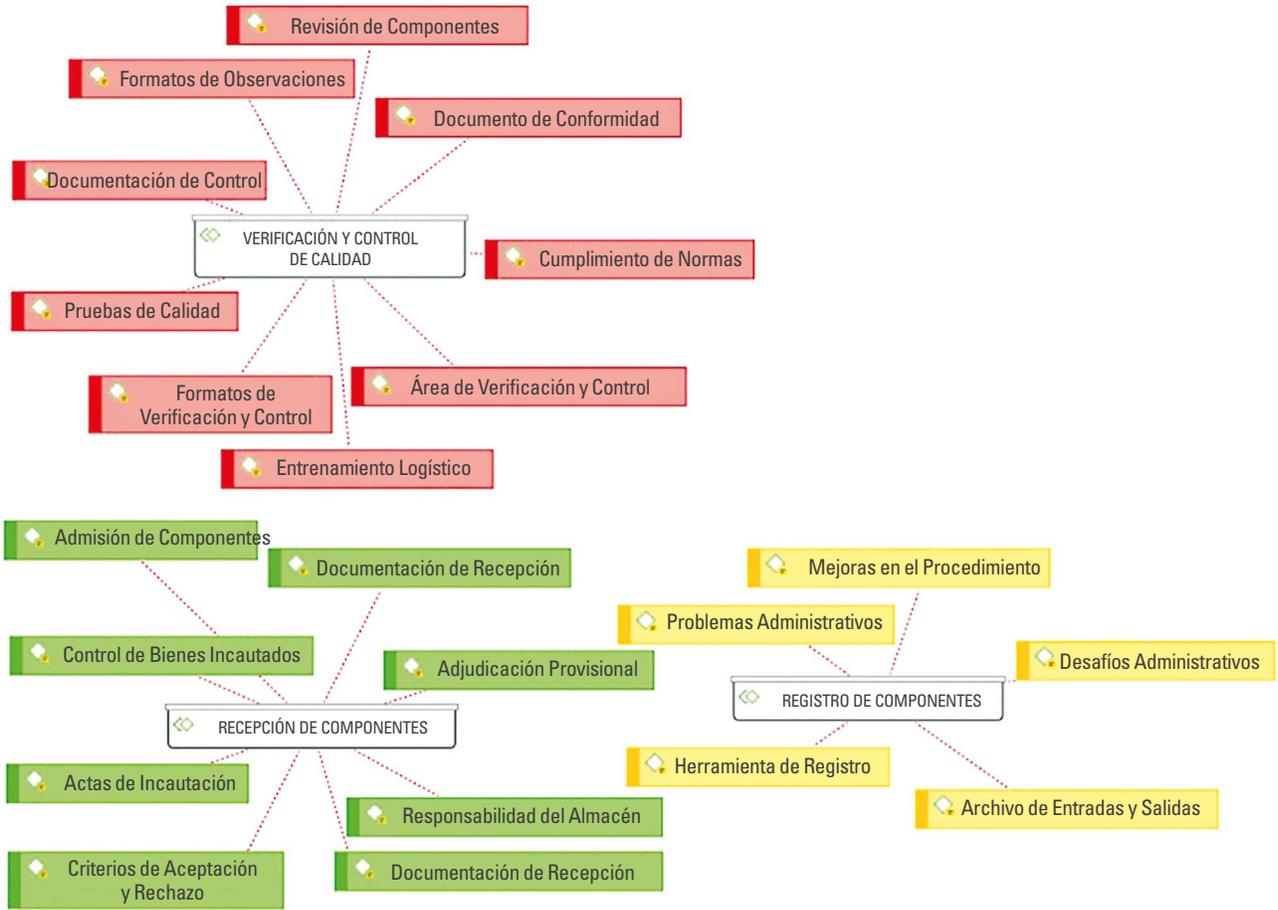


Figura 4. Red semántica del objetivo general
Fuente: elaboración con ATLAS.ti.

Discusión

Sobre la subcategoría de recepción, uno de los principales hallazgos de esta investigación es la deficiencia en los procedimientos normativos claros, los procedimientos ausentes y un sustento legal sólido que respalde la recepción de componentes aéreos incautados, en cumplimiento de la Directiva N.º 0004-2021-EF/54.01, que regula la “gestión de almacenamiento y distribución de bienes muebles del sector público”. La falta de información documental y diversos componentes han generado dificultades en la valorización de los bienes en el inventario, dado que la correcta catalogación es esencial para el proceso administrativo de estos componentes y que sean utilizados de manera

eficiente, evitando observaciones por parte de los órganos de control. Estas dificultades impactan negativamente en la operatividad y eficacia de la Diravpol.

Por otra parte, conforme lo establece Salazar-Cubas y Salazar Quesquén (2018), la falta de capacitación y de personal especializado en el proceso de recepción de los componentes aéreos incautados es una limitación importante, ya que confunde el procedimiento ordinario gestionado mediante procesos de selección en el marco de la Ley 30225 de 2019, y le resta formalidad cuando son internados cuando son cedidos en uso por el Pronabi. Solo son exigidos un informe técnico y la tarjeta de condición, hecho que contradice

lo recomendado por Díaz (2021), quien señala que es necesario implementar sistemas orientados a examinar las herramientas, los equipos y los componentes, como la lista de verificación y el diagrama de flujo.

En cuanto a la subcategoría de verificación y control de calidad, la gestión de la documentación y la trazabilidad de los componentes aéreos incautados se identificaron como aspectos críticos en la investigación. La falta de documentación precisa y completa con la que se ingresan los componentes aéreos por parte del Pronabi dificulta su seguimiento a lo largo del proceso. Según Chiavenato (2019), el control y el seguimiento son fundamentales para alcanzar la mayor eficacia posible, abarcando aspectos que la organización por sí sola no puede gestionar por completo, como la planificación, la dirección y el control.

Esta deficiencia en la documentación puede generar problemas de integridad y responsabilidad para el personal encargado de validar la calidad de los componentes ingresados, así como para el personal del Almacén, que se ve obligado a admitir estos bienes con base en una resolución administrativa y un memorándum, documentos administrativos ajenos a las actividades propias de aviación (trazabilidad).

Una vez revisado el contexto del marco teórico, se observa que el proceso de registro de componentes aéreos incautados guarda similitudes con las etapas del proceso administrativo de almacenamiento. Estas etapas incluyen recepción, verificación y control de calidad, internamiento, registro y custodia. Establecer procedimientos y requisitos claros y exigibles en cada una de estas etapas es crucial para garantizar la eficiencia operativa y la integridad de los bienes, y que dichos bienes que no son utilizables sean descartados en una primera etapa como es en el proceso de recepción.

Además, la trazabilidad de los componentes aéreos incautados se destaca como un aspecto esencial para el control y el seguimiento. La implementación de sistemas de identificación, como los códigos QR, conforme lo examina la aplicación de Camacho (2019), mencionados en la literatura relevante, puede ser una solución para garantizar la trazabilidad de los componentes aeronáuticos y cumplir con las normativas.

Estos sistemas proporcionan un respaldo necesario para la gestión de inventarios y la seguridad operativa de las aeronaves.

En alusión a la categoría del procedimiento administrativo, el objetivo de la presente investigación, se planteó la importancia de describir el procedimiento administrativo en la recepción y custodia de los componentes aéreos como bienes incautados en el Almacén General de la Diravpol. Este artículo se enfocó en analizar el procedimiento administrativo en la recepción y custodia de componentes aéreos incautados en el Almacén General de la Diravpol. Los resultados obtenidos aportan información valiosa sobre los desafíos y las deficiencias en este proceso fundamental para las actividades operativas que se realizan en la Diravpol. Los resultados de la investigación arrojan luz sobre diversos desafíos y problemáticas que enfrenta la Diravpol en la gestión de estos componentes, lo cual es fundamental para garantizar la seguridad operativa de las aeronaves, la efectividad en las operaciones aéreas y que estos equipos puedan cumplir con su finalidad social.

Conclusiones

En lo que respecta a la subcategoría de recepción de componentes, se considera que la capacitación del personal y la disponibilidad de expertos son fundamentales para garantizar la eficiencia y eficacia en el proceso de recepción de componentes aéreos cedidos por el Pronabi, en virtud de una resolución administrativa. Por ello, es necesario implementar procedimientos que aseguren el cumplimiento de la Directiva N.º 0004-2021-EF/54.01, adaptando las exigencias técnicas propias de las actividades de aviación a nivel institucional.

En cuanto a la subcategoría de verificación y control de calidad, se reconoce que la gestión de la documentación y la trazabilidad son aspectos esenciales para el control y seguimiento de los componentes aéreos incautados. La falta de una valoración precisa dificulta estos procesos, lo cual impide que

los componentes incautados sean gestionados adecuadamente, resultando en el incumplimiento de la finalidad pública, la pérdida de valor social, e incluso en casos donde se deterioran y generan dificultades administrativas.

Para la subcategoría de registro de componentes aéreos incautados, se considera necesario establecer criterios claros para la aceptación o el rechazo de componentes, asegurando la integridad de los bienes incautados y su conformidad con los estándares aplicables en las actividades de aviación. Para ello, se deberá exigir que el Área de Valor Referencial de la Diravpol adjunte la valoración del bien basada en el informe técnico y la tarjeta de condición. Esto deberá complementarse con la adopción de tecnología actual, como programas de gestión de inventarios y códigos QR, con el fin de simplificar el proceso de custodia y control de los componentes aéreos incautados.

El objetivo planteado sobre la importancia de describir el procedimiento administrativo en la recepción y custodia de los componentes aéreos, como bienes incautados en el Almacén General de la Diravpol, permitió que se advierta la escasa claridad en los procedimientos normativos. Así como el sustento legal en el proceso de recepción, control de calidad y registro para su custodia de componentes aéreos incautados tiene un impacto negativo en el registro de la valorización de los bienes y su posterior disponibilidad para el uso operativo de la flota aérea en la Diravpol.

Referencias

- Borda, P., Dabenigno, V., Freidin, B. y Güelman, M. (2017). *Estrategias para el análisis de datos cualitativos*. Universidad de Buenos Aires.
- Camacho, S. (2019). Aplicabilidad del código QR como soporte del manejo de inventarios en la industria aeronáutica. Universidad Militar Nueva Granada. <http://hdl.handle.net/10654/31965>
- Cano-Plata, C. A. (2017). La administración y el proceso administrativo. Editorial Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Castillo-Mayanga, M. C. (2021). *Mejora de gestión por procesos para el cumplimiento de objetivos institucionales del Programa Nacional de Bienes Incautados de Perú* [tesis doctoral, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional ucv. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/77952>
- Chiavenato, I. (2019). *Introducción a la teoría general de la administración*. McGraw-Hill.
- Díaz Romero, N. (2021). Diseño de un modelo de identificación de componentes, materiales y herramientas para almacén aeronáutico. Core.ac.uk. <https://core.ac.uk/download/pdf/481420775.pdf>
- Gobierno del Perú (2019). Ley N.º 30225. *Ley de contrataciones del Estado (Decreto Supremo N° 082-2019-EF)*. <https://www.gob.pe/institucion/osce/colecciones/135-ley-de-contrataciones-del-estado-y-su-reglamento>
- Guba, E. G. y Lincoln, Y. S. (2000). Paradigmas en competencia en la investigación cualitativa. *Por los rincones: antología de métodos cualitativos en la investigación social* (C. A. Derman y J. A. Haro, comp.; pp. 113-145). El Colegio de Sonora.
- Janesick, V. (2020). La danza del diseño de la investigación cualitativa: metáfora, metodolatría y significado. *Por los rincones: antología de métodos cualitativos en la investigación social* (C. A. Derman y J. A. Haro, comp.; pp. 227-251). El Colegio de Sonora.
- López-Rey, S. (2011). *Sistemas de calidad: implantación de diferentes sistemas en la organización*. Ediciones de la U.
- Lopezosa, C., Codina, L. y Peré, F. (2022). *ATLAS.ti para entrevistas semiestructuradas: guía de uso para un análisis cualitativo eficaz*. Universidad Pompeu Fabra.
- Markova, O. O. (2020). The correlation of the concepts of administrative procedure and administrative process. *Modern Achievements of EU Countries and Ukraine in the Area of Law* (Yu. Yu. Bakai, V. V. Bilous, I. V. Bolokan et al.; pp. 330-345). Baltija Publishing.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2021, 28 de julio). *Directiva N°0004-2021-EF/54.01 para la gestión de almacenamiento y distribución de bienes muebles*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5278753/4743479-directiva-0004-2021-ef-54-01-gestion-de-almacenamiento-y-distribucion-de-bienes-muebles.pdf?v=1697228969>
- Ministerio del Interior de Perú (2017). Decreto Legislativo N.º 1267. *Ley de la Policía Nacional del Perú y su Reglamento. (Decreto Supremo N.º 026-2017-IN)*. <https://www.gacetajuridica.com.pe/boletin-nvnet/ar-web/DS0262017IN.pdf>
- Morales-González, J. A., Nava-Chapa, G., Esquivel-Soto, J. y Díaz-Pérez, L. E. (2011). *Principios de ética, bioética y conocimiento del hombre*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

- Namen-Mesa, E. y Ocampo-Muñoz, S. (2018). La logística aeronáutica de la Aviación Naval y su efectividad en el desarrollo operacional. *Ensayos sobre Estrategia Marítima*, 3(7). <https://doi.org/10.25062/2500-4735.469>
- Pavel, E.-V. (2020). *El procedimiento administrativo de responsabilidad patrimonial de las administraciones públicas* [tesis doctoral, Universidad de Lleida]. Repositorio institucional uDL. <http://hdl.handle.net/10803/669650>
- Programa Nacional de Bienes Incautados (Pronabi). (2023). *Información institucional oficial* [en línea]. <https://www.gob.pe/institucion/pronabi/institucional>
- Ramírez-Cabanillas, M. L. (2019). *Simplificación del procedimiento de priorización efectuado por el PRONABI en la asignación temporal de los bienes incautados al Ministerio Público. Noviembre 2018* [tesis doctoral, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional ucv. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/31303>
- Salazar-Cubas, M. B. y Salazar-Quesquén, J. M. (2018). *La gestión de almacén y su incidencia en la eficiencia operativa en la distribución y control de materiales y equipos forenses* [tesis doctoral, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio USAT. https://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/1869/1/TL_SalazarCubas-Monica_SalazarQuesquenJohana.pdf
- Toscano-Hernández, A. E., Fuentes-Doria, D. D., Malvaceda-Espinoza, E., Díaz-Ballesteros, J. L. y Díaz-Pertúz, L. A. (2020). *Metodología de la investigación: conceptos, herramientas y ejercicios prácticos en las ciencias administrativas y contables*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Tregubov, I. S. (2023). Issues of Administrative Detention as a Measure of Administrative Procedural Coercion Used in the Field of Internal Affairs. *Administrative and Municipal Law*, (1), 59-72.

Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) de las aves en aeropuertos de Colombia

| Fecha de recibido: 27 de mayo de 2024 | Fecha de aprobado: 04 de agosto de 2024 |

| Reception date: May 27, 2024 | Approval date: August 04, 2024 |

| Data de recebimento: 27 de maio de 2024 | Data de aprovação: 04 de agosto de 2024 |

Holman Enrique Durán Márquez

<https://orcid.org/0000-0002-7681-7821>

hduran.bio.ua@gmail.com

Universidad del Atlántico

Investigador independiente, Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura

University of the Atlantic

Independent researcher, Colombia

Researcher's role: theorist and writer

Universidade do Atlântico

Investigador independente, Colômbia

Papel do investigador: teórico e escritor

Cómo citar este artículo: Durán Márquez, H. E. (2025). Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) de las aves en aeropuertos de Colombia. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 46-58. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaaereo.815>



Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) de las aves en aeropuertos de Colombia

Resumen: La mayoría de los impactos entre aeronaves y fauna ocurre con aves, pero algunas especies son más propensas que otras a involucrarse en impactos; por lo tanto, es necesario identificar el nivel de riesgo inherente que representa cada especie de ave, es decir: el riesgo especie-específico. Para esto, se propone el Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE) como una herramienta cuantitativa y estandarizada que consta de una multimatriz de ocho variables, con tres estados de variable cada una. También, se sugiere un método pre-existente para obtener el peso relativo o aporte de cada variable al riesgo total, y se discuten las virtudes y limitaciones de cada variable, así como del método en general. El IRIEE pretende ser una herramienta de evaluación objetiva y práctica para la implementación regular a la mayoría de aeropuertos de Colombia, y está diseñada como un método de fácil interpretación y diligenciamiento que solo requiere información asequible desde las observaciones en campo.

Palabras clave: control de fauna silvestre; evaluación del riesgo; peligro aviario; riesgo especie-específico; seguridad aérea.

Species-Specific Impact Risk Index (SSIRI) of birds in Colombian airports

Abstract: Most wildlife-aircraft collisions involve birds, but some species are more prone than others to being involved in such incidents; therefore, it is necessary to identify the level of risk inherent to each bird species, that is, species-specific risk. To address this, the Species-Specific Impact Risk Index (SSIRI) is proposed as a quantitative and standardized tool consisting of an eight-variable multi-matrix, with each variable having three states. Additionally, a pre-existing method is suggested to obtain the relative weight or contribution of each variable to the total risk, and the strengths and limitations of each variable, as well as the method in general, are discussed. The SSIRI aims to be an objective and practical assessment tool for regular implementation at most airports in Colombia, and is designed as an easily interpretable and manageable method that only requires accessible information from field observations.

Keywords: Wildlife control; risk assessment; bird hazard; species-specific risk; aviation safety.

Índice de Risco de Impacto Específico (IRIEE) de aves em aeroportos da Colômbia

Resumo: A maioria dos impactos entre aeronaves e fauna envolve aves, mas algumas espécies são mais propensas do que outras a se envolver em tais incidentes; portanto, é necessário identificar o nível de risco inerente a cada espécie de ave, ou seja, o risco específico da espécie. Para isso, propõe-se o Índice de Risco de Impacto Específico (IRIEE) como uma ferramenta quantitativa e padronizada que consiste em uma multimatriz de oito variáveis, com três estados de variável cada uma. Além disso, sugere-se um método pré-existente para obter o peso relativo ou a contribuição de cada variável para o risco total, e são discutidas as virtudes e limitações de cada variável, bem como do método em geral. O IRIEE pretende ser uma ferramenta de avaliação objetiva e prática para implementação regular na maioria dos aeroportos da Colômbia, e é projetado como um método de fácil interpretação e preenchimento que só requer informações acessíveis a partir das observações de campo.

Palavras-chave: Controle de fauna selvagem; avaliação de risco; perigo aviário; risco específico da espécie; segurança aérea.

Introducción

Los choques entre aeronaves y representantes de la fauna es un problema creciente para la industria de la aviación que ha causado la muerte de 464 seres humanos y destruido más de 305 aviones entre 1988 y 2022 en todo el mundo. Esta problemática es fomentada por el aumento de las poblaciones de aves grandes, el aumento del tráfico aéreo y el desarrollo de aviones más silenciosos (Dolbeer *et al.*, 2023).

El 96 % de los impactos entre aeronaves y fauna ocurre con aves (Dolbeer *et al.*, 2023). Pero cada especie de ave es biológica, etológica y ecológicamente diferente, lo que explica por qué algunas son más propensas a involucrarse en impactos que otras. Por eso, es necesario identificar el nivel de riesgo inherente de cada especie de ave, es decir: el riesgo especie-específico, para así poder priorizar los esfuerzos de gestión en las especies que representen mayor riesgo de manera particularizada y eficiente, porque de otra forma sería ineficaz pretender abordar a todas las especies de aves con estrategias generalistas que no funcionan por igual para todas las aves.

La evaluación del riesgo de impacto que representa la fauna para las aeronaves es un tema emergente en la investigación, el cual se ha abordado desde ángulos como: el riesgo de impacto general del aeropuerto (Ning y Chen 2014; Anagnostopoulos, 2003); los riesgos económicos y operativos (DeVault *et al.*, 2018; Fernández-Juricic *et al.*, 2018; Allan, 2006; Zakrajsek y Bissonette 2005; Dolbeer *et al.*, 2000); el riesgo por fauna asociado a los usos del suelo fuera del aeropuerto (Metz *et al.*, 2021a y 2021b; Shao *et al.*, 2020a y 2020b; Coccon *et al.*, 2015; Geringer *et al.*, 2016); y particularmente el riesgo especie-específico (Soldatini *et al.*, 2010 y 2011; Holbech *et al.*, 2015; Barrientos *et al.*, 2016; Marateo *et al.*, 2011; Hong *et al.*, 2019; Fu *et al.*, 2023).

No obstante, estos últimos autores evidencian la utilización de diferentes métodos para obtener su valoración de riesgo. Unos con muchas variables cualitativas que inducen a la subjetividad de la evaluación y otros con diseños muy específicos para la

avifauna de otras latitudes; algunos con el establecimiento y uso arbitrario de algunas variables, y otros con el uso de matemáticas complejas que limitan la practicidad de los índices para su implementación regular en aeropuertos. Todo esto produce índices de poca aceptación universal, lo que revela la necesidad de un método estándar de amplia aceptación para el cálculo del riesgo especie-específico (Gutiérrez-Serralde *et al.*, 2023).

Para complicar el escenario, existe la idea generalizada de que el indicador ideal del riesgo especie-específico debe ser el índice de impactos y el índice de impactos con daños (Alhumaidi *et al.*, 2023). Pero esto, aunque parece razonable, tiene serias limitaciones porque las evaluaciones de riesgo basadas solamente en el historial de impactos no pueden seguirles el ritmo a los cambios rápidos de la abundancia y distribución de las especies. Por ejemplo, si aparece un nuevo atrayente de aves, le tomará bastante tiempo al indicador para actualizarse, lo cual finalmente retrasaría las alertas y los esfuerzos de mitigación; sin mencionar la poca disponibilidad de registros de impacto que sufren muchos aeropuertos.

Por eso, el objetivo de la presente reflexión es reformular una metodología para la evaluación del riesgo de impacto de las aves en aeropuertos de Colombia, mediante la utilización de variables cuantitativas que se retroalimentan constantemente de información de campo asequible y actualizada para acercarse a un indicador más objetivo, práctico y estándar.

Desarrollo del Índice de Riesgo de Impacto Especie-Específico (IRIEE)

Para evaluar el riesgo de impacto con aeronaves que representa cada especie de ave en el aeropuerto, se propone el IRIEE, que será desarrollado en cuatro secciones en el siguiente orden lógico: variables, variables adicionales sugeridas por Carter (2001), método de jerarquías analíticas (AHP) y matriz de riesgo.

Variables

Las variables seleccionadas no son novedosas, ya que se han planteado antes en otros trabajos. Pero sí se pretende es redefinirlas con un carácter más cuantitativo en el marco de una matriz más exacta tal como se presentó arriba. Así pues, las variables propuestas se basaron principalmente en las sugerencias de Carter (2001) y los estados de las variables son modificaciones de lo propuesto en la “matriz de peligrosidad de la avifauna” de la Aerocivil (2016). A continuación, se desarrollan ocho variables y también se presentan dos potenciales variables adicionales.

Horario: Horario de actividad. De manera generalizada, la mayoría de aeropuertos del mundo son más activos durante el día, pero la mayoría de las especies de aves tropicales (como las que viven en Colombia) son diurnas. En este sentido, Blackwell y Fernández-Juricic (2013) sugieren que las aves nocturnas o crepusculares tienden a evitar las luces de las aeronaves que se acercan, antes que aturdirse y congelarse como hacen los mamíferos. Todo esto explica por qué el 78 % de los impactos en el mundo ocurren durante el día (Dolbeer *et al.*, 2023; MacKinnon, 2004). Entonces, es razonable asumir que las aves estrictamente diurnas tienen mayor probabilidad de impactar que las aves estrictamente nocturnas, y a su vez las aves activas tanto de día como de noche tienen mayor probabilidad de impactar que aquellas dos, por cuanto acumulan sus probabilidades.

Ahora bien, para evitar el sesgo por la mezcla de especies en la transición día/noche noche/día (como, por ejemplo, las aves diurnas que se desplazan rezagadamente en busca de sus sitios de pernocta a última hora o las aves nocturnas que empiezan sus actividades muy temprano en el crepúsculo vespertino o viceversa para el caso de las primeras horas de la mañana), no se considerará para esta variable como diurno ni como nocturno los eventos de observación ocurridos entre las 18:00 y las 19:00 horas y entre las 05:00 y las 06:00 horas; sino que se considerará como estrictamente nocturno los eventos entre las 19:05 y las 04:55, y como estrictamente diurno los eventos entre las 06:05 y las 17:55.

Ventajas: La variable requiere información fácil de adquirir desde los monitoreos regulares de aves, pero incluso si no es posible monitorear en horas nocturnas por las restricciones logísticas propias de cada aeropuerto, se puede recurrir alternativamente a la información secundaria sobre los hábitos diurnos/nocturnos (d/n) de las especies de aves, con un nivel de confiabilidad bastante aceptable.

Desventajas: La variable atribuye la probabilidad de coincidencia entre aves y aeronaves solo al comportamiento d/n de las aves, ya que da por sentado que el aeropuerto es más activo durante el día, pero no considera el momento real de mayor tráfico aéreo del aeropuerto. Por ejemplo, si un aeropuerto es más activo en la noche, entonces el sentido de la variable se invierte, o si es igualmente activo de día y de noche entonces las especies diurnas y nocturnas tendrán la misma probabilidad de impacto y se cancela la variable. Sin embargo, es necesario omitir esto para poder aplicar la variable a todos los aeropuertos.

Abundancia: Abundancia relativa. La abundancia absoluta es el número de individuos de cada especie, mientras que la abundancia relativa es el porcentaje que aporta cada especie a la abundancia total de todas las especies. Entonces, dicha variable se presenta en función de la abundancia relativa, con estados de variables ajustados desde la propuesta de Marateo *et al.* (2011). La variable asume que: si un ave puede chocar con una aeronave, entonces un mayor número de aves tiene mayor probabilidad de chocar.

Ventajas: La abundancia relativa es más útil que la abundancia absoluta para comparar entre distintos periodos de evaluación e incluso entre aeropuertos con diferencias en la estructura de su comunidad de aves. Además, los parámetros auxiliares de promedio y desviación estándar contribuyen a minimizar el contraste entre los estados de variable, porque evita el uso de límites de la abundancia relativa como, por ejemplo, 20, 50 o 70 %, que pueden ser muy difíciles de alcanzar para las especies, lo cual podría sesgar la variable. Por último, estos parámetros son muy fáciles de calcular incluso en línea.

Desventajas: Es posible que estos artificios no siempre reflejen de manera exacta los cambios reales de la abundancia, y, por tanto, la probabilidad de impacto.

Bandada: Tamaño de la bandada. Los estados de variable obedecen a la clasificación de El-Sayed (2019) y de la Civil Aviation Authority (CAA, 2002), en la cual se establecen diez individuos como el límite entre bandadas medianas y grandes. En particular, este último estudio encontró una relación de impactos del 8 % para aves solitarias, 14 % para bandadas pequeñas (2-10) y 40 % para bandadas grandes (>10). El supuesto de la variable es que: si un ave causa daños al impactar con una aeronave, entonces el impacto de muchas aves causará mayores daños; esto se debe a que la energía cinética se acumula en un impacto múltiple, por eso esta variable es abordada como una de severidad y no de probabilidad

Ventajas: La variable presenta estados de variables más objetivos, porque son definidos por el número de los eventos de observación; además, para el observador de campo es más fácil e intuitivo identificar grupos de dos a diez o más de diez individuos.

Desventajas: Existe un problema de acumulación de gravedad que no se expresa en la variable, porque valora por igual a cualquier bandada mayor de diez individuos. Por ejemplo: bandadas de once, cincuenta o cien individuos, etc., a pesar de que estas son más graves según el supuesto planteado.

Movilidad: Interceptación o uso de las aerovías.

Esta variable se limita a valorar solo los movimientos de las aves que interceptan las aerovías y descarta todos los demás movimientos, dirección o usos que las aves puedan hacer de otras partes del aeródromo, por cuanto son poco relevantes para el riesgo de impacto. En este sentido, considérese que: “una aerovía es el área de control o parte de ella dispuesta en forma de corredor y equipada con radio ayudas para la navegación” (Aerocivil, 2019); en otras palabras: es la pista y las trayectorias de vuelo, que en este caso puntual se limita a lo primero, y debe entenderse como el corredor que usan las aeronaves dentro del aeropuerto para el

aterrizaje y despegue desde el nivel del suelo hasta 500 ft AGL (límite vertical para “dentro del aeropuerto”).

Ahora bien, para que ocurra un impacto en el aeropuerto, las aves deben coincidir en el espacio y en el tiempo con aeronaves a alta velocidad, y si el espacio regular de alta velocidad que usan las aeronaves son las aerovías (trayectorias y pista), entonces es razonable evaluar solo el uso que las aves hacen de las aerovías y descartar otros espacios del aeropuerto donde no ocurren las aeronaves o donde ocurren pero a velocidades tan bajas que es fácil para las aves evitar la colisión, tal como las zonas de seguridad, el terminal, las calles de rodaje, la plataforma, etc. Por lo tanto, esta variable asume que los impactos en el aeropuerto solo ocurren cuando las aves cruzan la pista.

Ventajas: La variable no descarta a las especies que no cruzan la pista (0 % de los eventos de observación), sino que las incluye en su estimación y les asigna, por prevención, un nivel de riesgo bajo para destacar así a las especies que sí lo hacen, lo cual permite formular tres estados de variable más simples y prácticos. El supuesto planteado aplica para la mayoría de aeropuertos, ya que las aeronaves de ala fija son más utilizadas que las de ala rotatoria.

Desventajas: La variable no considera el uso diferente que hacen las aeronaves de ala rotatoria o situaciones específicas con aeronaves de ala fija, para lo cual no aplica completamente el supuesto planteado. Por ejemplo, no contempla los impactos que pueden ocurrir con un helicóptero (ala rotatoria) en la plataforma, o incluso los que pueden ocurrir con aeronaves de ala fija en las calles de rodaje, que a pesar de moverse a bajas velocidades, sus aspas o hélices en rotación podrían impactar a un ave. Estos son solo algunos ejemplos que desafían el supuesto planteado.

Frecuencia: Frecuencia de aparición o presencia/ausencia.

Esta variable mide la distribución de la frecuencia de aparición de la especie en los eventos de observación; por tanto, es una medida de presencia/ausencia, que se presenta de manera organizada en tres estados de variable equitativos a la distribución de la aparición. Esta variable supone que la frecuencia de aparición es directamente proporcional a la

probabilidad de impacto; es decir que si una especie es muy frecuente en el aeropuerto, entonces tendrá más probabilidades de chocar con una aeronave

Ventajas: La variable puede indicar satisfactoriamente la probabilidad de impacto entre aves y aeronaves, porque contrasta implícitamente la presencia/ausencia de las aves con el número de operaciones aéreas del aeropuerto.

Desventajas: La variable no precisa el tiempo de permanencia efectivo de la especie en el evento de observación (que puede ser de 5, 8, 10 minutos, etc., según lo defina la metodología). Por lo tanto, puede valorar por igual como “presente” en el evento de observación tanto a un ave fugaz (por ejemplo, un carpintero que cruza el aeropuerto) como a un ave que permanece todo el tiempo del evento de observación (tal como un alcaraván en la zona de seguridad). Esto es un sesgo importante, ya que es evidente que un ave fugaz que solo transita por el aeropuerto está menos expuesta a las aeronaves que una que permanece más tiempo en el aeropuerto, y por eso sus probabilidades de impacto no pueden ser iguales.

Masa: Masa corporal. La masa es una propiedad intrínseca de los cuerpos y expresa la cantidad de materia en un cuerpo; su unidad de medida en el Sistema Internacional de Unidades es el kilogramo y por eso no debe confundirse con el peso. Los estados de variable aquí propuestos son una adaptación de la clasificación de masa para las aves de MacKinnon (2004), que establece, entre otras cosas, que 1800 g es el valor mínimo para las aves grandes, lo cual es coherente con el hecho de que la mayoría de los motores de aviones se desarrollan para resistir impactos con aves de hasta 1,8 kg (European Aviation Safety Agency [EASA], 2010). Esta variable supone que cuanto mayor sea la masa corporal del ave, mayor será la gravedad del impacto, debido a la relación existente entre la masa, la velocidad y la energía cinética, lo cual maximiza los daños (Morgenroth, 2003; Godínez, 2006).

Ventajas: La variable presenta un estado de variable “grande” como mayor de 1,8 kg, lo cual puede representar mejor o ser más sensible a la presencia de las especies grandes de la avifauna colombiana,

que pueden sobrepasar fácilmente los 3 kg, tal como los pelícanos, los chavarríes, los grandes buitres, las cigüeñas, los grandes patos y los pavos de monte, entre otros.

Desventajas: La flota de aeronaves colombianas todavía conserva algunas aeronaves antiguas (especialmente en zonas apartadas del suroriente del país) que no están diseñadas para resistir impactos con aves grandes (1,8 kg), ni siquiera con aves de tamaño mediano; por lo tanto, el estado de variable “grande” podría sesgar la evaluación al sobreestimar las capacidades de la flota.

Altura: Altura de vuelo observada. La estadística de impactos más completa disponible hoy es la de Dolbeer *et al.* (2023), en la que se evidencia que hasta el 71 % de los impactos con aves ocurren en el estrato vertical de 0-500 ft AGL. En particular, el 40 % de todos los impactos se concentra al nivel del suelo (0 ft AGL). Esto último tiene mucho sentido al considerar que los aviones usan principalmente este nivel en el aeropuerto, y que las aves que se posan sobre la pista experimentan las fuerzas de la inercia estática que les ofrece resistencia al levantar el vuelo y evitar un impacto, mientras que las aves que ya están en vuelo (> 0 ft AGL) por el contrario sufren inercia dinámica que les favorece al huir de los impactos. Finalmente, en alturas superiores a 500 ft AGL los impactos se vuelven más escasos con tan solo el 29 %. Por eso, esta variable asume que la altura de vuelo de las aves es inversamente proporcional a la probabilidad de impacto; o lo que es igual: que las aves que vuelan más cerca del suelo tienen más probabilidades de impactar.

Como una recomendación práctica para evitar complicaciones relacionadas con la medición exacta de las aves en vuelo o la adquisición de equipos, se sugiere el uso de cualquier *app* de *smartphone* con altímetro que pueda medir la altura de estructuras fijas y altas como árboles, edificios u otra estructura de referencia, a fin de estimar por comparación la altitud de vuelo de las aves. Por último, si ocurriera el caso improbable de empate en el porcentaje de registro de los estratos verticales, se asignará el estado de variable de mayor riesgo conforme al principio de prevención.

Ventajas: Los estados de variable son cuantitativos y más fáciles de interpretar para los biólogos en campo, porque requiere familiarizarse con una sola altura de referencia (500 ft), en vez de dos o más, lo cual ofrece menos posibilidades de error por la sub o sobreestimación vertical.

Desventajas: La variable no discrimina respecto a la posición horizontal, sino que valora de la misma manera a cualquier ave en la misma escala vertical. Por ejemplo: a una especie que prefiere el suelo de las zonas de seguridad frente a una que también prefiere el suelo, pero de la pista, donde en efecto hay más probabilidad de impacto.

Nota reflexiva adicional: Esta variable formula sus estados de variable de manera excluyente, porque asume que las aves usan un único estrato vertical y no que transitan entre ellas; es decir que no contempla que las aves registradas en el estrato más alto (> 500 ft) implica la acumulación de la probabilidad de impacto (>70%), debido a que las aves que vuelan alto necesariamente empezaron en o cerca del nivel del suelo y transitaron verticalmente hasta alcanzar el estrato más alto. Así mismo, las aves registradas en el estrato medio (1-500 ft) pueden acumular el 70% de probabilidad de impacto, y las aves registradas en el suelo solo acumulan el 40%. En ese orden de ideas, sería razonable invertir la variable de manera que las aves que vuelan alto sean más riesgosas que las que vuelan bajo. Este es un tema que merece una revisión más detallada en futuros trabajos; sin embargo, por el momento se acoge la primera interpretación apelando a la practicidad y tradición de su utilización.

Impactos: Registros de impactos. Esta variable utiliza los incidentes de especies (confirmadas) con aeronaves en el aeropuerto de estudio. Es una variable binaria de impactos/no impactos; la opción de impactos se separa en dos estados de variable para que discrimine mejor y para que se ajuste al formato de la matriz. La variable supone que el historial de impactos de una especie es un buen predictor de futuros impactos.

Ventajas: La variable considera solo los incidentes ocurridos en el aeropuerto en cuestión, con lo que privilegia la particularidad de cada aeropuerto

(composición y estructura de la avifauna, clima, geografía, aeronavegación, dinámica social, etc.) antes que la generalización o extrapolación de impactos ocurridos en otros aeropuertos, donde las condiciones pueden ser muy diferentes. Por eso, se elimina el sesgo que implica la incorporación de información secundaria.

Desventajas: La variable es insensible a la acumulación del número de impactos, ya que valora por igual, por ejemplo, a una especie con tres impactos y a una con cincuenta impactos, aunque es evidente que esta última es más riesgosa. La variable no considera la antigüedad de los impactos, así que valora por igual a una especie con un impacto registrado hace varios años y a una con un impacto registrado recientemente, por ejemplo, en el periodo actual en el que se hace la evaluación, desconociendo los cambios temporales de las condiciones que favorecen los impactos. Esto, a propósito, sugiere que los impactos se deben clasificar también por antigüedad. Los aeropuertos sin registros, o con una base de datos de impactos muy limitada, podrían repercutir en un desempeño tendencioso o parcializado de la variable, ya que ese subregistro podría ocultar el riesgo de especies que han impactado, pero que no han sido registradas.

VARIABLES ADICIONALES SUGERIDAS POR CARTER (2001)

Las siguientes dos variables fueron planteadas por Carter (2001), pero no se incluyeron en la matriz para calcular el IRIEE porque no han sido desarrolladas, ya que requieren información previa no disponible o son metodológicamente muy difíciles de cuantificar.

Agilidad o comportamiento de vuelo. Esta es una variable relativa a la destreza o maniobrabilidad de una especie para cambiar de dirección, altura o velocidad de vuelo, lo cual supone una ventaja para evitar impactos con obstáculos como las aeronaves. La mejor forma de cuantificar esta variable es mediante el concepto de “carga alar” = masa (g)/superficie alar (cm²), ya que la carga alar es un indicador proporcionalmente inverso a la maniobrabilidad de las aves, es decir

que las aves con menor carga a alar tienen mayor maniobrabilidad y viceversa. Pero para calcular la carga alar se necesita primero calcular la superficie alar, que a su vez requiere al menos tres medidas lineales: la envergadura de las alas (*wingspan*), la medida del ala tradicional (*WL*) y una nueva medida específica del ala (*S1*) para entonces calcular matemáticamente la superficie alar. Sin embargo, estas medidas no están disponibles en la literatura para cada especie, por lo cual sería necesario la captura de ejemplares de cada especie registrada en el aeropuerto (con los retos logísticos que ello implica), o el uso de ejemplares de museo. Esto último acarrea sus propios desafíos como, por ejemplo, la limitada disponibilidad de especímenes con alas extendidas o alas plegadas bien preparados con información sobre la envergadura de las alas, etc. (Fu *et al.*, 2023). Todo lo anterior dificulta el desarrollo de esta variable en la mayoría de los aeropuertos.

Debido a la complejidad del método anterior, la opción más factible disponible hoy es la de asignar valores generalizados de agilidad (con base en la experiencia observacional) a grupos emparentados de aves como familias o géneros, pero esto resultaría en una variable muy cualitativa y subjetiva como la que propone Hong *et al.* (2019), en la Tabla 1, que resulta bastante generalizado e impreciso.

Tabla 1.
Variables y estados de variable propuestos por Hong *et al.*, 2019

Flight behavior	Score
Rapid direct	1
Slow, meandering, erratic, hovering, maneuverable	2

Fuente: Hong *et al.* (2019).

Respuesta al hostigamiento. Variable relativa a la respuesta intrínseca de cada especie frente a las estrategias de dispersión y hostigamiento, lo cual supone que las especies más susceptibles representan menos riesgo que aquellas especies difíciles de erradicar. Para cuantificar esta variable, se requiere un diseño experimental estandarizado y detallado que evalúe la respuesta innata de cada especie al hostigamiento, lo cual representa un desafío adicional *per se*, con limitaciones para su aplicación en cualquier aeropuerto.

Método de jerarquías analíticas (AHP)

Las variables propuestas no pueden solo sumarse para obtener el valor de riesgo total, porque eso asume erróneamente que cada variable tiene la misma importancia relativa respecto a las demás, pero en la práctica eso no ocurre. Por ejemplo, un evaluador puede estimar que la abundancia de las aves es más importante que su altura de vuelo o que su historial de impactos, y esto a su vez puede ser diferente para otro evaluador desde su experiencia; por eso, queda en evidencia que las variables hacen todo menos un aporte homogéneo al riesgo total. En otras palabras, las variables tienen pesos relativos diferentes.

Para mitigar este sesgo de opinión, se debe determinar el peso relativo de cada variable mediante un mecanismo compensatorio de ponderación de criterios, como el que ofrece el método de jerarquías analíticas (Analytic Hierarchy Process o AHP) formulado por Saaty (2008 y 2010), y adoptando los ajustes sugeridos por Roa (2007). Este método es usado para cuantificar elementos cualitativos y así añadirles objetividad a aspectos de naturaleza subjetiva. Lo que este hace es apelar al criterio y la experiencia de expertos en un tema específico para compilar sus calificaciones, ponderarlas y finalmente obtener un criterio unificado, y así se corrige la subjetividad por la pluralidad de opiniones.

Lo anterior, en términos prácticos, es una encuesta estructurada matemáticamente, presentada a los biólogos de aeropuertos para recoger sus criterios de evaluación y someterlos a las ecuaciones del método de AHP de Saaty (Tabla 2); al mismo tiempo que deben elegir un número en la escala de valoración de Roa (Tabla 3) para cada variable según su propio criterio, luego la preferencia definitiva para cada variable será la más votada. Por último, cada variable tendrá un peso relativo representado por un número decimal menor que 1, de tal manera que la sumatoria de todos los pesos relativos debe ser igual a 1.

Para ilustrar mejor el punto, se presenta un formato de la AHP no diligenciado de tres variables (Tabla 2). Consiste en una matriz de filas y columnas dobles que coinciden en un cuadrante en el que los expertos consultados le deben asignar un valor relativo a cada

variable para comparar cada pareja y así seguir las ecuaciones contenidas en la matriz, de la cual finalmente se obtiene un peso relativo mejorado y consistente para cada variable.

Tabla 2.
Matriz del AHP simplificada con tres variables

(x) \ (j)	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Σx_j	$\Sigma x_j/n$	$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	$\Sigma(\Sigma x_j/n)\Sigma x_j/n$
Variable 1	1						
Variable 2		1					
Variable 3			1				
							1

Fuente: modificado a partir de Roa (2007).

Tabla 3.
Escala de valores para la ponderación de las variables

Importancia	Definición	Descripción
1	Igual Preferencia	Los dos criterios (x, j) contribuyen de igual manera a evaluar el riesgo de impacto
2	Moderada Preferencia	Pasadas experiencias favorecen ligeramente al criterio (x) sobre el (j)
3	Fuerte Preferencia	Prácticamente la dominación del criterio (x) sobre el (j) está demostrada
4	Absoluta Preferencia	Existe evidencia que determina la supremacía del criterio (x)

Fuente: modificado a partir de Roa (2007).

Matriz de riesgo

Se plantea una matriz de probabilidad/severidad, también conocida simplemente como matriz de riesgo, en la que ocho variables (horario, abundancia, bandada, frecuencia, movilidad, masa, altura e impactos) se han ordenado en las columnas de la matriz, mientras que a las filas se les asignaron tres opciones posibles para cada variable denominadas “estados de variable”. A estos estados de variable se les dieron valores numéricos que obedecen a una progresión geométrica de valor dos (2), es decir: 2, 4 y 8, el cual se multiplica por el peso relativo de la variable correspondiente y luego se suman todos los valores de la variable. Por último, para facilitar una interpretación práctica, los valores finales obtenidos se agrupan en tres rangos numéricos

que también corresponden a tres niveles de riesgo: alto, moderado y bajo.

Esto da como resultado una matriz multivariable grillada de 3x8 denominada IRIEE (Tabla 4), formulada matemáticamente como la suma del valor de los estados de variable (VE) por el valor del peso relativo (PR) de cada una de las variables (Tabla 5).

Consideraciones y recomendaciones

La metodología IRIEE es un ejercicio reflexivo de investigación presentado como un esfuerzo minucioso para alcanzar la objetividad, pero completamente consciente de la naturaleza subjetiva de una reflexión, lo cual podría inducir a una perspectiva incompleta al ocuparse solo de algunas pocas variables. Pero, especialmente, este ejercicio se enfrenta a un problema fundamental de las ciencias biológicas, al intentar modelar el comportamiento de organismos vivos (aves) irreducibles a las matemáticas dada su naturaleza como sujetos individuales, variables, impredecibles e inmensurables (Pujiula, 1925). Lo anterior conduce inevitablemente a la inexactitud por la omisión de variables y aspectos metodológicos importantes que deberían insertarse en el modelo para obtener predicciones exactas (Hively, 2011). Sin embargo, el método presentado es suficiente para los presupuestos planteados; por tanto, no pretende un pronóstico matemático exacto, sino una aproximación en la estimación del riesgo.

Se sugieren cuatro frentes de investigación para el perfeccionamiento del IRIEE. Primero: desarrollar la variable “respuesta al hostigamiento” mediante una metodología rigurosa que permita cuantificar la susceptibilidad de cada especie frente a las estrategias de dispersión, entendida esta como una variable muy importante en la evaluación del riesgo y en la prevención de impactos. Segundo: averiguar la manera de medir objetivamente la variable “agilidad o comportamiento de vuelo”, bien sea desde otras perspectivas metodológicas o asumiendo la metodología presentada aquí y obteniendo las medidas alares de todas las especies de aves.

Tabla 4.
Matriz del IRIEE

Índice de Riesgo de Impacto Especie-específico									
Tipo de variable	Probabilidad	Probabilidad	Severidad	Probabilidad	Probabilidad	Severidad	Probabilidad	Probabilidad	
PR	?	?	?	?	?	?	?	?	$\Sigma PR = 1$
X VE	Horario	Abundancia	Bandada	Frecuencia	Movilidad	Masa	Altura	Impactos	Nivel de Riesgo
8	Diurno/ Nocturno: al menos un evento de observación diurno y uno nocturno	Abundante: abundancia relativa mayor al promedio mas la desviación estándar	Bandadas grandes: > 10 individuos en más del 33% de los eventos de observación	Permanente: presente entre el 70% - 100% de los eventos de observación	Muy activo: Cruces de aerovia > 50% de los eventos de observación	Grande: > 1800 g	Más del 33% de los eventos de observación se registra a 0 ft AGL	> 2 impactos en el aeropuerto	6,1 – 8 = Alto
4	Diurno: al menos un evento de observación diurno pero en ninguno nocturno	Común: abundancia relativa entre el promedio y el promedio mas la desviación estándar	Bandadas medianas: 2-10 individuos en más del 33% de los eventos de observación	Frecuente: presente entre el 30% - 69% de los eventos de observación	Moderadamente activo: Cruces de aerovia 1% - 50% de los eventos de observación	Mediano: 300 g - 1800 g	Más del 33% de los eventos de observación se registra entre 1 - 500 ft AGL (152,4 m)	1-2 impactos en el aeropuerto	4 – 6 = Moderado
2	Nocturno: al menos un evento de observación nocturno pero en ninguno diurno	Poco común: abundancia relativa menor al promedio	Solitario: 1 individuo en más del 33% de los eventos de observación	Trnsitoria: presente entre el 29% - 1% de los eventos de observación	Poco activo: Cruces de arovia 0% de los eventos de observación	Pequeño: < 300 g	Más del 33 % de los eventos de observación se registra sobre los 500 ft AGL	0 impactos en el aeropuerto	2 – 3,9 = Bajo

VE= Valor del estado de la variable PR= Peso relativo de la variable X= Variable

Nota. Los valores de los pesos relativos se indican con un signo de interrogación porque deben ser establecidos primero por el método de AHP.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.
Formulación matemática del IRIEE

$IRIEE = \sum VE_x \times PR_x$
$IRIEE = VE_{Horario} \times PR_{Horario} + VE_{Abundancia} \times PR_{Abundancia} + VE_{Bandada} \times PR_{Bandada} + VE_{Frecuencia} \times PR_{Frecuencia} + VE_{Movilidad} \times PR_{Movilidad} + VE_{Masa} \times PR_{Masa} + VE_{Altura} \times PR_{Altura} + VE_{Impactos} \times PR_{Impactos}$

Fuente: elaboración propia.

Tercero: debido a que el IRIEE utiliza como fuente de información los “eventos de observación”, se requiere definir formalmente el método como el observador debe registrar los datos de las aves en campo: debe ser estandarizado y tener como unidad de medida los eventos de observación, debe definir un número estándar de eventos de observación, cuánto tiempo debe durar cada evento de observación, cuáles

son los horarios de observación, y cuáles son los límites espaciales de la observación en el aeropuerto, todo esto para obtener un método verificable que permita la comparación entre periodos de evaluación y entre aeropuertos. Cuarto: en este trabajo, el rango de valores del IRIEE y su correspondiente nivel de riesgo se definen arbitrariamente al no tener más criterio que la repartición proporcional de los valores, lo cual podría

acarrear sesgos en la limitación superior o inferior de cada rango. Por ello, es necesario investigar una metodología que permita definir objetivamente estos rangos; por ejemplo, con el método de lógica difusa, el método Delphi o incluso una AHP.

Por último, se señala la necesidad de que esta metodología sea sometida a cuestionamientos y a crítica formal para identificar nuevas oportunidades de mejora que fomenten su progreso como herramienta de mejoramiento para la seguridad aérea. También que el IRIEE, hasta ahora formulada teóricamente, sea implementada en la práctica para que sea completada.

Conclusiones

El IRIEE es una propuesta metodológica para la evaluación del riesgo de impacto que representa cada especie de ave en el aeropuerto, y se constituye como una mejora significativa de las metodologías precedentes, al tomar lo mejor de cada una para obtener un tante más cuantitativo, objetivo y práctico. Todo esto implica un progreso general para el sistema de análisis del riesgo de los programas de gestión del peligro que representa la fauna silvestre en aeropuertos, pero específicamente implica una mejora en el rigor de la evaluación del riesgo como componente del sistema de análisis del riesgo, y que al mismo tiempo contribuye a combatir el rezago tradicional que ha sufrido este sector frente a otras áreas de las operaciones aeroportuarias que cuentan con metodologías más desarrolladas y detalladas para la evaluación de sus riesgos particulares.

El carácter del IRIEE, en síntesis, es un balance entre la rigurosidad y el utilitarismo. Por un lado, es más riguroso que sus predecesores al acudir a una mayor cuantificación de las variables, lo que dirige al evaluador a revisar sus datos de observación en campo, en vez de simplemente hacer una valoración subjetiva de la situación como ocurre con las variables cualitativas. Por otro lado, es muy práctico porque no plantea la exigencia de sofisticados equipos para la obtención de datos ni complejas operaciones matemáticas para su

análisis, sino que solo requiere datos fáciles de obtener en campo y de operaciones matemáticas simples. Todo esto facilita su implementación regular en cualquier aeropuerto de Colombia, especialmente en aquellos pequeños aeropuertos regionales alejados del territorio nacional que suelen tener limitaciones financieras, logísticas y de acceso a la información. En este sentido, incluso podría tener un alcance de aplicación más amplio hasta varios países vecinos de la región.

Referencias

- Aerocivil. (2016). *Programa de limitación de fauna en aeródromos* [en línea]. <https://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil/Aerodromos/Documents/Programa%20nacional%20de%20limitaci%C3%B3n%20de%20fauna%20en%20aer%C3%B3dromos.pdf>
- Aerocivil. (2019). *Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC)* [en línea]. <https://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil/reglamentacion/rac>
- Anagnostopoulos, A. (2003). *Bird Strike Risk Assessment for Athens International Airport* [en línea]. https://www.aerohabitat.eu/uploads/media/BIRDSTRIKE_RISK_ASSESSMENT.pdf
- Allan, J. (2006). A Heuristic Risk Assessment Technique for Bird-strike Management at Airports. *Risk Analysis*, 26(3), 723-729. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00776.x>
- Alhumaidi, S.H.S., Alruwaili, I.Y.N. y Wheeler, B. (2023). u.s. Wildlife Strikes by Phase of Flight. *Journal of Management & Engineering Integration*, 16(1), 39-47. <https://doi.org/10.62704/10057/25980>
- Barrientos, C., González-Acuña, D., Moreno, L., Ardiles, K. y Figueroa, R. A. (2016). Aves asociadas al Aeropuerto Carriel Sur de Talcahuano, sur de Chile: evaluación de peligro aviario. *Gayana (Concepción)*, 80(1), 40-55. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382016000100005>
- Blackwell, B. F. y Fernández-Juricic, E. (2013). Behavior and physiology in the development and application of visual deterrents at airports. *Wildlife in Airport Environments: Preventing Animal-Aircraft Collisions through Science-Based Management*. The Johns Hopkins University Press (T. L. DeVault, B. F. Blackwell y J. L. Belant, eds.; pp. 11-22).

- Carter, N. B. (2001). All birds are not created equal: Risk assessment and prioritization of wildlife hazards at airfields [ponencia]. *2001 Bird Strike Committee-USA/Canada, Third Joint Annual Meeting, Calgary* [en línea]. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=birdstrike2001>
- Civil Aviation Authority (CAA). (2002). *Aerodrome Bird Control. Report Prepared by the Safety Regulation Group*. CAA.
- Coccon, F., Zucchetta, M., Bossi, G., Borrotti, M., Torricelli, P. y Franzoi, P. (2015). A Land-Use Perspective for Birdstrike Risk Assessment: The Attraction Risk Index. *PLoS ONE*, 10(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128363>
- DeVault, T. L., Blackwell, B. F., Seamans, T. W., Begier, M. J., Kouger, J. D., Washburn, J. E., Miller, P. R. y Dolbeer, R. A. (2018). Estimating Interspecific Economic Risk of Bird Strikes with Aircraft. *Wildlife Society Bulletin*, 42(1), 94-101. <https://doi.org/10.1002/wsb.859>
- Dolbeer, R. A., Wright, S. E. y Cleary, E. C. (2000). Ranking the Hazard Level of Wildlife Species to Aviation. *Wildlife Society Bulletin*, 28(2), 372-378. <https://www.jstor.org/stable/3783694>
- Dolbeer, R., Begier, M., Miller, P., Weller, J. y Anderson, A. (2023). *Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States, 1990-2022* [en línea]. https://www.faa.gov/airports/airport_safety/wildlife/wildlife_strikes_civil_aircraft_united_states_1990_2022
- European Aviation Safety Agency (EASA). (2009). *Bird Strike Damage and Windshield Bird Strike* [en línea]. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/research-reports/easa2008c49>
- El-Sayed, A. F. (2019). *Bird Strike in Aviation: Statistics, Analysis and Management*. John Wiley & Sons.
- Fernández-Juricic, E., Brand, J., Blackwell, B. F., Seamans, T. W. y DeVault, T. L. (2018). Species with Greater Aerial Maneuverability have Higher Frequency of Collisions with Aircraft: A Comparative Study. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00017>
- Fu, H., Su, M. S., Chu, J. J., Margaritescu, A. y Claramunt, S. (2023). New Methods for Estimating the Total Wing Area of Birds. *Ecology and Evolution*, 13(9). <https://doi.org/10.1002/ece3.10480>
- Gerringer, M., Lima, S. y DeVault, T. (2016). Evaluation of an avian radar system in a midwestern landscape. *Wildlife Society Bulletin*, 40(1), 150-159. <https://doi.org/10.1002/wsb.614>
- Gutiérrez-Serralde, S. M., Soldatitni, C., Albores-Barajas, Y. V., Rosas-Hernández, M. P., De la Cueva, H. y Rangel-Barón, P. (2023). Comparing Bird Strike Risk Assessment Methods: A New Perspective for Safety Management. *European Journal of Wildlife Research*, 69(57).
- Godínez, E. (2006). *Aves y aeronaves: riesgos y peligros* (3.ª ed.). Amazon.
- Hively, D. (2011). *Biological modeling in data poor scenarios* [thesis dissertation, University of California]. <https://users.soe.ucsc.edu/~msmangel/Hively%20MS.pdf>
- Holbech, L. H., Asamoah, A. y Owusu, E. H. (2015). A Rapid Assessment of Species-Specific Bird Strike Risk at the Kotoka International Airport in Accra, Ghana. *Ostrich*, 86(3), 277-285. <https://www.ajol.info/index.php/ostrich/article/view/141530>
- Hong, M.-J., Kim, M.-S., Moon, Y.-M., Choi, J.-H., Lee, W.-S. y Yoo, J.-C. (2019). A Comparison of Single and Multi-Matrix Models for Bird Strike Risk Assessment. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 33(6), 624-635. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2019.33.6.624>
- MacKinnon, B. (2004). *Sharing the Skies: An Aviation Industry Guide to the Management of Wild Life Hazards* (Transportation Canada, ed.). Aviation Publishing Division.
- Marateo, G., Grilli, P. G., Ferretti, V. y Bouzas, N. (2011). Diagnóstico de riesgo aviario en un aeródromo de un aérea megadiversa del Perú. *Revista Conexión SIPAER*, 2(3), 203-227. <http://conexaosipaer.com.br/index.php/sipaer/article/viewFile/101/141>
- Morgenroth, C. (2003). Development of an Index for Calculating the Flight Safety Relevance of Bird Species for an Assessment of the Bird Strike Hazard at Airports. *Bird and Aviation*, 23(2), 1-7.
- Metz, I. C., Ellerbroek, J., Mühlhausen, T., Kügler, D., Kern, S. y Hoekstra, J. M. (2021a). The Efficacy of Operational Bird Strike Prevention. *Aerospace*, 8(1), 17. <https://doi.org/10.3390/aerospace8010017>
- Metz, I. C., Ellerbroek, J., Mühlhausen, T., Kügler, D. y Hoekstra, J. M. (2021b). Analysis of Risk-Based Operational Bird Strike Prevention. *Aerospace*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/aerospace8020032>
- Ning, H. y Chen, W. (2014). Bird Strike Risk Evaluation at Airports. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 86(2), 129-137. <https://doi.org/10.1108/AEAT-07-2012-0111>
- Pujiula, D. J. (1925). *Nota sobre la irreductibilidad de la biología a las matemáticas*. Institució Catalana d'Història Natural [en línea]. <https://publicacions.iec.cat/repository/pdf/00000134/00000020.pdf>

- Roa, J. G. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 48(2), 183-219. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/24702>
- Saaty, T. L. (2000). *Fundamental of Decision and Priority Theory*. RWS Publications.
- Saaty, T. L. (2008). Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. <https://dx.doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Shao, Q., Zhou, Y., Zhu, P., Ma, Y. y Shao, M. (2020a). Key Factors Assessment on Bird Strike Density Distribution in Airport Habitats: Spatial Heterogeneity and Geographically Weighted Regression Model. *Sustainability*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/su12187235>
- Shao, Q., Zhou, Y. y Zhu, P. (2020b). Spatiotemporal Analysis of Environmental Factors on the Birdstrike Risk in High Plateau Airport with Multi-Scale Research. *Sustainability*, 12(22), 9357. <https://doi.org/10.3390/su12229357>
- Soldatini, C., Georgalas, V., Torricelli, P. y Albores-Barajas, Y. V. (2010). An Ecological Approach to Birdstrike Risk Analysis. *European Journal of Wildlife Research*, 56, 623-632. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10344-009-0359-z>
- Soldatini, C., Albores-Barajas, Y. V., Lovato, T., Andreon, A., Torricelli, P., Montemaggiori, A., Corsa, C. y Georgalas, V. (2011). Wildlife strike risk assessment in several Italian airports: lessons from BRI and a new methodology implementation. *PLoS ONE*, 6(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028920>
- Zakrajsek, E. J. y Bissonette, J. A. (2005). Ranking the Risk of Wildlife Species Hazardous to Military Aircraft. *Wildlife Society Bulletin*, 33(1), 258-264. <https://www.jstor.org/stable/3784863>

Análisis de la influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas

| Fecha de recibido: 05 de julio de 2024 | Fecha de aprobado: 19 de agosto de 2024 |

| Reception date: July 5, 2024 | Approval date: August 19, 2024 |

| Data de recebimento: 05 de julho de 2024 | Data de aprovação: 19 de agosto de 2024 |

Juan Carlos Daza Rincón

<https://orcid.org/0000-0002-5277-7837>
jcdazar01@libertadores.edu.co

Ingeniero Aeronáutico
Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación ARESYS

Aeronautical Engineer
Los Libertadores University Foundation, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
ARESYS research group

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

Rafael Enrique Ucros Rojas

<https://orcid.org/0000-0001-5125-4252>
reucrosr@libertadores.edu.co

Ingeniero Aeronáutico
Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación ARESYS

Aeronautical Engineer
Los Libertadores University Foundation, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
ARESYS research group

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

Luisa Fernanda Mónico Muñoz

<https://orcid.org/0000-0002-3597-6332>
luisa.monico@libertadores.edu.co

Ph.D. 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 Transportation
Teacher and researcher - Fundación Universitaria
Los Libertadores, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
ARESYS research group

Doutorado em Sistemas Propulsivos
em Meios de Transporte
Professor e pesquisador - Fundación Universitaria
Los Libertadores, Colômbia
Papel do pesquisador: teórico e escrito
Grupo de pesquisa ARESYS

Cómo citar este artículo: Daza Rincón, J. C., Ucros Rojas, R. E. y Mónico Muñoz, L. F. (2025). Análisis de la influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 59-67. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.834>



Análisis de la influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas

Resumen: La industria de la aviación es un componente vital del desarrollo económico global, dado que impulsa sectores como el turismo y el comercio. Las condiciones meteorológicas adversas impactan significativamente la seguridad y la eficiencia operativa de la aviación, lo cual representa un factor incontrolable importante. Este estudio tiene como objetivo analizar la influencia de las condiciones meteorológicas adversas en las operaciones aéreas. Los hallazgos muestran que el 23 % de los accidentes aéreos están relacionados con factores meteorológicos como el viento adverso, la baja visibilidad, la formación de hielo y la turbulencia. Además, en Estados Unidos el 82 % de los retrasos y el 42 % de las cancelaciones de vuelos son atribuibles a eventos meteorológicos adversos. La puesta en marcha de tecnologías de punta, como la inteligencia artificial y los modelos predictivos, junto con algoritmos como el ATMAP (ATM Airport Performance), se considera crucial para mejorar la planificación y respuesta operativa frente a estas condiciones, lo cual permite una gestión más eficaz del tráfico aéreo, y mantiene la seguridad y la puntualidad de las operaciones aeroportuarias.

Palabras clave: aeropuerto; demoras; desvíos; meteorología adversa; operaciones aéreas.

Analysis of the Influence of Adverse Weather on Aircraft Operations

Abstract: The aviation industry is a vital component of global economic development, as it drives sectors such as tourism and trade. Adverse weather conditions significantly impact the safety and operational efficiency of aviation, which represents an important uncontrollable factor. This study aims to analyze the influence of adverse weather conditions on aviation operations. The findings show that 23 % of air accidents are related to meteorological factors such as adverse wind, low visibility, icing and turbulence. In addition, in the United States 82 % of flight delays and 42 % of flight cancellations are attributable to adverse weather events. The implementation of state-of-the-art technologies, such as artificial intelligence and predictive models, together with algorithms such as ATMAP (ATM Airport Performance), is considered crucial to improve planning and operational response to these conditions, enabling more efficient air traffic management, and maintaining the safety and punctuality of airport operations.

Keywords: Airport; delays; diversions; adverse weather; air operations.

Análise da influência do clima adverso nas operações aéreas

Resumo: O setor de aviação é um componente vital do desenvolvimento econômico global, pois impulsiona setores como o turismo e o comércio. As condições climáticas adversas afetam significativamente a segurança e a eficiência operacional da aviação, o que representa um importante fator incontrolável. Este estudo tem como objetivo analisar a influência das condições climáticas adversas nas operações de aviação. Os resultados mostram que 23% dos acidentes aéreos estão relacionados a fatores meteorológicos, como vento adverso, baixa visibilidade, formação de gelo e turbulência. Além disso, nos Estados Unidos, 82% dos atrasos de voos e 42% dos cancelamentos de voos são atribuídos a eventos climáticos adversos. A implementação de tecnologias de ponta, como inteligência artificial e modelagem preditiva, juntamente com algoritmos como o ATMAP (ATM Airport Performance), é considerada crucial para melhorar o planejamento e a resposta operacional a essas condições, permitindo um gerenciamento mais eficiente do tráfego aéreo e mantendo a segurança e a pontualidade das operações aeroportuárias.

Palavras-chave: Aeroporto; atrasos; desvios; clima adverso; operações aéreas.

Introducción

Desde sus inicios, la aviación ha sido un componente vital del desarrollo económico, impulsora de otras industrias como el turismo y el comercio, y esencial en épocas de guerra o conflictos entre naciones. Para el 2019 la aviación generó 704,4 billones de dólares en beneficios brutos directos e impulsó 65,5 millones de puestos de trabajo alrededor del mundo (Oo y Oo, 2022).

Un factor importante que tiene un impacto directo en la aviación es la meteorología, uno de los aspectos que más influyen en el funcionamiento de una aeronave y en su seguridad. Aunque si bien la meteorología puede traer beneficios para la aviación, es un factor incontrolable con el que se debe convivir a la hora de realizar operaciones aéreas; por tanto, es fundamental conocer cuál es su influencia en el transporte aéreo (Oo y Oo, 2022).

La importancia de estudiar la meteorología en aviación radica en que puede alterar la seguridad de los vuelos y las operaciones, generar pérdidas económicas e incluso causar muertes (Gultepe, 2023). Se considera que su influencia en la seguridad se debe a que en el periodo 1995-1998 se presentaron 1520 accidentes de aviación general, y al menos una condición meteorológica fue un factor contribuyente para los accidentes reportados por la Junta Nacional de Seguridad en el Transporte. Se llegó a registrar que cerca del 30% de los accidentes de aviación en Estados Unidos son causados por la meteorología (Gultepe, 2023). Este tipo de afectaciones como incidentes o accidentes tienen un impacto directo no solo en la seguridad de la aviación, sino también en diferentes aspectos de la economía.

Uno de los efectos más relevantes y comunes de la meteorología en la aviación es el retraso o la cancelación de los vuelos, el cual representa un problema para todos los agentes involucrados en el transporte aéreo, entre ellos los pasajeros, las aerolíneas, los aeropuertos y los proveedores de servicios de navegación; de hecho, llegan a representar pérdidas estimadas para el 2019 de 33 billones de dólares. Un retraso en

la red de transporte aéreo genera distintos problemas posteriores, pues teniendo en cuenta que una aeronave realiza varios vuelos al día, un evento de retraso o cancelación puede afectar las operaciones siguientes, la programación de las tripulaciones y las conexiones o escalas en el caso de los pasajeros (Bombelli y Sallan, 2023).

Entre las causales de retraso están las siguientes: problemas de seguridad, meteorología adversa, retrasos debido al Sistema Nacional de Aviación, retrasos debidos al operador de la aeronave, llegada tarde de la aeronave, etc. (Hosterltur España, 13 de noviembre de 2008; Aerocivil, 2017). En cifras para el 2019, como se presenta en la Figura 1, se tiene que el 6% de los retrasos en las operaciones aéreas se debieron a la meteorología. Esta cifra durante años se ha mantenido alrededor del 6%, lo cual indica que no se presenta un cambio significativo, ya que es una variable que no es posible controlar (Oo y Oo, 2022).

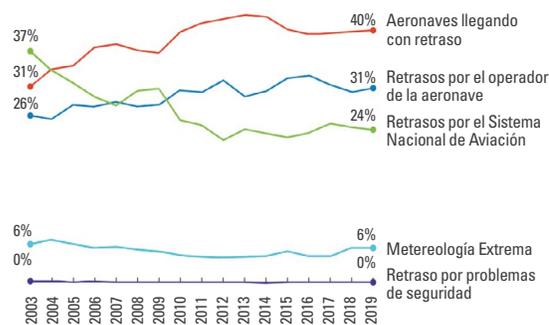


Figura 1. Causa del retraso por año, en porcentaje del total de minutos de retraso

Fuente: adaptado de Oo y Oo (2022).

Debido a la problemática presentada, algunos autores han realizado estudios relacionados con la meteorología adversa y su influencia. En el estudio de Gultepe *et al.* (2019), se analizan los efectos de varios fenómenos meteorológicos, como la niebla y la baja visibilidad, en las operaciones aeroportuarias y el control del tráfico aéreo. Se hace énfasis en cómo estos eventos pueden reducir significativamente la capacidad operativa y aumentar los retrasos. Los autores ofrecen un análisis de las medidas de mitigación y las estrategias de gestión de tráfico aéreo para mejorar

la resiliencia y la eficiencia bajo condiciones climáticas adversas.

Por su parte, Rodríguez-Sanz *et al.* (2021) investigan cómo las condiciones climáticas adversas afectan el rendimiento de los aeropuertos en términos de retrasos en las llegadas y la capacidad operativa. Ellos utilizan una metodología para evaluar el impacto de eventos meteorológicos adversos en el rendimiento de la llegada a los aeropuertos, utilizando datos de más de 750 000 vuelos en un importante centro europeo y datos meteorológicos locales del periodo 2015-2018.

Con el fin de buscar una solución a estas problemáticas, surge el estudio de Gultepe (2023), que ofrece una visión general de la meteorología aeroportuaria. Se discute cómo los pronósticos precisos y la interpretación meteorológica pueden mejorar la seguridad y la eficiencia de las operaciones aeroportuarias. A su vez, se destaca la importancia de tecnologías avanzadas y la integración de datos meteorológicos en tiempo real con sistemas de gestión de operaciones aeroportuarias para adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes y minimizar impactos operativos adversos.

Siguiendo la idea de Gultepe *et al.* (2019), Goodman y Small-Griswold (2019) destacan la implementación de sistemas avanzados que pueden facilitar una mejor planificación y respuesta a las condiciones meteorológicas adversas. Asimismo, analizan casos específicos en los que la tecnología ha permitido a los operadores de aeropuertos y controladores de tráfico aéreo tomar decisiones más informadas para gestionar eficazmente el flujo de tráfico aéreo, y mantener la seguridad y la puntualidad de las operaciones.

Si bien existen tecnologías para el estudio de la meteorología, es importante implementarlas en conjunto con las tendencias actuales como el caso de la inteligencia artificial. Por eso, es necesario mencionar a Schultz *et al.* (2018), quienes destacan la implementación de modelos predictivos que integran datos meteorológicos en tiempo real para optimizar la programación de vuelos y minimizar retrasos. Este último estudio también discute la aplicación de modelos estadísticos y de simulación para evaluar el efecto de

diversas condiciones meteorológicas en la puntualidad de los vuelos y la eficiencia operacional de los aeropuertos.

Metodología

Se comienza por definir claramente el problema, lo cual ayuda a establecer un marco específico para la investigación, identificando los objetivos y las preguntas clave que se quieren responder. El objetivo principal de este trabajo es analizar cómo influye la meteorología adversa en las operaciones aéreas. Una vez determinado el problema de investigación, se realiza una revisión de la literatura. Esta última etapa es esencial para entender lo que ya se sabe sobre el tema, identificar qué áreas no han sido exploradas y cómo nuestro enfoque puede aportar algo nuevo al conocimiento existente.

Con la información recopilada, se procede a comparar y a contrastar los datos y estudios existentes para ver si realmente se alinean con el planteamiento inicial y si pueden ofrecer respuestas a las preguntas de investigación. Es un proceso en el que se evalúa la relevancia y la actualidad de la información, y se revisa si lo que se ha encontrado satisface las necesidades iniciales. Si la respuesta es negativa, se avanza a la fase de revisión de literatura para ajustar el enfoque o buscar más datos; si es afirmativa, se avanza hacia la fase final.

El último paso consiste en analizar toda la información desde una perspectiva que permita alcanzar los objetivos planteados. Aquí, todo se enfoca en sacar conclusiones bien fundamentadas en las investigaciones encontradas que respondan al problema inicial, interpretando los datos y reflexionando sobre las implicaciones de los hallazgos. Lo anterior, se presenta esquemáticamente en la Figura 2.



Figura 2. Metodología

Fuente: elaboración propia.

Resultados y análisis

La influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas es múltiple y compleja, por lo cual impacta la seguridad y la eficiencia operativa de la aviación.

En el periodo comprendido entre 2008 y 2020, por medio de datos de la Junta Nacional de Seguridad en el Transporte, es posible desarrollar una representación visual del impacto de diferentes condiciones meteorológicas en los accidentes relacionados con la aviación. La Figura 3 indica que el 23 % de todos los accidentes de aviación están relacionados con el clima, mientras que el 77 % no lo están, lo cual resalta la importancia significativa de las condiciones meteorológicas en la seguridad de la aviación. Este dato es crucial para entender la importancia del problema y resaltar la necesidad de estrategias efectivas para mitigar el impacto de las condiciones meteorológicas adversas. La distribución de las causas meteorológicas de los accidentes revela que el viento adverso es la causa más frecuente, con el 53 % de incidentes. Las fuertes ráfagas y los vientos cruzados pueden afectar la estabilidad y el control de las aeronaves durante el despegue y el aterrizaje. Esta alta incidencia destaca la importancia de mejorar las predicciones y las respuestas operativas a los vientos adversos.

Otra causa significativa es la baja visibilidad, con el 16 % de accidentes relacionados con el clima. Tales condiciones dificultan las operaciones de despegue y aterrizaje, aumentando el riesgo de accidentes. La formación de hielo en las estructuras de la aeronave y en el carburador en aeronaves que lo tienen también es una causa notable, que contribuye al 9 % de los accidentes (7 % por hielo en el carburador y 2 % por hielo en la estructura). La acumulación de hielo puede afectar negativamente la aerodinámica y el rendimiento del motor.

La turbulencia es responsable del 6 % de los accidentes, siendo otra causa significativa que puede desestabilizar la aeronave y afectar la seguridad del vuelo. La altitud de densidad, con el 5 %, afecta el rendimiento del motor y la sustentación de las aeronaves, especialmente en regiones montañosas y en días calurosos. Las corrientes de aire ascendentes y descendentes representan otro 5 % de los accidentes. Los cambios rápidos en la altitud pueden desestabilizar las aeronaves, especialmente en vuelos a baja altitud.

Las tormentas eléctricas, aunque solo representan el 2 % de los accidentes, son extremadamente peligrosas debido a los rayos, el granizo y la turbulencia severa asociada. La cizalladura del viento (*windshear*), también con el 2 %, es una condición crítica que puede causar pérdidas repentinas de altitud y velocidad

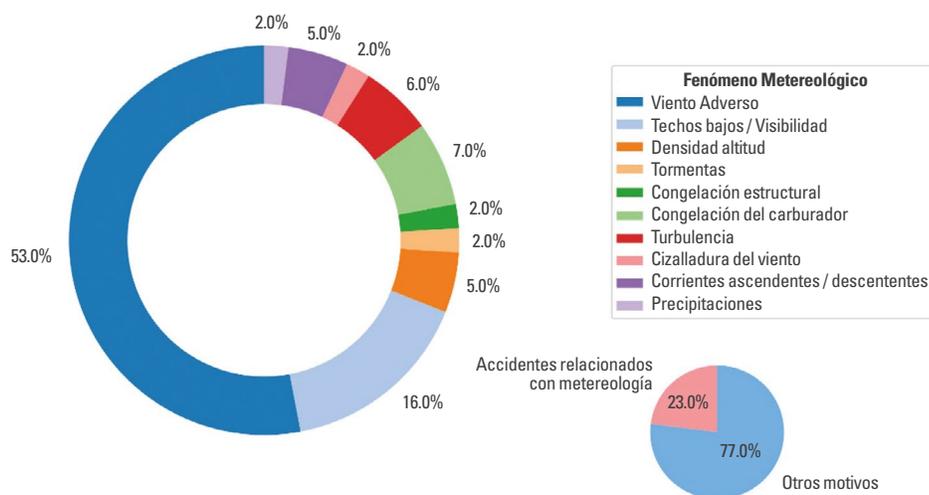


Figura 3. Accidentes relacionados con el factor medioambiental en el periodo 2008-2020, según datos de la Junta Nacional de Seguridad en el Transporte
Fuente: adaptado de Gutelpe (2023).

durante el despegue y el aterrizaje. La precipitación, incluyendo lluvia intensa y nieve, contribuye al 2% de los accidentes al afectar la visibilidad y las condiciones de la pista.

Los retrasos y las cancelaciones de vuelos son una de las consecuencias más reveladoras de las condiciones meteorológicas adversas. Los eventos meteorológicos extremos en Estados Unidos contribuyen significativamente a los retrasos en las operaciones aéreas, con 82% de los minutos de retraso en el Sistema Nacional del Espacio Aéreo atribuidos al clima. Asimismo, el 42% de las cancelaciones de vuelos se debieron a eventos meteorológicos adversos, y los retrasos más graves fueron asociados con condiciones de congelación, tormentas eléctricas y baja visibilidad (Goodman y Small-Griswold, 2019).

Si bien las condiciones meteorológicas, junto con su intensidad, pueden variar drásticamente dependiendo de la ubicación geográfica, siempre existe el factor climático. En Europa, se estudiaron el impacto de las condiciones climáticas adversas en los retrasos de llegadas y en la capacidad operativa de los aeropuertos europeos, utilizando una metodología basada en redes bayesianas. Se encontró una fuerte correlación entre eventos meteorológicos adversos y retrasos de llegada, especialmente en condiciones de alta demanda y capacidad limitada; la intensidad y dirección del viento, la baja visibilidad y las condiciones de tormenta se identificaron como variables meteorológicas críticas (Gultepe, 2023).

Con el fin de cuantificar las condiciones meteorológicas, se crea el algoritmo ATMAP (ATM Airport Performance) para describir condiciones meteorológicas en los aeropuertos, creado por la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea. El objetivo es cuantificar y gestionar los impactos meteorológicos en las operaciones aeroportuarias, proporcionando una base para la programación y la toma de decisiones informadas en la industria de la aviación.

Los resultados obtenidos por este algoritmo muestran que las condiciones climáticas severas, como altas velocidades de viento, baja visibilidad y fenómenos peligrosos (tormentas, nieve intensa), tienen

un impacto importante en la capacidad operativa de los aeropuertos y resultan en mayores tasas de cancelaciones y retrasos. Por medio de estos resultados, se destaca la importancia de los modelos predictivos y la integración de datos meteorológicos en tiempo real para mejorar la programación de vuelos y minimizar los retrasos (Schultz *et al.*, 2019).

Con el algoritmo ATMAP se realizó un estudio en el aeropuerto de Gatwick, que puede ser observado en la Figura 4. En el eje horizontal, se representa el tiempo del día en minutos, mientras que en el eje vertical izquierdo se muestra el retraso acumulado en minutos, y en el eje vertical derecho se presenta la puntuación ATMAP. La relación entre la puntuación ATMAP (línea negra) y los retrasos acumulados (barras grises) es evidente en el gráfico. Se observa que durante los periodos en que la puntuación ATMAP es alta, los retrasos acumulados también aumentan significativamente, lo cual indica que las condiciones meteorológicas adversas, reflejadas por una alta puntuación ATMAP, tienen un impacto directo en el incremento de los retrasos de vuelo (Schultz *et al.*, 2019). A lo largo del día, se observan patrones de retrasos significativos, especialmente al inicio del día. En este periodo, se produce un rápido incremento de los retrasos con un máximo de 795 minutos acumulados debido a un periodo de dos horas de niebla, asociado con una puntuación ATMAP de 5 (Schultz *et al.*, 2019).

La comparación entre los movimientos programados de aeronaves (línea roja) y los movimientos reales de aeronaves (línea azul) muestra que durante los periodos de alta puntuación ATMAP hay una diferencia significativa entre los dos tipos de movimientos. Esto indica una reducción en la capacidad operativa del aeropuerto de Gatwick debido a las condiciones meteorológicas adversas. La niebla se destaca como un fenómeno meteorológico crítico en este caso y causa una gran acumulación de retrasos en un corto periodo de tiempo. Debido a lo anterior, es importante tener previsiones precisas y medidas de mitigación para gestionar los periodos de baja visibilidad y minimizar los impactos en las operaciones del aeropuerto (Schultz *et al.*, 2019).

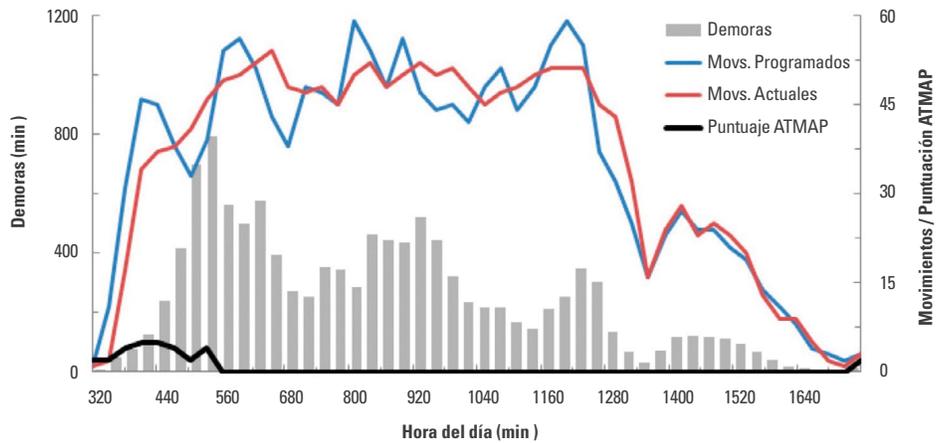


Figura 4. Datos sobre el rendimiento del aeropuerto y puntuación meteorológica ATMAP en el aeropuerto de Gatwick
Fuente: adaptado de Schultz et al. (2019).

Los diferentes estudios que han revisado el impacto de las condiciones meteorológicas destacan la necesidad de implementar tecnologías avanzadas y estrategias de mitigación para mejorar la resiliencia y la eficiencia bajo condiciones climáticas adversas. Gultepe (2023) y Goodman y Small-Griswold (2019) discuten cómo los pronósticos precisos y la interpretación meteorológica pueden mejorar la seguridad y la eficacia de las operaciones aeroportuarias. La integración de procesos como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en los sistemas de gestión de operaciones aeroportuarias permite una mejor planificación y respuesta a las condiciones meteorológicas adversas.

Dado lo anterior, se resalta la aplicación de modelos predictivos y simulaciones para evaluar el efecto de diversas condiciones meteorológicas en la puntualidad de los vuelos y la eficiencia operacional de los aeropuertos. Estos modelos permiten una evaluación más precisa de los impactos del clima y ayudan a desarrollar estrategias para mitigar los retrasos y mejorar la capacidad operativa (Schultz et al., 2018).

A su vez, los algoritmos no supervisados hacen inferencias a partir de conjuntos de datos utilizando solo vectores de entrada, sin hacer referencia a salidas conocidas o etiquetadas. Un método básico de esta área es la agrupación de *k-media*, que busca un

número definido de *k* grupos en un conjunto de datos que son similares entre sí y tienen en cuenta los patrones subyacentes. El algoritmo comienza con un primer conjunto de centroides, seleccionados aleatoriamente, utilizados como punto de partida para cada grupo y luego realiza cálculos iterativos para optimizar las posiciones de los centroides (Hartigan y Wong 1979). Sin embargo, era uno de los métodos más antiguos y su precisión no era la mejor, por lo cual ya está en desuso.

Hoy en día, la inteligencia artificial ha demostrado ser una herramienta esencial en la precisión de las predicciones climáticas y en el desarrollo y el planteamiento de soluciones novedosas para encarar los problemas medioambientales. La inteligencia artificial tiene la capacidad de analizar grandes volúmenes de datos ambientales (temperaturas, precipitaciones, patrones de viento, etc.), con el fin de identificar tendencias y hacer proyecciones sobre el futuro climático con mayor precisión. Por ejemplo, algoritmos de inteligencia artificial están siendo utilizados para mejorar los modelos climáticos globales, y permiten a los científicos prever con más exactitud fenómenos extremos como huracanes, olas de calor y sequías (CDETECH, 20 de mayo 2024). Esta mayor precisión en las predicciones hace que los seres humanos puedan actuar y buscar soluciones a los problemas que se avecinan.

En el sector aéreo, la inteligencia artificial ha ayudado también en la predicción de las trayectorias de las aeronaves empleando algoritmos de *deep learning* (Peñas-Pérez, 2022), a predecir la formación de tormentas (Hamlet, 19 de mayo de 2021) y a pronosticar variables meteorológicas a través del algoritmo LGB Classifier con 250 estimadores de la librería Scikit-Learn (Valenciano, 1 de octubre de 2023).

El análisis de los estudios revisados muestra que las condiciones meteorológicas adversas tienen un impacto significativo en las operaciones de aviación, pues afectan tanto la seguridad como la eficiencia operativa. Fenómenos meteorológicos como la baja visibilidad, el viento, la precipitación y las condiciones de congelación son factores críticos que contribuyen a los retrasos y a las cancelaciones de vuelos, así como a la reducción de la capacidad operativa de los aeropuertos. El hecho de que los aeropuertos puedan contar con herramientas de predicción cada vez más precisas permitiría que las compañías aéreas que transportan pasajeros y carga planteen soluciones oportunas y eficaces ante situaciones críticas.

A nivel nacional, en el 2023 se reportaron inconvenientes a causa del mal clima, lo cual afectó la salida y la llegada de los vuelos nacionales e internacionales. La Aeronáutica Civil de Colombia reportó 211 vuelos con demoras que afectaron a 34 000 pasajeros, 52 vuelos fueron cancelados con 7130 pasajeros afectados y 1900 pasajeros que perdieron sus vuelos de conexión (Rairán, 20 de noviembre de 2023). Para ese mismo año, en el este de Estados Unidos más de 7000 vuelos se vieron afectados por las fuertes tormentas de verano (Wallace y Rothenberg, 7 de agosto de 2023).

Es crucial mejorar las capacidades de predicción y medición de estos fenómenos, implementar tecnologías avanzadas y desarrollar modelos predictivos que integren datos meteorológicos en tiempo real. Estas medidas permitirán a los operadores de aeropuertos y controladores de tráfico aéreo tomar decisiones más informadas, gestionar eficazmente el flujo de tráfico aéreo y mantener la seguridad y la puntualidad de las operaciones.

Conclusiones

Luego de realizar la revisión, se concluye que las condiciones meteorológicas adversas tienen un impacto significativo en la seguridad y eficiencia operativa de la aviación. El 23% de los accidentes aéreos están relacionados con factores meteorológicos, siendo los más críticos el viento adverso, la baja visibilidad, la formación de hielo y la turbulencia. En Estados Unidos, el 82% de los retrasos y el 42% de las cancelaciones de vuelos se atribuyen a eventos meteorológicos adversos. Estos hallazgos resaltan la necesidad de mejorar las predicciones meteorológicas y las respuestas operativas.

La implementación de tecnologías de punta, como la inteligencia artificial y los modelos predictivos, junto con algoritmos como el ATMAP, es esencial para cuantificar y gestionar los impactos meteorológicos en las operaciones aeroportuarias. Estas medidas permitirán a los operadores y controladores de tráfico aéreo tomar decisiones más oportunas, gestionar eficazmente el flujo de tráfico aéreo y mantener la seguridad y puntualidad de las operaciones. Lo anterior ayudará a mantener la calidad del servicio que se les presta a los pasajeros y, por qué no, al transporte de carga. Asimismo, tener herramientas que ayuden a planear alternativas de solución ante un evento meteorológico permitirá que las operaciones aéreas sean más organizadas.

Referencias

- Aerocivil. (2017). Anexo 01. Códigos de demora de causas de incumplimiento de itinerario. En: *Circular informativa N.º 2. Metodología cálculo del cumplimiento aerocomercial de empresas de transporte aéreo regular de pasajeros* [en línea]. <https://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/Cumplimiento/Circular%20No.%202%20-Anexo.pdf>
- Bombelli, A. y Sallan, J. M. (2023). Analysis of the effect of extreme weather on the us domestic air network. A

- delay and cancellation propagation network approach. *Journal of Transport Geography*, 107. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2023.103541>
- CDETECH. (2024, 20 de mayo). *Inteligencia artificial en la predicción del cambio climático* [en línea]. <https://cdetech.org/inteligencia-artificial-en-la-prediccion-del-cambio-climatico/#:~:text=Mejora%20de%20la%20Precisi%C3%B3n%20en%20las%20Predicciones%20Clim%C3%A1ticas&text=Por%20ejemplo%2C%20algoritmos%20de%20IA,olas%20de%20calor%20y%20sequ%C3%ADas>
- Goodman, C. J. y Small-Griswold, J. D. (2019). Meteorological impacts on commercial aviation delays and cancellations in the continental United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(3), 479-494. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0277.1>
- Gultepe, I. (2023). A review on weather impact on aviation operations: Visibility, wind, precipitation, icing. *Journal of Airline Operations and Aviation Management*, 2(1), 1-44. <https://doi.org/10.56801/JAOAM.V2I1.1>
- Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P. D., Zhou, B., Ellrod, G., Minnis, P., Trier, S., Griffin, S., Yum, S. S., Gharabaghi, B., Feltz, W., Temimi, M., Pu, Z., Storer, L. N., Kneringer, P., Weston, M. J., Chuang, H. ya, Thobois, L., Dimri, A. P., ... Albuquerque Neto, F. L. (2019). A review of high impact weather for aviation meteorology. *Pure and Applied Geophysics*, 176, 1869-1921. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6>
- Hamlet. (2021, 19 de mayo). *Un nuevo algoritmo permite predecir la formación de tormentas en el aeropuerto de Madrid-Barajas* [en línea]. <https://www.uco.es/hamlet/index.php/noticias/13-un-nuevo-algoritmo-permite-predecir-la-formacion-de-tormentas-en-el-aeropuerto-de-madrid-barajas>
- Hartigan, J. A. y M. A. Wong. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28(1), 100-108. <https://www.stat.cmu.edu/~rnugent/PCMI2016/papers/HartiganKMeans.pdf>
- Hosteltur España. (2008, 13 de noviembre). *Identifican las cinco causas fundamentales de los retrasos aéreos* [en línea]. https://www.hosteltur.com/57156_identifican-cinco-causas-fundamentales-retrasos-aereos.html
- Oo, K. T. y Oo, K. L. (2022). Analysis of the most common aviation weather hazard and its key mechanisms over the Yangon flight information region. *Advances in Meteorology* [en línea]. <https://doi.org/10.1155/2022/5356563>
- Peñas-Pérez, I. (2022). Predicción de trayectorias de aeronaves empleando algoritmos de Deep Learning [trabajo de grado, Universidad de Valladolid]. Repositorio institucional UVA. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/55658>
- Rairán, S. (2023, 20 de noviembre). *Aeropuerto El Dorado anuncia demoras en vuelos: estas serían las causas*. Infobae [en línea]. <https://www.infobae.com/colombia/2023/11/21/aeropuerto-el-dorado-anuncia-demoras-en-vuelos-estas-serian-las-causas/>
- Rodríguez-Sanz, Á., Cano, J. y Rubio-Fernández, B. (2021). Impact of weather conditions on airport arrival delay and throughput. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1024(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1024/1/012107>
- Schultz, M., Lorenz, S., Schmitz, R. y Delgado, L. (2018). Weather impact on airport performance. *Aerospace*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/aerospace5040109>
- Schultz, M., Reitmann, S. y Alam, S. (2019). *Classification of weather impacts on airport operations*. 2019 Winter Simulation Conference (wsc). Diciembre 8-11 de 2018. <https://doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004915>
- Valenciano, J. R. (2023, 1 de octubre). *Aplicación de la inteligencia artificial al pronóstico de las variables meteorológicas en el aeropuerto de Vigo*. AEMET Blog [en línea]. <https://aemetblog.es/2023/10/01/aplicacion-de-la-inteligencia-artificial-al-pronostico-de-las-variables-meteorologicas-en-el-aeropuerto-de-vigo/>
- Wallace, G. y Rothenberg, E. (2023, 7 de agosto). *Miles de vuelos cancelados y retrasados en EE.UU. por el mal tiempo que amenaza el este del país*. CNN en Español [en línea]. <https://cnnespanol.cnn.com/2023/08/07/miles-vuelos-retrasados-mal-tiempo-este-eeuu-trax>

Regulación del espacio aéreo nacional: estrategias operativas de la Fuerza Aérea Ecuatoriana

| Fecha de recibido: 08 de agosto de 2024 | Fecha de aprobado: 26 de agosto de 2024 |

| Reception date: August 08, 2024 | Approval date: August 26, 2024 |

| Data de recebimento: 08 de agosto de 2024 | Data de aprovação: 26 de agosto de 2024 |

Víctor Xavier Enríquez Champutiz

<https://orcid.org/0009-0004-4381-7165>
vxenriquez@gmail.com

Mag. en Ingeniería de Calidad y Productividad
Teniente Coronel EMT, Fuerza Aérea Ecuatoriana, Ecuador
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación FAE

Master's Degree in Quality and Productivity Engineering
Lt. Colonel EMT, Ecuadorian Air Force, Ecuador
Researcher's role: theoretical and written
FAE Research Group

Mestrado em Engenharia de Qualidade e Produtividade
Tenente-coronel EMT, Força Aérea Equatoriana, Equador
Papel do pesquisador: teórico e escrito
Grupo de pesquisa FAE

Patricio Javier Aguilar Cazar

<https://orcid.org/0009-0003-1388-8678>
pacjaguilar@gmail.com

Mag. en Derecho Constitucional y Especialista en Derecho Espacial
Teniente Coronel EMT, Fuerza Aérea Ecuatoriana, Ecuador
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación FAE

Master in Constitutional Law
Lieutenant Colonel EMT, Ecuadorian Air Force, Ecuador
Researcher's role: theoretical and written
FAE Research Group

Mestrado em Direito Constitucional
Tenente-Coronel EMT, Força Aérea Equatoriana, Equador
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de investigação FAE

Cómo citar este artículo: Enríquez Champutiz, V. X. y Aguilar Cazar, P. J. (2025). Regulación del espacio aéreo nacional: estrategias operativas de la Fuerza Aérea Ecuatoriana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 68-77. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.836>



Regulación del espacio aéreo nacional: estrategias operativas de la Fuerza Aérea Ecuatoriana

Resumen: El Estado ecuatoriano, en su marco de derecho constitucional, ha establecido como deberes primordiales garantizar y defender su soberanía nacional, y garantizar a sus habitantes el derecho a una cultura de paz y a la seguridad integral. Bajo esta concepción, el Gabinete Sectorial de Seguridad elaboró la política pública de seguridad integral, que instituye la defensa nacional como un bien público y un deber irrenunciable y permanente del Estado, componente de la seguridad integral y garantía de la soberanía e integridad territorial, que preserva los derechos, las garantías y las libertades de los ciudadanos.

Los dispositivos político-jurídicos que respaldaron la promulgación de la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional, publicada en el Registro Oficial 609 de 26 de julio de 2024, constituyen una estrategia de seguridad nacional, destinada a proteger los intereses vitales del Estado ecuatoriano en el espacio suprayacente continental, insular y marítimo.

Esta ley regula la vigilancia, el monitoreo, el control y la intervención de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, en su calidad de Autoridad Nacional encargada de la defensa de la soberanía e integridad en el espacio suprayacente, considerado como un elemento constitutivo del territorio nacional. Esta medida responde a las nuevas amenazas que azotan a la región latinoamericana, y en particular a nuestro país, mediante el uso de ingenios aéreos y espaciales para la ejecución de actividades ilícitas.

Palabras clave: Autoridad Nacional; espacio suprayacente; Fuerza Aérea Ecuatoriana; ingenios aeroespaciales.

Regulation of national airspace: Operational strategies of the Ecuadorian Air Force

Abstract: The Ecuadorian State, within its constitutional legal framework, has established as primary duties the guarantee and defense of its national sovereignty, and ensuring its inhabitants' right to a culture of peace and comprehensive security. Under this concept, the Security Sectorial Cabinet developed the public policy of comprehensive security, which establishes national defense as a public good and an irreplaceable and permanent duty of the State, as a component of comprehensive security and a guarantee of sovereignty and territorial integrity, preserving the rights, guarantees, and freedoms of citizens.

The political and legal instruments that supported the promulgation of the Organic Law for the Control of National Airspace, published in Official Register 609 on July 26, 2024, constitute a national security strategy aimed at protecting the vital interests of the Ecuadorian State in the suprayacent continental, insular, and maritime space.

This law regulates the surveillance, monitoring, control, and intervention of the Ecuadorian Air Force in its capacity as the National Authority responsible for defending sovereignty and integrity in the suprayacent space, considered a constitutive element of national territory. This measure responds to the new threats affecting the Latin American region, and particularly our country, through the use of aerial and space devices for the commission of illicit activities.

Keywords: National Authority; suprayacent space; Ecuadorian Air Force; aerospace devices.

Regulamentação do espaço aéreo nacional: Estratégias operacionais da Força Aérea Equatoriana

Resumo: O Estado equatoriano, em seu marco de direito constitucional, estabeleceu como deveres primordiais garantir e defender sua soberania nacional, e assegurar aos seus habitantes o direito a uma cultura de paz e à segurança integral. Sob essa concepção, o Gabinete Setorial de Segurança elaborou a política pública de segurança integral, que institui a defesa nacional como um bem público e um dever irrenunciável e permanente do Estado, componente da segurança integral e garantia da soberania e integridade territorial, preservando os direitos, garantias e liberdades dos cidadãos.

Os dispositivos político-jurídicos que respaldaram a promulgação da Lei Orgânica para o Controle do Espaço Aéreo Nacional, publicada no Registro Oficial 609 de 26 de julho de 2024, constituem uma estratégia de segurança nacional, destinada a proteger os interesses vitais do Estado equatoriano no espaço suprayacente continental, insular e marítimo.

Esta lei regula a vigilância, o monitoramento, o controle e a intervenção da Força Aérea Equatoriana, na sua qualidade de Autoridade Nacional responsável pela defesa da soberania e integridade no espaço suprayacente, considerado um elemento constitutivo do território nacional. Esta medida responde às novas ameaças que afetam a região latino-americana, e particularmente o nosso país, mediante o uso de dispositivos aéreos e espaciais para a realização de atividades ilícitas.

Palavras-chave: Autoridade Nacional; espaço suprayacente; Força Aérea Equatoriana; dispositivos aeroespaciais.

Introducción

El entorno actual de las relaciones sociales, económicas, políticas, jurídicas y de seguridad en América Latina revela un escenario complejo, incierto y dinámico, que impone desafíos significativos para satisfacer las necesidades de seguridad nacional de los Estados. Este contexto exige acciones que promuevan la pacificación de la convivencia ciudadana y la preservación de la seguridad integral frente a nuevas amenazas que impactan a los países de la región.

La seguridad nacional, uno de los principales deberes de los gobiernos, enfrenta amenazas tanto tradicionales como nuevas, las cuales han sido categorizadas por las Naciones Unidas en seis grupos:

[...] amenazas económicas y sociales (la pobreza, enfermedades infecciosas y la degradación ambiental); conflictos entre Estados; conflictos internos (la guerra civil, el genocidio y otras atrocidades en gran escala); las armas nucleares, radiológicas, químicas y biológicas; el terrorismo; y la delincuencia organizada transnacional. (Ministerio de Defensa Nacional del Ecuador, 2018, p. 46)

Desde la dolarización de la economía ecuatoriana en el año 2000, el país ha dejado de ser un territorio de tránsito para organizaciones criminales transnacionales, especialmente aquellas vinculadas al narcotráfico y delitos conexos como el lavado de dinero, para convertirse en un centro de almacenamiento, procesamiento y distribución de drogas en América Latina.

El portal de investigación InSight Crime ha catalogado al Ecuador como “una autopista de la cocaína hacia Estados Unidos y Europa” (Bargent, 30 de octubre de 2019), y destaca su ubicación geográfica como un factor clave para el establecimiento de carteles mexicanos y grupos criminales colombianos dedicados al narcotráfico. Esto ha provocado un incremento exponencial de economías criminales dentro del territorio ecuatoriano y las ha convertido en intermediarias en la distribución internacional de drogas.

Las fronteras compartidas con Colombia y Perú, los dos países que son mayores productores de cocaína en el mundo, facilitan el traslado de drogas hacia

las costas ecuatorianas; a través de pistas clandestinas ubicadas a lo largo del perfil costero, los cargamentos son embarcados en aeronaves hacia destinos en toda la región. Así, el medio aéreo se ha convertido en uno de los principales canales para el tráfico de drogas.



Figura 1. Zonas clave del narcotráfico en el Ecuador
Fuente: Pichel (11 de octubre de 2021).

Como respuesta a esta realidad, se ha priorizado la construcción de marcos programáticos y jurídicos para fortalecer la seguridad integral de los Estados y reducir riesgos en diversos ámbitos. Según Celi:

[...] las nuevas dinámicas de integración regional, el desarrollo de los sistemas políticos de los países del área, la naturaleza de los conflictos y factores de riesgo regionales y subregionales, y la interacción de los diversos enfoques sobre los alcances de la seguridad y la defensa, su dimensión institucional y los ámbitos regionales en los que se desagregan, en un contexto de asimetrías y reordenamiento de los factores económicos, políticos y militares que las determinan [son cruciales en este proceso]. (2005)

Bajo este contexto, el Ecuador ha definido el Plan Nacional de Seguridad Integral 2019-2030 “como el pilar fundamental que permite articular racionalmente la estrategia de seguridad de todas las instituciones involucradas y que dé como resultado una concepción

clara y orientadora para la protección de los intereses vitales del país” (Ministerio de Defensa Nacional del Ecuador, 2019, p. 24).

Esta estrategia busca minimizar o erradicar la transgresión a la integridad territorial, provocada por el accionar de los grupos de delincuencia organizada dedicados al tráfico ilegal de sustancias sujetas a fiscalización, mediante la disuasión y (cuando sea necesario) la represión como una acción de *ultima ratio*. Como lo indica Polverini, “la política de defensa es entendida en términos tradicionales como aquella que emprenden los estados nacionales abocada a prevenir y reprimir, ya sea en forma disuasiva o efectiva, amenazas o actos de agresión de origen externo que atenten contra su soberanía e independencia, así como a su integridad territorial y capacidad de autodeterminación por medio de la utilización de las fuerzas armadas” (2011, p. 2).

La Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE) tiene como responsabilidad la defensa de la soberanía y la integridad territorial en el espacio suprayacente, y para ello asume la misión del empleo operacional en los dominios aéreo y espacial, manteniendo la vigilancia, la alarma y el control en dichas regiones. Debido a esto, ha sido necesario desarrollar una doctrina y procedimientos para este empleo. Sin embargo, se ha visto la necesidad *sine qua non* de construir un marco jurídico que permita el empleo justificado de todas las capacidades aeroespaciales, como una estrategia operativa de la FAE para alcanzar la regulación del espacio aéreo nacional.

Este artículo realiza un análisis exhaustivo de la política de seguridad integral y de defensa nacional, que sustenta la determinación jurídica del empleo de las capacidades aeroespaciales de la FAE, garantizando así la soberanía y la integridad territorial del espacio suprayacente continental, insular y marítimo.

La política de seguridad integral y defensa nacional

Es fundamental que las Fuerzas Armadas realicen todos los esfuerzos necesarios para alcanzar la visión política de la Defensa Nacional, que está:

[...] enfocada en tres ejes estratégicos para la construcción de la concepción de seguridad: primero, aquella vinculada a la defensa del Estado, que tiene una perspectiva nacional, que abarca la soberanía e integridad territorial; segundo, generada desde una idea ampliada y multidimensional, que engloba además de la defensa, la seguridad pública; y, tercero, el ámbito de la seguridad frente a riesgos ambientales y antrópicos. (Ministerio de Defensa Nacional del Ecuador, 2019, p. 24)

El Plan Nacional de Seguridad Integral 2019-2030 determina lo siguiente: “Que el Estado ecuatoriano, en su derecho soberano, identifique sus propias prioridades nacionales de seguridad y defina estrategias, planes y acciones que permitan hacer frente a las amenazas, conforme al ordenamiento jurídico” (Ministerio de Defensa Nacional del Ecuador, 2019, p. 37). El plan también identifica:

[...] las amenazas que ponen en riesgo los intereses nacionales y estratégicos del Estado, entre las que constan la incidencia de grupos irregulares armados (narcotráfico y delitos conexos) y el crimen organizado; asimismo, ha identificado riesgos contra la seguridad nacional como flujos migratorios irregulares, ciberataques y vulneración de la infraestructura crítica del Estado, degradación ambiental, intenciones de desestabilización del orden constitucional, la corrupción y la explotación ilegal de los recursos naturales, sin dejar de atender la dinámica de los escenarios geopolíticos y las potenciales amenazas con el apareamiento de nuevos actores y desafíos asociados a factores políticos, sociales, ambientales estatales. (Ministerio de Defensa Nacional del Ecuador, 2018, pp. 51-53)

Por su parte, la Política de Defensa Nacional ha conceptualizado el empleo operacional de las Fuerzas Armadas, promoviendo su función en “el control y la protección del territorio ecuatoriano que comprende el espacio continental y marítimo, las islas adyacentes, el mar territorial, el Archipiélago de las Galápagos, el suelo, la plataforma submarina, el subsuelo y el espacio

suprayacente continental, insular y marítimo” (Ministerio de Defensa Nacional del Ecuador, 2018, p. 64).

Desde la promulgación de la Constitución de la República del Ecuador en el 2008, el artículo 4 establece que: “El territorio del Ecuador [...] comprende el espacio continental y marítimo, las islas adyacentes, el mar territorial, el Archipiélago de las Galápagos, el suelo, la plataforma submarina, el subsuelo y el espacio suprayacente continental, insular y marítimo”.

De esta determinación político-jurídica se desprenden los objetivos estratégicos para las Fuerzas Armadas (Ministerio de Defensa Nacional del Ecuador, 2018, p. 66):

1. Ejercer el control efectivo del territorio nacional: continental, insular, espacios acuáticos y aéreos; así como de infraestructura y recursos de las áreas estratégicas.
2. Fortalecer las capacidades estratégicas conjuntas de las Fuerzas Armadas que sean indispensables para mantener una capacidad de disuasión y defensa de la integridad territorial y de la soberanía nacional.

Con base en esta realidad, la FAE promovió desde el año 2012 la creación de una norma jurídica que le permita al Estado ecuatoriano alcanzar la protección integral del espacio suprayacente, y que tenga como objetivo preservar los intereses nacionales, considerando el aire-espacio como un elemento único en materia de seguridad, reglamentando la vigilancia, el monitoreo, el control y la intervención de la FAE como autoridad nacional en este ámbito.

Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional

Mediante Registro Oficial 609, de 26 de julio de 2024, en el marco de derecho positivo ecuatoriano, se promulga la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional. Esta ley establece disposiciones clave para alcanzar la seguridad integral del espacio suprayacente continental, insular y marítimo, entendiendo

este espacio como el elemento territorial que se extiende verticalmente sobre la superficie terrestre y acuática de jurisdicción nacional. De tal manera, se garantiza una concepción jurídica clara del empleo de esta dimensión (aire-espacio).

El presente estudio emplea una metodología de análisis deductivo del articulado de la norma *ut supra*, evaluando sus fortalezas pragmáticas y funcionales. Se evita realizar una interpretación restrictiva que podría resultar en una argumentación disociada, tal como lo concibe Guastini, quien describe este argumento como:

[...] introducir subrepticamente en el discurso del legislador una distinción en la que el legislador no ha pensado en absoluto, de forma que se reduce el campo de aplicación de una disposición a solo algunos de los supuestos de hecho por ella previstos (por ella previstos, se entiende, según una interpretación literal). (1999)

Los preceptos jurídicos contenidos en la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional tienen como finalidad garantizar la defensa de la soberanía nacional y alcanzar la seguridad integral para todos los habitantes, en cumplimiento de los deberes primordiales del Estado (Constitución de la República del Ecuador, Art. 3), a fin de promover un entorno de paz como objetivo superior de convivencia social. En el análisis, se reproducen textualmente los preceptos normativos para preservar el espíritu garantista de la ley:

Artículo 1. Objeto: La presente ley tiene por objeto regular y garantizar la defensa de la soberanía y la integridad territorial del espacio suprayacente continental, insular y marítimo; para prevenir y controlar actividades ilícitas que se cometan en estos espacios, en coordinación con las instituciones encargadas de la seguridad integral del Estado, de conformidad con la Constitución de la República del Ecuador, el Código Orgánico Integral Penal, la legislación aeronáutica e instrumentos internacionales que el Ecuador ha ratificado.

Este primer artículo refleja claramente que el objetivo de la ley es alcanzar la defensa de la soberanía y la integridad territorial del espacio suprayacente, como un elemento territorial del Estado; con lo que se prevé el empleo de ingenios aéreos y espaciales para el cometimiento de actividades ilícitas y así se contribuye fácticamente a preservar la seguridad integral de la nación:

Artículo 2. Finalidad: La presente ley tiene como finalidad proteger el espacio suprayacente continental, insular y marítimo, mediante el control de los ingenios aeroespaciales que por sus acciones u omisiones infrinjan las disposiciones contenidas en la legislación interna e instrumentos jurídicos internacionales en el ámbito aéreo y espacial; así como facilitar el desarrollo sostenible de los intereses aéreos y espaciales nacionales.

El control del espacio suprayacente se puede lograr mediante el empleo operacional de las capacidades de vigilancia, monitoreo, control e intervención de la FAE al ejercer la Autoridad Nacional de defensa e integridad del espacio aéreo, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 19 de la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional y en concordancia con lo determinado en el artículo 11 de la Ley de Seguridad Pública y del Estado, que estipula lo siguiente:

Los órganos ejecutores del Sistema de Seguridad Pública y del Estado estarán a cargo de las acciones de defensa, orden público, prevención y gestión de riesgos, conforme lo siguiente: a) De la defensa: Ministerios de Defensa, Relaciones Exteriores y Fuerzas Armadas. La defensa de la soberanía del Estado y la integridad territorial tendrá como entes rectores al Ministerio de Defensa y al de Relaciones Exteriores en los ámbitos de su responsabilidad y competencia. Corresponde a las Fuerzas Armadas su ejecución para cumplir con su misión fundamental de defensa de la soberanía e integridad territorial. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2009)

Con base en la premisa legal de apoyar el desarrollo sostenible de los intereses aéreos y espaciales del Estado, es necesario establecer mecanismos adecuados que promuevan la concreción de esta finalidad. En tal contexto, uno de los ejes principales es lograr la gobernanza de las actividades espaciales en el país:

Artículo 3. Ámbito de Aplicación: La presente ley será aplicable a todos los ingenios aeroespaciales públicos y privados, nacionales o extranjeros, que operen en el espacio suprayacente continental, insular y marítimo; y que atenten contra la seguridad integral del Estado. (Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional, Art. 3)

El objeto de la ley determina claramente la prevención y el control de las actividades ilícitas que se cometan en el espacio suprayacente, por parte de todos los ingenios aeroespaciales. Para esclarecer estos conceptos, el artículo 7 de la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional determina cuáles son las actividades ilícitas, y en correspondencia al artículo 9, conceptualiza qué son estos ingenios aeroespaciales.

Los artículos analizados se convierten en la piedra angular para entender integralmente los dispositivos jurídicos contenidos en la ley, regulando la intervención de la FAE ante la ocurrencia de los elementos fácticos que motiven el uso legítimo y excepcional de la fuerza para el control del espacio aéreo.

Es importante observar la Disposición Transitoria Primera de la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional, mediante la cual se operacionaliza la intervención de la FAE, como Autoridad Nacional de la defensa e integridad del espacio aéreo, en el reglamento a publicarse para el efecto, a saber: “En el plazo de ciento ochenta días contados a partir de la publicación de la presente ley en el Registro Oficial, el Presidente de la República expedirá el Reglamento General para el cumplimiento de esta ley”.

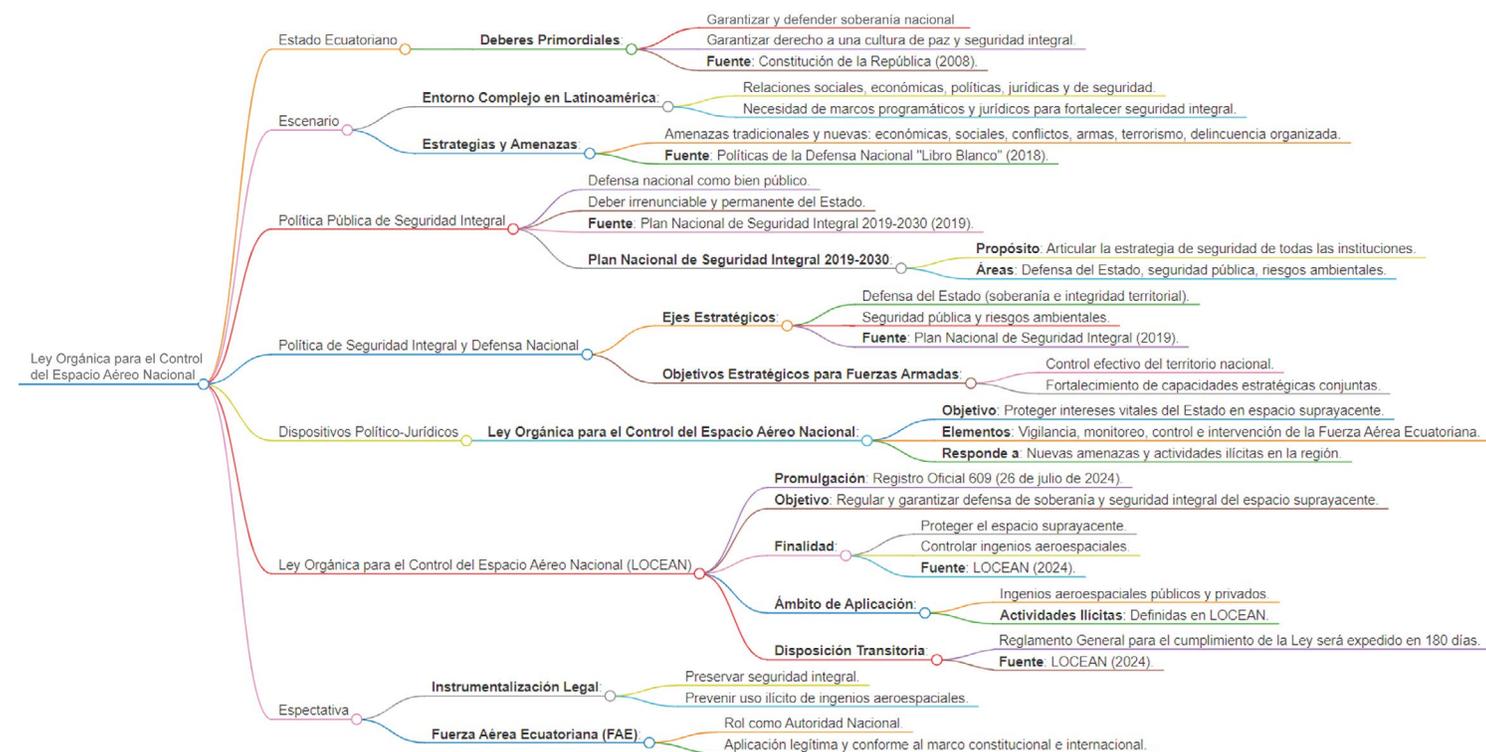


Figura 2. Concepción estratégica de la Seguridad Integral del Estado ecuatoriano, para la promulgación de la Ley Orgánica para Control del Espacio Aéreo Nacional.

Fuente: elaboración propia.

Intervención de la Fuerza Aérea Ecuatoriana ante la promulgación de la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional

Garantizar a todos los habitantes el derecho a una cultura de paz, a la seguridad integral y a la defensa nacional son deberes primordiales del Estado ecuatoriano. Bajo esta determinación constitucional, los habitantes del territorio se convierten en sujetos de tutela efectiva por parte del Gobierno. Como menciona Favier, “la seguridad del Estado no es un fin en sí mismo, sino un medio para garantizar la seguridad de sus habitantes” (2007, citado en Polverini, 2011).

La Constitución de la República del Ecuador, en el acápite segundo del artículo 2, establece que: “La soberanía radica en el pueblo, cuya voluntad es el fundamento de la autoridad, y se ejerce a través de los órganos del poder público y de las formas de participación directa previstas en la Constitución”. Esta concepción antropocéntrica sirve como base para la construcción del marco jurídico y programático del Estado.

Es crucial reconocer que los marcos jurídicos, tanto internos como internacionales, no son estáticos, sino que responden a la necesidad imperiosa de paz y bienestar a nivel global, regional y local. Las amenazas de un mundo globalizado que ha trascendido las fronteras de los Estados requieren que las políticas de defensa nacional evolucionen hacia la convergencia de

una política regional, mediante el empleo multidimensional de las capacidades de las Fuerzas Armadas.

En este contexto, la FAE, como Autoridad Nacional de la defensa e integridad del espacio aéreo, debe desarrollar las capacidades aeroespaciales necesarias para un empleo operacional eficiente en el dominio aire-espacio, pues esta dimensión se ha vuelto vulnerable a la explotación por parte de grupos armados irregulares y el crimen organizado transnacional.

La FAE, al adaptarse a estas directrices y desafíos, se posiciona como un pilar fundamental en la defensa y seguridad del Ecuador, contribuyendo significativamente a la estabilidad y bienestar de sus habitantes, por lo cual a continuación se presenta el esquema de trabajo a desarrollarse dentro de la institución.

Fortalecimiento de capacidades tecnológicas y operativas:

- Desarrollo e implementación de tecnologías avanzadas para la vigilancia y el control del espacio aéreo nacional (defensa aeroespacial).
- Capacitación continua del personal en nuevas tácticas y tecnologías de defensa.
- Incorporación de aeronaves no tripuladas como sistemas complementarios.

Cooperación regional e internacional:

- Participación activa en cooperación colaborativa para la defensa regional.
- Colaboración con fuerzas aéreas de otros países para enfrentar amenazas comunes.
- Fortalecimiento del Sistema de Cooperación entre las Fuerzas Aéreas Americanas.

Adaptación a nuevas amenazas:

- Desarrollo de estrategias específicas para combatir el crimen organizado transnacional y los grupos armados irregulares.
- Implementación de sistemas de inteligencia y contrainteligencia para anticipar y neutralizar amenazas.

Promoción de la investigación y el desarrollo:

- Fomento de la investigación en nuevas tecnologías de defensa aérea y espacial.
- Colaboración con instituciones académicas y científicas para innovar en soluciones de defensa.

Énfasis en la defensa integral del espacio suprayacente:

- Integración de la defensa aeroespacial y otros componentes de las Fuerzas Armadas para una respuesta coordinada y efectiva.
- Desarrollo de políticas que consideren la defensa no solo como una acción militar, sino también como parte de una estrategia integral de seguridad nacional.
- Construcción de doctrina y manuales operativos y tácticos necesarios para el empleo eficiente de las capacidades aeroespaciales institucionales.

Fortalecimiento de la educación militar:

- Como medio para adaptar la institución a procesos que aseguran una formación integral, adaptable y progresiva, que prepara a los miembros de la FAE para enfrentar los desafíos del presente y del futuro.
- Cambio en la cultura organizacional como un medio para garantizar la capacidad de proteger y servir a la nación ecuatoriana de manera efectiva y ética, manteniéndose como una institución flexible y resiliente, adaptando sus prácticas y valores para enfrentar nuevos desafíos.

La concepción idónea de todos estos factores a ser desarrollados por la FAE permitirá observar a cabalidad el espíritu que persigue la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional y asumir el rol de Autoridad Nacional de la defensa e integridad del espacio aéreo. Se entiende que la aplicación de esta norma no solo representa un desafío institucional, sino también para el propio Estado en la lucha implantada contra el narcotráfico y sus delitos conexos.

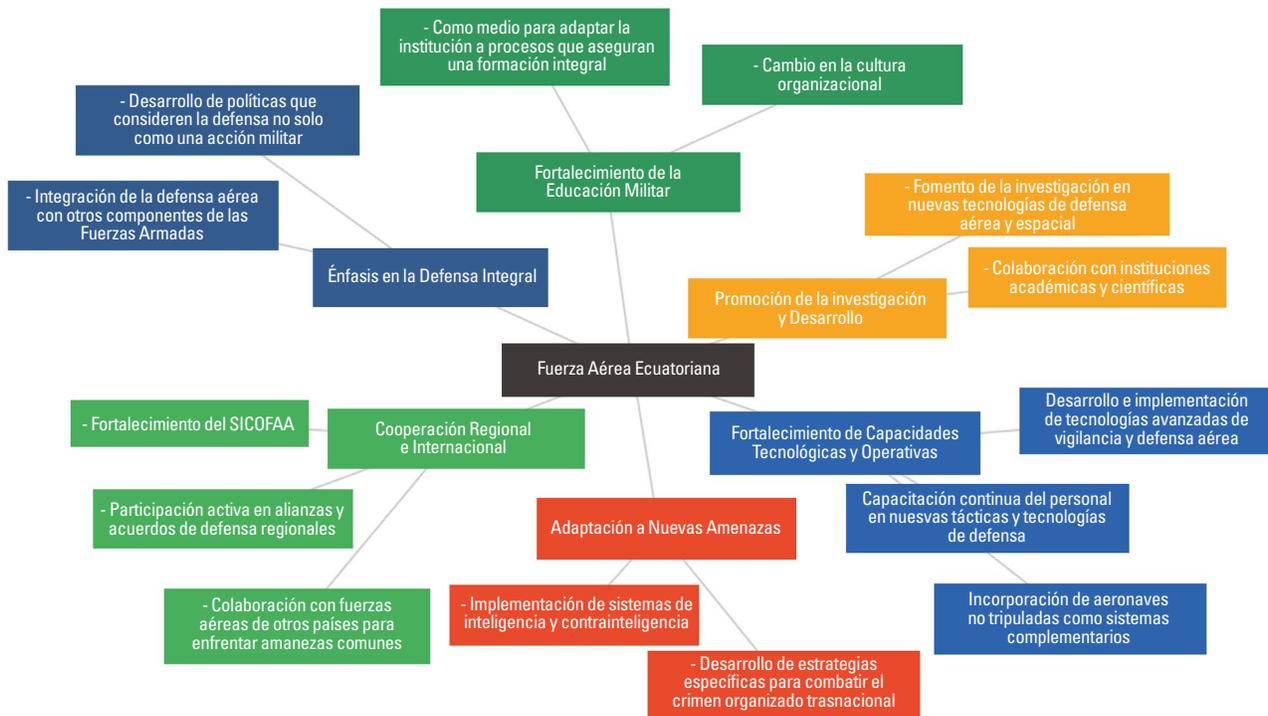


Figura 3. Propuesta de las estrategias institucionales de la FAE, a ser implementadas, para cumplir las responsabilidades como Autoridad Nacional de defensa de la soberanía y la integridad del espacio aéreo.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

La responsabilidad de los gobiernos constituidos para enfrentar un escenario interno cada vez más conflictivo, que ha resquebrajado la seguridad integral del Estado y la paz de la población, requiere la implementación de estrategias que le permitan legitimar el empleo de sus Fuerzas Armadas, y específicamente de la FAE, en la lucha por erradicar o reducir el accionar de los grupos delincuenciales transnacionales dedicados al narcotráfico, priorizando el desarrollo de las capacidades necesarias para un empleo eficiente en el dominio aire-espacio.

La Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional constituye la estrategia jurídica clave para prevenir el uso ilícito de ingenios aeroespaciales en el espacio suprayacente continental, insular y marítimo por parte de los grupos delincuenciales transnacionales, y para apoyar la lucha del Estado ecuatoriano contra el tráfico de drogas.

La instrumentalización jurídica de la defensa de la soberanía y la integridad del espacio suprayacente continental, insular y marítimo, a través de la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional, permitirá a la FAE, en su rol de Autoridad Nacional, contar con las capacidades de empleo para prevenir el uso ilícito de ingenios aeroespaciales en el espacio suprayacente, así como la explotación de la infraestructura aeronáutica (legal o ilegal) dentro del territorio ecuatoriano, bajo un modelo de gobernanza colaborativa con todos los organismos públicos que intervienen en la prosecución de la ley y la judicialización.

El uso progresivo y diferenciado de la fuerza por parte de la FAE requerirá la aplicación cabal de los procedimientos operacionales contenidos en el Reglamento General a la Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional, precisándola como una acción de *ultima ratio*, lo cual garantiza el cumplimiento de los dispositivos jurídicos determinados en el marco constitucional ecuatoriano y de los tratados internacionales de derechos humanos.

Referencias

- Asamblea Constituyente del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador. Registro Oficial 449* [en línea]. https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.PDF
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2009). *Ley de Seguridad Pública y del Estado. Registro Oficial Suplemento 35*. Septiembre 28 de 2009.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2024). *Ley Orgánica para el Control del Espacio Aéreo Nacional. Registro Oficial 609*. Julio 26 de 2024.
- Bargent, J. (2019, 30 de octubre). *Ecuador: autopista de la cocaína hacia Estados Unidos y Europa*. Insight Crime [en línea]. <https://insightcrime.org/es/investigaciones/ecuador-autopista-de-la-cocaina-hacia-estados-unidos-y-europa/>
- Celi, P. (2005). Nuevas tendencias en seguridad y defensa en América Latina. *Atlas comparativo de la defensa en América Latina* (M. Donadio, dir.; pp. 10-14). Resdal.
- Favier, P. E. (2007). *Seguridad humana: un nuevo acercamiento al concepto de seguridad*. Centro Argentino de Estudios Internacionales.
- Guastini, R. (1999). *Distinguiendo: estudios de teoría y meta-teoría del derecho*. Editorial Gedisa.
- Ministerio de Defensa Nacional del Ecuador. (2018). *Política de la Defensa Nacional del Ecuador “Libro Blanco”* [en línea]. <https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/2019/01/Pol%C3%ADtica-de-Defensa-Nacional-Libro-Blanco-2018-web.pdf>
- Ministerio de Defensa Nacional del Ecuador. (2019). *Plan Nacional de Seguridad Integral 2019-2030* [en línea]. <https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/07/plan-matriz-web.pdf>
- Pichel, M. (2021, 11 de octubre). *Cómo Ecuador pasó de ser país de tránsito a un centro de distribución de la droga en América Latina (y qué papel tienen los carteles mexicanos)*. BBC Mundo [en línea]. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-58829554>
- Polverini, E. G. (2011). *Política, Defensa y Seguridad Suramericana. Centro Argentino de Estudios Internacionales. Working Paper N.º 41 Programa Defensa & Seguridad*. Centro Argentino de Estudios Internacionales. <https://www.files.ethz.ch/isn/145413/41%20DS.pdf>
- Presidencia del Congreso Nacional del Ecuador. (2007). *Ley Orgánica de la Defensa Nacional. Registro Oficial 4*. Enero 19 de 2007.
- Presidencia de la República del Ecuador. (2024). *Reglamento General a la Ley Orgánica de la Defensa Nacional. Registro Oficial 601*. Julio 16 de 2024.

Extensión de la vida útil para unos sistemas de guiado de bombas GBU-49 de la Fuerza Aérea Colombiana

| Fecha de recibido: 29 de agosto de 2024 | Fecha de aprobado: 19 de septiembre de 2024 |

| Reception date: August 29, 2024 | Approval date: September 19, 2024 |

| Data de recebimento: 29 de agosto de 2024 | Data de aprovação: 19 de setembro de 2024 |

Mauricio López Gómez

<https://orcid.org/0000-0001-7403-1887>
mauricio.lopezg@fac.mil.co

Ph. D. en Gestión de la Innovación Tecnológica
Jefe Área Fomento Aeronáutico - Fuerza Aérea
Colombiana, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de Investigación en Estudios
Aeroespaciales – GIEA

Ph. D. in Technological Innovation Management
Head of Aeronautical Development Area - Colombian
Air Force, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
Aerospace Studies Research Group - GIEA

Doutor em Gestão da Inovação Tecnológica
Chefe da Área de Desenvolvimento Aeronáutico - Força
Aérea Colombiana, Colômbia
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de Investigação em Estudos Aeroespaciais - GIEA

Manuel Ricardo Arias Paredes

<https://orcid.org/0009-0009-4431-3133>
manuel.arias@fac.mil.co

Mag. en Ciencias Militares Aeronáuticas
Especialista Certificación Aeronavegabilidad y Fomento
Aeronáutico - Fuerza Aérea Colombiana, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de Investigación en Estudios
Aeroespaciales – GIEA

Master in Aeronautical Military Sciences
Aeronautical Promotion and Airworthiness Certification
Specialist - Colombian Air Force, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
Aerospace Studies Research Group - GIEA

Mestrado em Ciências Militares Aeronáuticas
Especialista em Promoção Aeronáutica
e Certificação de Aeronavegabilidade - Força Aérea
Colombiana, Colômbia
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de Investigação em Estudos Aeroespaciais - GIEA

José Alfonso Jiménez Garzón

<https://orcid.org/0000-0001-8827-0790>
jose.jimenezg@fac.mil.co

Mag. en Innovación
Especialista Coordinación Núcleo Ingeniería
Concurrente - Fuerza Aérea Colombiana, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de Investigación en Estudios
Aeroespaciales – GIEA

Master in Innovation
Concurrent Engineering Core Coordination
Specialist - Colombian Air Force, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
Aerospace Studies Research Group - GIEA

Mestrado em Inovação
Especialista em Coordenação do Núcleo de Engenharia
Simultânea - Força Aérea Colombiana, Colômbia
Papel do investigador: teórico e escritor
Grupo de Investigação em Estudos Aeroespaciais - GIEA

Cómo citar este artículo: López Gómez, M., Arias Paredes, M. R. y Jiménez Garzón, J. A. (2025). Extensión de la vida útil para unos sistemas de guiado de bombas GBU-49 de la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 78-88. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.835>



Extensión de la vida útil para unos sistemas de guiado de bombas GBU-49 de la Fuerza Aérea Colombiana

Extension of service life for GBU-49 bomb guidance systems of the Colombian Air Force

Extensão da vida útil para os sistemas de guiagem de bombas GBU-49 da Força Aérea Colombiana

Resumen: En los almacenes de la Fuerza Aérea Colombiana, se almacenan repuestos aeronáuticos y armamento aéreo adquiridos durante momentos críticos del conflicto armado, los cuales están próximos a alcanzar su vida útil. Dadas las políticas de los fabricantes, que incluyen factores de seguridad en el diseño y la determinación de la vida útil, es prioritario estudiar la posible ampliación del tiempo de servicio de este material, siempre y cuando se mantengan los requisitos de seguridad y calidad establecidos por el fabricante.

Este artículo analiza diversas metodologías para evaluar y extender la vida útil de sistemas y materiales militares, centrándose en los documentos AECTP-600, MIL-HDBK-1763, JOTP-001, y otros estudios relevantes. El AECTP-600 de la OTAN) presenta un método de diez pasos que incluye análisis de diseño, gestión de riesgos y pruebas, y optimización de desempeño. El MIL-HDBK-1763 del Departamento de Defensa de Estados Unidos se centra en la compatibilidad y el mantenimiento de cargas útiles en aeronaves, mientras que el JOTP-001 proporciona pautas para evaluar la seguridad y eficacia de municiones no nucleares. Además, se revisan estudios como el de Mark Ashcroft sobre la gestión de la vida útil de municiones, y el análisis de Štefan Pivko y Štefan Timár sobre el impacto de las condiciones de almacenamiento.

La Fuerza Aérea Colombiana aplicó estos principios para extender la vida útil del sistema de guiado GBU-49, documentando el proceso en el Plan de Certificación de Producto Aeronáutico, validado por la Oficina de Certificación Aeronáutica de la Defensa, mediante el cual se realizaron pruebas exhaustivas y análisis estadísticos para proyectar la degradación de los componentes críticos, resultando en una extensión de vida útil de cinco años. Este enfoque garantizó la seguridad y funcionalidad del sistema, demostrando la importancia de una evaluación rigurosa y la gestión de riesgos en la extensión de la vida útil de materiales militares.

Palabras clave: extensión, vida útil, seguridad, AECTP-600, SECAD.

Abstract: In the warehouses of the Colombian Air Force, aeronautical spare parts and aerial weaponry acquired during critical moments of the armed conflict are stored, and they are approaching the end of their service life. Given the manufacturers' policies, which include safety factors in the design and determination of service life, it is a priority to study the possible extension of the service time of this material, provided that the safety and quality requirements established by the manufacturer are maintained.

This article analyzes various methodologies to evaluate and extend the service life of military systems and materials, focusing on documents such as AECTP-600, MIL-HDBK-1763, JOTP-001, and other relevant studies. NATO's AECTP-600 presents a ten-step method that includes design analysis, risk management, testing, and performance optimization. The U.S. Department of Defense's MIL-HDBK-1763 focuses on the compatibility and maintenance of payloads on aircraft, while JOTP-001 provides guidelines for assessing the safety and effectiveness of non-nuclear munitions. Additionally, studies such as Mark Ashcroft's work on ammunition life cycle management and the analysis by Štefan Pivko and Štefan Timár on the impact of storage conditions are reviewed.

The Colombian Air Force applied these principles to extend the service life of the GBU-49 guidance system, documenting the process in the Aeronautical Product Certification Plan, validated by the Defense Aeronautical Certification Office. Through this plan, exhaustive tests and statistical analyses were conducted to project the degradation of critical components, resulting in a five-year service life extension. This approach ensured the safety and functionality of the system, demonstrating the importance of rigorous evaluation and risk management in the extension of military material service life.

Keywords: Extension, shelf-life, safety, AECTP-600, SECAD.

Resumo: Nos armazéns da Força Aérea Colombiana, são armazenadas peças de reposição aeronáuticas e armamentos aéreos adquiridos durante momentos críticos do conflito armado, que estão prestes a atingir o fim de sua vida útil. Dadas as políticas dos fabricantes, que incluem fatores de segurança no projeto e na determinação da vida útil, é prioritário estudar a possível ampliação do tempo de serviço desse material, desde que sejam mantidos os requisitos de segurança e qualidade estabelecidos pelo fabricante.

Este artigo analisa várias metodologias para avaliar e estender a vida útil de sistemas e materiais militares, concentrando-se nos documentos AECTP-600, MIL-HDBK-1763, JOTP-001 e outros estudos relevantes. O AECTP-600 da OTAN apresenta um método de dez passos que inclui análise de projeto, gestão de riscos, testes e otimização de desempenho. O MIL-HDBK-1763 do Departamento de Defesa dos Estados Unidos foca na compatibilidade e manutenção de cargas úteis em aeronaves, enquanto o JOTP-001 fornece diretrizes para avaliar a segurança e eficácia de munições não nucleares. Além disso, são revisados estudos como o de Mark Ashcroft sobre a gestão do ciclo de vida de munições, e a análise de Štefan Pivko e Štefan Timár sobre o impacto das condições de armazenamento.

A Força Aérea Colombiana aplicou esses princípios para estender a vida útil do sistema de guiagem GBU-49, documentando o processo no Plano de Certificação de Produto Aeronáutico, validado pelo Escritório de Certificação Aeronáutica de Defesa, por meio do qual foram realizados testes exaustivos e análises estatísticas para projetar a degradação dos componentes críticos, resultando em uma extensão de vida útil de cinco anos. Essa abordagem garantiu a segurança e funcionalidade do sistema, demonstrando a importância de uma avaliação rigorosa e da gestão de riscos na extensão da vida útil de materiais militares.

Palavras-chave: Extensão, vida de estoque, segurança, AECTP-600, SECAD.

Introducción

El estudio de la extensión de la vida útil de los sistemas de defensa es crucial para optimizar los recursos y garantizar la seguridad y efectividad de los materiales utilizados. Con el objetivo de analizar los posibles riesgos y explorar la viabilidad de extender la vida útil de estos sistemas, se investigaron diversas metodologías y ejemplos aplicables que respaldan esta investigación.

Uno de los documentos fundamentales en este análisis es el AECTP-600 de la Organización de Tratados del Atlántico Norte (OTAN), el cual proporciona un marco estructurado para evaluar la capacidad del material para cumplir con los requisitos de extensión de vida útil. Este documento incluye principios de ingeniería esenciales para revisar el diseño, gestionar riesgos, realizar pruebas exhaustivas, optimizar el desempeño, incorporar innovaciones tecnológicas y mantener una documentación detallada del proceso.

Además, se consideraron otras guías y estándares importantes como el MIL-HDBK-1763 del Departamento de Defensa de Estados Unidos, que aborda los requisitos de ingeniería de sistemas de compatibilidad de cargas útiles y procedimientos de prueba. También, se tuvo en cuenta el JOTP-001, que proporciona pautas para evaluar la seguridad y la idoneidad de municiones no nucleares.

El análisis se complementa con estudios adicionales, como el marco de gestión de vida útil de municiones propuesto por Mark Ashcroft y el impacto de las condiciones de almacenamiento en la viabilidad de las municiones descrito por Štefan Pivko y Štefan Timár. Estas revisiones ofrecen una visión integral de los factores que afectan la vida útil de los sistemas de defensa y las metodologías para su evaluación.

En el contexto de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), se estudió específicamente el sistema de guiado GBU-49, utilizado en las bombas MK-82, que había cumplido su tiempo de vida establecido. La necesidad de extender la vida útil de estos sistemas llevó a desarrollar un plan de certificación basado en la experiencia del personal técnico y el conocimiento de los

ingenieros, siguiendo la guía de la Oficina de Certificación Aeronáutica de la Defensa.

El presente artículo detalla el proceso de planificación, ejecución y documentación de las pruebas realizadas para evaluar la capacidad del sistema GBU-49 para cumplir con los requisitos de vida extendida. Este enfoque permitió identificar los componentes críticos, realizar análisis con herramientas estadísticas y emitir un reporte de validación que sustenta técnicamente la extensión de vida útil del sistema.

Marco teórico

Para analizar los posibles riesgos y estudiar la posibilidad de extender la vida útil, además de comprender los componentes del sistema, se estudiaron varias metodologías y ejemplos de aplicación que permitieron dar sustento a la investigación.

AECTP-600

La Agencia de Seguridad Nacional de la OTAN desclasificó el documento AECTP-600 (segunda edición), el cual describió un método para evaluar la capacidad del material estudiado para cumplir con los requisitos de extensión de vida útil. En esa medida, el documento aplicó varios principios de ingeniería que permiten evaluar las implicaciones de esta extensión, a saber:

1. Análisis de diseño: Revisar detalladamente la concepción del material y así identificar posibles puntos débiles y áreas de mejora.
2. Gestión de riesgos: Identificar posibles escenarios de fallo y tomar medidas preventivas.
3. Pruebas y evaluaciones: Aplicar ensayos exhaustivos para garantizar que el material cumpla con los requisitos durante todo el tiempo de extensión.
4. Optimización de desempeño: Buscar maneras de mejorar el desempeño del material para cumplir con los nuevos requisitos y desafíos de la operación.

5. Innovación tecnológica: Considerar nuevas tecnologías y enfoques para mejorar el almacenamiento, la vida útil y la funcionalidad del material.
6. Documentación y seguimiento: Mantener registros detallados de todo el proceso de evaluación y cambios realizados al material.

En efecto, se podría argüir que esta metodología es una herramienta de gestión que aborda sistemáticamente los problemas por resolver, pues proporciona un marco estructurado que permite evaluar y garantizar que el material cumpla con los requisitos de vida extendida y los cambios en su rol y despliegue. Estas son las posibles modificaciones en la función o el uso previsto de dicho material, así como en los escenarios o entornos en los que se desplegará, las cuales fácilmente se aplican a todos los productos militares. Asimismo, podrían adaptarse a otros productos o sistemas en diferentes contextos mediante la ingeniería inversa.

A continuación, se exponen los diez pasos propuestos en el documento:

1. Investigación del Perfil Medioambiental del Ciclo de Vida.
2. Recopilación de datos sobre la historia en servicio del material.
3. Preparación de un Perfil Medioambiental del Ciclo de Vida extendido para cubrir los requisitos de vida extendida y/o cambio de rol.
4. Comparación de las descripciones ambientales planificadas originalmente con las encontradas en servicio y las necesarias para cumplir con los requisitos de vida extendida.
5. Evaluación de la capacidad del material para soportar las tensiones ambientales esperadas durante la vida extendida requerida.
6. Identificación de los modos de fallo potenciales relevantes para el material.
7. Evaluación de la capacidad del material para cumplir con los requisitos de vida extendida en función de los modos de fallo identificados.
8. Desarrollo de un plan de pruebas y análisis para verificar la capacidad del material de cumplir con los requisitos de vida extendida.

9. Ejecución de las pruebas y los análisis planificados.
10. Evaluación de los resultados de las pruebas y los análisis para determinar si el material cumple con los requisitos de vida extendida y si es aceptable para continuar su uso.

Adicional a esta metodología, el documento incluyó cuatro anexos. En ese orden de ideas, el Anexo A expuso un ejemplo específico de cómo aplicar el método de diez pasos para abordar el complejo proceso de reducir el número de posibles modos de falla a un mínimo necesario, con el fin de cumplir con los criterios de extensión de vida. Para esto, se eligió un arma guiada transportada por aire como ejemplo para ilustrar el proceso de aumento en el número de horas de transporte de vuelo. En tal caso, la “integridad estructural” es el aspecto principal a considerar en esta demostración, junto a las categorías de seguridad y rendimiento.

Por su parte, el Anexo D proporciona la orientación adicional para el profesional de ingeniería al abordar los problemas técnicos detallados del método de diez pasos. Este anexo incorporó una serie de folletos (*leaflets*) que ofrecen directrices específicas sobre diversos aspectos relacionados con la evaluación de la capacidad de los materiales militares para cumplir con los requisitos de vida extendida:

1. *Leaflet 601 - Reverse Engineering*: Suministra directrices sobre el proceso de ingeniería inversa, que implica desmontar y analizar un producto existente para comprender su funcionamiento y diseño.
2. *Leaflet 602 - Time Compression*: Ofrece pautas para acelerar el proceso de desarrollo de productos o sistemas, al reducir los plazos de tiempo para cumplir con los requisitos de entrega.
3. *Leaflet 603 - Incremental Acquisition*: Describe estrategias para adquirir capacidades de manera incremental, lo cual permite la entrega de funcionalidades en etapas sucesivas.
4. *Leaflet 604 - Physics of Failure*: Se centra en comprender los mecanismos físicos que pueden llevar a la falla de un sistema, lo cual ayuda a mejorar el diseño y la fiabilidad.

5. *Leaflet 605 - Information Requirements for Life Cycle Environmental Profile (Steps 1 to 3)*: Detalla los requisitos de información necesarios para llevar a cabo los pasos 1 a 3 del método de diez pasos.
6. *Leaflet 606 - Probabilistic Analysis*: Suministra las directrices para realizar análisis probabilísticos, al considerar las variaciones estadísticas en los efectos de las condiciones ambientales y las tolerancias de diseño y fabricación.
7. *Leaflet 607 - Material Role and Deployment Changes*: Ofrece medidas previas para adaptar el método señalado a los cambios en el rol o escenarios de despliegue del material; de esta manera, se evitan posibles fallas predecibles.

MIL-HDBK-1763

Otro documento guía es el MIL-HDBK-1763, del Departamento de Defensa de Estados Unidos, que trata sobre los requisitos de ingeniería de sistemas de compatibilidad de cargas útiles y procedimientos de prueba. Este texto incluyó información sobre pruebas de certificación, preparación de pruebas, procedimientos de prueba en tierra y en vuelo, así como paquetes de datos de ingeniería de compatibilidad con la aeronave. Estos conjuntos de datos primarios los utiliza la Fuerza Aérea de Estados Unidos para garantizar que las cargas útiles sean compatibles física, mecánica, electromagnética, ambiental, estructural y aerodinámicamente con los sistemas de las aeronaves.

Por otro lado, para extender la vida útil de las aeronaves y sus sistemas, y mantener su capacidad operativa a lo largo del tiempo, el documento considera varios puntos importantes en los siguientes temas:

1. **Mantenimiento adecuado**: Realizar un mantenimiento regular de la aeronave y sus sistemas es fundamental para garantizar su buen funcionamiento.
2. **Actualizaciones y mejoras**: Mantener la aeronave al día con los nuevos avances tecnológicos y los requisitos operativos cambiantes.
3. **Monitoreo de la fatiga estructural**: Realizar un seguimiento y llevar a cabo inspecciones periódicas

para detectar posibles problemas antes de que se conviertan en fallas.

4. **Gestión de la obsolescencia**: Planear y monitorear las partes con el objetivo de garantizar que se puedan obtener repuestos y soporte a lo largo de la vida útil del equipo.
5. **Cumplimiento de los requisitos ambientales**: Asegurarse de que el sistema cumple con los requisitos de temperaturas extremas, humedad, presión atmosférica y compatibilidad electromagnética para evitar daños por condiciones ambientales adversas.
6. **Evaluación de la compatibilidad con las cargas útiles**: Realizar evaluaciones periódicas del funcionamiento eficiente y la correcta integración entre la aeronave y sus cargas útiles.

JOTP-001

Durante el estudio, se encontró aplicación a través del documento *Allied ammunition safety and suitability for service assessment testing*, debido a que proporcionó pautas y procedimientos que permiten evaluar la seguridad y la idoneidad para el servicio de municiones no nucleares. En ese sentido, el documento estableció los estándares y requisitos para realizar pruebas de evaluación de seguridad en una variedad de municiones, incluidas aquellas lanzadas desde el hombro, lanzadas desde la superficie, lanzadas desde el aire, lanzadas bajo y sobre el agua, de gran calibre, de pequeño calibre, de las fuerzas terrestres, municiones no almacenadas en aeronaves, auxiliares transportadas por barcos y auxiliares de las fuerzas terrestres, entre otras.

De acuerdo con lo expuesto, se determinó que estas pruebas y evaluaciones son fundamentales para garantizar que las municiones utilizadas por las fuerzas armadas sean seguras, confiables y efectivas en el campo de batalla. En tal medida, el documento suministró los procedimientos detallados que deben seguir los evaluadores para llevar a cabo estas pruebas de manera rigurosa y precisa, con el objetivo de garantizar la seguridad y la eficacia de las municiones en diversas situaciones operativas.

En cuanto a las pruebas realizadas a las municiones lanzadas desde el aire, se incluyeron varias evaluaciones para garantizar su seguridad e idoneidad para el servicio, las cuales se describen a continuación:

1. Pruebas de resistencia ambiental: Evalúan cómo las municiones responden a diferentes condiciones ambientales como temperatura, humedad, vibración y presión. De esta manera, se garantiza que puedan funcionar de modo confiable en diversos entornos.
2. Pruebas de vulnerabilidad a interferencias electromagnéticas (Electromagnetic Environmental Effects - E3): Valoran la capacidad de las municiones para resistir y funcionar correctamente en presencia de campos electromagnéticos, como los generados por sistemas de radar u otras fuentes de energía.
3. Pruebas de vulnerabilidad a impactos mecánicos: Evalúan la resistencia de las municiones a impactos mecánicos, como golpes o caídas, para certificar que no se activen accidentalmente durante el almacenamiento, manejo o transporte.
4. Pruebas de rendimiento: Evalúan la capacidad de las municiones para cumplir con sus funciones previstas, como la precisión, la velocidad y la efectividad en el impacto.

“A traditional approach to munition life management” (Ashcroft, 2022)

Ashcroft describió un marco de cinco fases para administrar la vida útil de las municiones. Al respecto, el autor comenzó con la fase 1, que analiza los aspectos de diseño y los factores ambientales que afectan el ciclo de vida de una munición. Después, la fase 2 profundiza en los mecanismos que causan el deterioro de las municiones con el tiempo. Acto seguido, la fase 3 explora métodos para evaluar el estado de una munición. Por último, las fases 4 y 5 cubren las pruebas y evaluaciones de vida útil, las cuales ponen en práctica estos métodos para determinar la vida útil restante de una munición. Al seguir este enfoque estructurado,

se puede garantizar la seguridad y confiabilidad de las municiones a lo largo de su ciclo de vida.

“Effect of storage conditions on the viability of ammunition” (Pivko y Timár, 2014)

Este artículo explicó cómo, a lo largo de su ciclo de vida, la munición se ve afectada por las condiciones climáticas y por el entorno creado por su uso operacional. En consecuencia, su seguridad y funcionalidad pueden verse limitadas por un nivel inaceptable de degradación de componentes y materiales, lo cual posteriormente deriva en una falla crítica. Como resultado, esta falla se convierte en un factor limitante de su vida útil. Por lo tanto, la identificación de estos procesos permite realizar predicciones y evaluaciones apropiadas acerca del periodo de vida útil de la munición.

A su vez, las municiones están compuestas por una amplia variedad de materiales, incluyendo principalmente materiales energéticos (propelentes, explosivos), metales, plásticos, cauchos, pegamentos y materiales compuestos. Asimismo, el empaque es crucial, debido a que debe brindar protección contra el manejo brusco, las condiciones ambientales y la influencia de factores mecánicos y climáticos durante todo su ciclo de vida, incluida la etapa de almacenamiento inicial. Infortunadamente, los materiales utilizados en la fabricación de municiones suelen deteriorarse de diversas formas. Al respecto, se encuentra que este deterioro puede ser inmediato, progresivo, reversible o irreversible. Finalmente, las fallas de las municiones se pueden clasificar en tres categorías principales: térmicas (químicas), mecánicas y termomecánicas.

- Fallas térmicas (químicas): Se producen por cambios químicos en las sustancias que componen la munición, como la descomposición de propelentes, la degradación por la radiación solar de materiales orgánicos sintéticos y naturales (como caucho y plásticos), y el cambio en la velocidad de las reacciones químicas por la temperatura y humedad del aire. Sobre esto, la ecuación de Arrhenius se utiliza para calcular el factor de

aceleración de la reacción y predecir la vida útil de la munición en función de la temperatura. Ahora bien, es importante señalar que la temperatura de almacenamiento no tiene un efecto significativo en las fallas químicas, excepto en la cristalización de sustancias amorfas como el caucho.

- Fallas mecánicas: Se producen por esfuerzos físicos que superan la resistencia de los materiales de la munición. Una de estas es la fatiga del material, por lo que aparecen grietas debido a las cargas cíclicas repetidas; otra es la rotura por sobrecarga, que sucede cuando la carga aplicada excede la resistencia del material. Aunado a esto, la fricción entre componentes también puede provocar fallas mecánicas al generar calor e incluso la ignición del material. Finalmente, se determinó que el método de Miner permite predecir la vida útil en condiciones de carga variable.
- Fallas termomecánicas: Se producen por la combinación de esfuerzos térmicos y mecánicos en los materiales. En ese sentido, la diferencia en la expansión térmica de materiales con distintas propiedades puede generar tensiones que causen grietas en la carga explosiva o defectos en los sellados. Para minimizar las fallas termomecánicas, se recomienda utilizar materiales con coeficientes de expansión térmica similares y alta conductividad térmica. Por consiguiente, probar la munición a temperaturas extremas puede acelerar la identificación de fallas, pero no siempre refleja las condiciones reales de uso.

Resultados

Para el desarrollo iniciado en la FAC, se tomó como base los componentes del sistema de guiado GBU-49, los cuales funcionan mediante una designación definida por la compañía fabricante Raytheon como DMGB (Dual Mode Guided Bomb), que detecta un objetivo a través del método de designación con láser. A esto se añade la orientación emitida por unas coordenadas

dirigidas por GPS/IMU como método secundario, la cual puede ser en conjunto (LASER + GPS/IMU) o de restricción a un solo método, de acuerdo con lo predeterminado por el operador en la planeación del vuelo.

Si las condiciones adversas impiden la detección del láser, el sistema GPS/IMU se convierte en el sistema de guía principal. Actualmente, la FAC cuenta con varias unidades de este sistema aplicable a las bombas MK-82, que cumplieron su tiempo de vida establecido en diez años, por lo cual su personal idóneo solicitó al fabricante una extensión, quien emitió una cotización por un valor muy cercano al costo de adquisición de una unidad nueva. Esto obligó al personal de la Subdirección de Armamento Aéreo a buscar alternativas mediante el uso de la experiencia del personal técnico y el conocimiento de los ingenieros, hasta que bajo la dirección de la Oficina de Certificación Aeronáutica de la Defensa se establecieron varios documentos que permitieron cumplir el objetivo con seguridad y calidad.



Figura 1. Kit de guiado GBU-49 para bomba MK-82

Plan de certificación de producto aeronáutico

En el documento Plan de Certificación de Producto Aeronáutico, se plasmó toda la trazabilidad de las gestiones adelantadas, la justificación de la necesidad y el listado de requisitos de diseño que se debían validar a través de ensayos de diferentes tipos. De igual modo, se generó una Matriz de Requisitos de Certificación, que consiste en el listado de especificaciones técnicas que cumplir, junto con el documento o la normativa que lo propone, así como el Medio Aceptable de Cumplimiento, el cual permitirá validar su aceptación. Asimismo, durante todo el proceso se fue construyendo el

Análisis de Seguridad del Sistema; esto es, un plan de gestión del riesgo basado en la MIL-STD-882E Standard Practice System Safety, en el que se define un enfoque de ingeniería de sistemas para la identificación, clasificación y mitigación de riesgos en los sistemas de defensa a lo largo de su ciclo de vida.

En este artículo, se quiso ahondar en el proceso descrito en el Plan de Certificación de Producto Aeronáutico, en el que se estudió la posible extensión de los guiados GBU-49 al abordar aspectos como la planificación, ejecución y documentación de las pruebas. A lo largo del documento, se detallaron diferentes etapas y procedimientos sustentados en los pasos del AECTP-600, con el fin de evaluar la capacidad del elemento para cumplir con requisitos específicos.

En primer lugar, el documento estableció el objetivo de las pruebas de extensión de los guiados GBU-49, lo cual se relaciona con el primer paso del AECTP-600: la definición de los requisitos de vida extendida y los cambios en su rol y despliegue. En este caso, se buscó evaluar la capacidad de los sistemas de bombas guiadas para mantener un *stock* estratégico y un alistamiento óptimo, lo cual implica considerar aspectos de soporte técnico y operativo a lo largo de la vida útil del equipo.

En ese sentido, el proceso de planificación de las pruebas, la identificación de los elementos por evaluar, el establecimiento de criterios de evaluación y la recopilación de datos dan cumplimiento a los pasos 2, 3 y 4 del AECTP-600, debido a que describen la documentación necesaria para llevar a cabo los ensayos de manera efectiva.

Por otro lado, la realización de las pruebas en diferentes condiciones, tanto en tierra como en vuelo, así como la medición de parámetros específicos de los equipos relacionados con los pasos 5 y 6 del AECTP-600, implican el análisis de los datos recopilados y la identificación de deficiencias en el equipo. Al respecto, en el Plan de Certificación de Producto Aeronáutico se detallan los resultados de los ensayos, las conclusiones obtenidas y las limitaciones necesarias para garantizar el cumplimiento de los requisitos establecidos.

De igual manera, el Plan de Certificación de Producto Aeronáutico también se refiere a la instrumentación y a los equipos necesarios para realizar las pruebas, así como a las autorizaciones requeridas para realizarlas, lo cual se vincula con los pasos 7, 8 y 9 del AECTP-600 que suponen el desarrollo de planes de acción correctiva, implementar dichas acciones y verificar su efectividad.

	PLAN DE ENSAYOS PRUEBAS EXTENSION GUIADOS GBU-40	Código: V-107.EXT
		Versión: Rev. 01
		Fecha de edición: 15/02/2024

	Cracks in detector housing	Major	Reject. Mark condition code F. Repackage and send to depot for over
	Loose, damaged, or missing parts (nuts, bolts, screws, clamps)	Major	Ensure CPU-123 and detector are properly mated and torqued.
Control	Expended thermal battery or gas generator	Major	Reject. Mark condition code F, repackage, and send to depot.
Test Connector Cover	Missing or loose	Major	If loose, torque screws to 6 +3 in-lbs. If missing, replace.
Pneumatic Plug	Missing or loose	Major	If loose, torque plug to 30-35 in-lbs. If missing, replace. NOTE AFGs that are removed from container for any length of time (example, for buildup storage) will have DOM marked (with felt marker or grease pencil) on individual assemblies. This marking will be applied below original markings and used for future shipping, repack, and inspection requirements

Figura 2. Extracto del listado de subcomponentes, modos de falla y punto de control
Fuente: elaboración propia.



Figura 3. Ejemplo de las pruebas de campo realizadas

Fuente: elaboración propia.

Recolección de los datos

Se podría decir que el éxito del Plan de Certificación de Producto Aeronáutico se basa en que es un documento dinámico que va ajustando sus análisis según los riesgos identificados en el Análisis de Seguridad del Sistema y los mitiga con nuevos requisitos en las pruebas de validación. En esto radica la importancia de conocer en detalle cada uno de los componentes del material. De tal manera, es posible identificar las partes de mayor criticidad y que pueden causar fallas en el funcionamiento del sistema. En este caso en particular, los modos de falla identificados se mitigan con la inspección, el mantenimiento de las piezas móviles y las verificaciones periódicas a través del equipo de soporte en tierra, aunado con el adecuado almacenamiento y preservación de todos sus componentes.

Para ser más concretos, en la evaluación realizada por el personal involucrado en el proceso se determinó que los componentes críticos identificados en el sistema GBU-49 consistieron en la batería laser, la batería GAINS (GPS Aided Inertial Navigation System) y la botella de nitrógeno. Para el caso particular de cada elemento, fue necesario diseñar una serie de pruebas para determinar que, después de superar el tiempo de almacenamiento, estos conservan las propiedades necesarias para continuar funcionando de forma segura y sin arriesgar el comportamiento del sistema.

En el caso de las baterías la prueba, se establecieron unos criterios de aceptación y rechazo para los voltajes generados, en concordancia con lo establecido en sus datos maestros y con el valor que tenían

entre uno, cinco y diez minutos después de su activación. Esta prueba se efectuó sobre los elementos de los lotes que recién habían cumplido los diez años de almacenamiento inicial; igualmente, se repitió en elementos de los lotes que tenían 21 y 28 meses de almacenamiento posteriores al vencimiento. A partir de lo anterior, se proyectó el decaimiento de estas baterías usando la ecuación de regresión lineal.

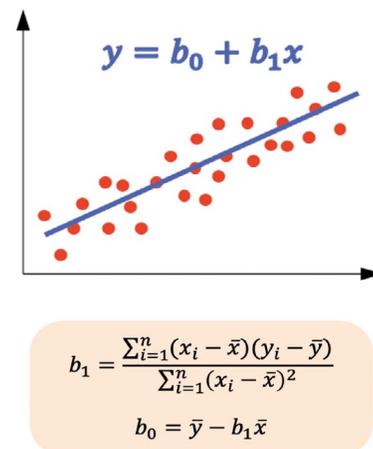


Figura 4. Regresión lineal simple para proyección de datos

Fuente: elaboración propia.

Análisis con herramientas estadísticas

En las gráficas, se identificó que todas las variables de presión y voltaje tenían un comportamiento estable con un amplio margen de seguridad, con excepción del pin de -17 Vdc, cuyo valor se acercaba al criterio de rechazo de -17,5 Vdc, como se ve en la Figura 5.

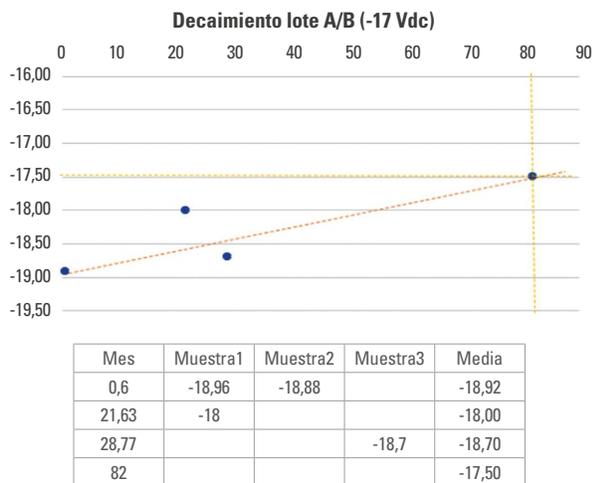


Figura 5. Datos recogidos de las muestras en el pin -17 Vdc
Fuente: elaboración propia.

Después de tabular los meses de almacenamiento vs. el valor medio de voltaje, se obtuvieron los puntos de la gráfica. En la última fila, se colocó la fórmula de MS Excel (1), en la cual se relacionan los valores de los ejes X y Y conocidos; finalmente, se puso el valor X que se desea proyectar en Y.

$$\text{PRONÓSTICO LINEAL (valor X proyectado; Valores Y conocidos; valores X conocidos)} \quad (1)$$

En este caso, el límite de -17,50 se alcanza en el mes número 82. Es decir, para los datos recolectados, se podría otorgar una extensión al tiempo de vida de 82 meses posteriores a los diez años de almacenamiento inicial, esto es, alrededor de siete años. Sin embargo, con el fin de dejar un margen de seguridad suficiente, se terminaron otorgando cinco años, al tiempo que se siguen haciendo mediciones sobre algunos elementos para alimentar los puntos de la gráfica de decaimiento.

Conclusiones

Este proceso documentado y soportado en varias metodologías permitió a la Oficina de Certificación Aeronáutica de la Defensa emitir un Reporte de Validación de Ensayos GA-JELOG-FR-281, en el cual se relacionaron

todas las evidencias agrupadas en MAC 4 - Ensayos de Laboratorio, MAC 5 - Ensayos en Tierra, MAC 6 - Inspección Física del Diseño y MAC 9 - Ensayos en Vuelo, que para este caso constituyeron el soporte técnico de dicha investigación.

Por otra parte, el análisis de riesgos apoyado en la experiencia del personal técnico del Escuadrón de Armamento Aéreo del CACOM-1, con el acompañamiento de la Subdirección de Armamento, permitió analizar las posibles situaciones que se pudieran presentar. De igual modo, se mitigaron los riesgos mediante acciones preventivas a todos los componentes con el control y la supervisión de los estándares descritos en las diferentes documentaciones técnicas de la casa fabricante y las tareas frecuentes plasmadas en el Plan de Certificación de Producto Aeronáutico.

Simultáneamente, los resultados obtenidos en los ensayos practicados a las muestras proporcionaron un adecuado sustento al comportamiento observado en la realidad. Aunado a esto, se determinó que mediante un análisis estadístico es posible predecir una respuesta favorable dentro del tiempo de extensión propuesto, cuando sus evidencias y soportes así lo permiten.

Finalmente, el Grupo Técnico de la Unidad solicitante realizó una junta técnica extraordinaria con base en la reglamentación vigente de la institución y amparados en los manuales de funcionamiento técnico y a la luz de la evidencia documentada. En suma, se otorgó la extensión de vida útil al respetar las condiciones y limitaciones del informe. De tal modo, se retornará el material al servicio y se ganará más tiempo para realizar las gestiones de adquisición y reemplazo necesarias.

Reconocimientos

Es importante reconocer la labor de todas las personas que, desde el año 2022, vienen trabajando en este proyecto; desde los diferentes investigadores que por alguna razón se asignaron a otras destinaciones y no alcanzaron a ver materializado su esfuerzo, hasta el personal técnico, cuya iniciativa y pericia orientó la labor de los comandantes. Gracias por su trabajo.

Referencias

- Ashcroft, M. (2022). A traditional approach to munition life management. *Energetics science and technology: An integrated approach* (A. S. Cumming, ed.; pp. 9-22). IOP Publishing.
- Department of Defense. (1998). *MIL-HDBK-1763, Department of Defense Handbook. Aircraft/stores compatibility: Systems engineering data requirements and test procedures. EverySpec Standards* [en línea]. http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-1500-1799/MIL_HDBK_1763_1775/
- Pivko, Š. y Timár, Š. (2014). Effect of Storage Conditions on the Viability of Ammunition, *University Review*, 8(3-4), 29-33. https://ur.tnuni.sk/fileadmin/dokumenty/UR_V8_ISS3-4_29to33.pdf

Artificial Intelligence in the Aviation Operations: A State of the Art

| Fecha de recibido: 20 de mayo de 2024 | Fecha de aprobado: 25 de julio de 2024 |

| Reception date: May 20, 2024 | Approval date: July 25, 2024 |

| Data de recebimento: 20 de maio de 2024 | Data de aprovação: 25 de julho de 2024 |

Cristian Lozano Tafur

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

Mag. en Ingeniería
Investigador - Centro de Educación Militar
Escuela de Aviación del Ejército, Colombia
Rol de investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación en aviación militar

Master in Engineering
Researcher - Centro de Educación Militar
Escuela de Aviación del Ejército, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
Military Aviation Research Group

Mestrado em Engenharia
Investigador - Centro de Educación Militar
Escuela de Aviación del Ejército, Colombia
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de Investigaçao em Aviação Militar

Jaime Enrique Orduy Rodríguez

<https://orcid.org/0000-0003-1818-0639>
jaimeorduyrodriguez@cedoc.edu.co

Mag. en Ingeniería y Gestión de Sistemas
Investigador - Centro de Educación Militar Escuela
de Aviación del Ejército, Colombia
Rol de investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación en aviación militar

Master in Systems Engineering and Management
Researcher - Centro de Educación Militar Escuela
de Aviación del Ejército, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
Military Aviation Research Group

Mestrado em Engenharia e Gestão de Sistemas
Investigador - Centro de Educación Militar Escuela
de Aviación del Ejército, Colombia
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de Investigaçao em Aviação Militar

Didier Aldana Rodríguez

<https://orcid.org/0000-0002-6483-9580>
didieraldanarodriguez@cedoc.edu.co

Mag. en Ingeniería
Investigador - Centro de Educación Militar
Escuela de Aviación del Ejército, Colombia
Rol de investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación en aviación militar

Master in Engineering
Researcher - Centro de Educación Militar
Escuela de Aviación del Ejército, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
Military Aviation Research Group

Mestrado em Engenharia
Investigador - Centro de Educación Militar
Escuela de Aviación del Ejército, Colombia
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de Investigaçao em Aviação Militar

David Reinoso Pintor

<https://orcid.org/0000-0002-4973-6874>
davidreinosopintor@cedoc.edu.co

Ingeniero Aeronáutico
Escuela de Aviación del Ejército, Colombia
Rol de investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación en aviación militar

Aeronautical Engineer
Escuela de Aviación del Ejército, Colombia.
Researcher's role: theoretical and writing
Military Aviation Research Group

Engenheiro Aeronáutico
Escuela de Aviación del Ejército, Colombia
Papel de investigador: teórico e escrito
Grupo de Investigaçao em Aviação Militar

Cómo citar este artículo: Lozano Tafur, C., Orduy Rodríguez, J. E., Aldana Rodríguez, D. y Reinoso Pintor, D. (2025). Artificial Intelligence in the Aviation Operations: A State of the Art. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 89-103. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderareo.788>



Artificial Intelligence in the Aviation Operations: A State of the Art

Abstract: In recent years, the use of artificial intelligence (AI) has grown significantly, largely driven by the expansion of Industry 4.0 and the increasing generation of data across various sectors. The aviation industry has been no exception to this technological advancement, with numerous studies exploring AI applications in this field. This study aims to provide a comprehensive and up-to-date analysis of AI usage in air operations, with a particular focus on flight planning, trajectory prediction, and resource optimization. Through this analysis, we seek to delve into the latest advancements and methodologies employed in the industry, identifying key algorithms and techniques used. Additionally, the study offers an integrated view of AI applications in aviation, highlighting its potential to enhance operational efficiency, safety, and decision-making. Finally, we aim to identify the most promising areas for research and development to support ongoing innovation in this ever-evolving field.

Keywords: Aviation; artificial intelligence; machine learning; trajectories.

Inteligencia artificial en las operaciones aéreas: un estado del arte

Resumen: En los últimos años, el uso de la inteligencia artificial (IA) ha crecido significativamente, impulsado en gran medida por la expansión de la Industria 4.0 y la creciente generación de datos en diversos sectores. La industria aeronáutica no ha sido la excepción en este avance tecnológico, y numerosos estudios han explorado las aplicaciones de la IA en este campo. Este estudio tiene como objetivo ofrecer un análisis exhaustivo y actualizado sobre el uso de la IA en las operaciones aéreas, con un enfoque particular en la planificación de vuelos, la predicción de trayectorias y la optimización de recursos. A través de este análisis, buscamos profundizar en los últimos avances y metodologías empleadas en el sector, identificando los principales algoritmos y técnicas utilizados. Además, el estudio proporciona una visión integral de las aplicaciones de la IA en la aviación, destacando su potencial para mejorar la eficiencia operativa, la seguridad y la toma de decisiones. Finalmente, esperamos identificar las áreas de investigación y desarrollo más prometedoras para contribuir al progreso e innovación en este campo en constante evolución.

Palabras clave: aviación; inteligencia artificial; *machine learning*; trayectorias.

Inteligência artificial nas operações de aviação: Um estado da arte

Resumo: Nos últimos anos, o uso da inteligência artificial (IA) cresceu significativamente, impulsionado em grande parte pela expansão da Indústria 4.0 e pela crescente geração de dados em diversos setores. A indústria aeronáutica não foi exceção a esse avanço tecnológico, e inúmeros estudos exploraram as aplicações da IA nesse campo. Este estudo tem como objetivo oferecer uma análise abrangente e atualizada sobre o uso da IA nas operações aéreas, com um foco especial no planejamento de voos, na previsão de trajetórias e na otimização de recursos. Através desta análise, buscamos aprofundar nos avanços mais recentes e nas metodologias utilizadas no setor, identificando os principais algoritmos e técnicas empregados. Além disso, o estudo oferece uma visão integrada das aplicações de IA na aviação, destacando seu potencial para melhorar a eficiência operacional, a segurança e a tomada de decisões. Finalmente, esperamos identificar as áreas de pesquisa e desenvolvimento mais promissoras para contribuir com o progresso e a inovação neste campo em constante evolução.

Palavras-chave: Aviação; inteligência artificial; aprendizado de máquina; trajetórias

Introduction

Air transportation is currently experiencing significant growth, resulting in increased fuel consumption, environmental pollution, service times, maintenance, consumables, and crew requirements, leading to higher operational costs (Calvo-Fernández, 2017; Gössling & Humpe, 2020). Furthermore, this continuous growth has necessitated the improvement of air traffic control systems to prevent delays and enhance safety (Medeiros *et al.*, 2012).

Proposed solutions include the application of Area Navigation (RNAV) techniques, a navigation method that allows aircraft to operate on any desired flight route within the coverage of navigation aids or within the limits of autonomous aids, or a combination of both. This method has been enhanced with the introduction of Required Navigation Performance (RNP), which focuses on onboard aircraft performance monitoring and alerting (Medeiros *et al.*, 2012). These methodologies have enabled the operation of more aircraft in the same airspace and improved safety, although they are not specifically focused on optimization, which is of interest to operators.

An efficient flight plan is one of the most critical factors in air operations, as it ensures safe operations, boosts crew confidence, and significantly saves fuel. However, fuel calculation is not a linear process and depends on various factors, making it challenging to predict accurately (Spencer, 2011).

Air operators employ software to plan flights, taking into account various operational aspects. However, the outcomes of this planning are not always optimal due to unexpected airspace congestion or meteorological conditions, as dispatchers rely on updated publications from the aviation authority.

The current surge in data generation enables the utilization of algorithms that transform this data into valuable information. Research efforts have allowed airlines to leverage artificial intelligence systems to develop machine learning algorithms that collect and analyze data for predicting delays, weather conditions, performance, flight plans, and fuel consumption. Some

companies employ software developed by Airspace Intelligence, FlightAware, among others.

Artificial intelligence is often evaluated in relation to human intelligence through various tests, and its definition can shift based on perspective, framed either in terms of mental processes or observable behaviors. In the book *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (Russell & Norving, 2009), is described from four distinct perspectives, as illustrated in Table 1. These perspectives are split between the goals of thinking or acting like humans and those of thinking or acting rationally. The former aims to replicate human cognition and behavior, while the latter focuses on logic and optimization without mirroring humans. This latter approach is frequently more suitable for practical tasks requiring efficiency and precision.

Table 1.
Some definitions of artificial intelligence

Systems that think like humans	<p>“The new and exciting endeavor for making computers think... machines with minds, in the broadest sense of the word.” (Haugeland, 1985)</p> <p>“[The automation of] activities that we associate with human thought processes, activities such as decision-making, problem-solving, learning...” (Bellman, 1978)</p>
Systems that think rationally	<p>“The art of developing machines with the capability to perform functions that, when performed by humans, require intelligence.” (Kurzweil, 1990)</p> <p>“The study of how to make computers perform tasks that, at the moment, humans do better.” (Rich & Knight, 1991)</p>
Systems that act like humans	<p>“The study of mental faculties by the use of computational models. (Charniak & McDermott, 1985)</p> <p>“The study of the computations that make it possible to perceive, reason, and act.” (Winston, 1992)</p>
Systems that act rationally	<p>“Computational Intelligence is the study of designing intelligent agents.” (Poole et al., 1998)</p> <p>“AI... is concerned with intelligent behavior in artifacts.” (Nilsson, 1998)</p>

Source: Russell & Norving (2009).

Artificial intelligence has been developed since the 1940s by Donald Hebb, and its growth and application have been evident since the 1990s. Researchers

have focused their interest on the development of more general intelligences, resulting in subfields of artificial intelligence such as speech and image recognition, neural networks, robotics, machine learning, among others (McCorduck & Cfe, 2004). Currently, artificial intelligence has taken on an important role due to the high volume of data generated in different industries. Algorithms are becoming more sophisticated, faster, and capable of handling increasingly extensive and heterogeneous databases (Robert, 2014). Furthermore, with the improvement in computational power, the era of big data has emerged. This era is characterized by the 3 V's: volume, velocity, and variety. A large volume of data is stored, which comes in a wide variety of formats (numbers, images, texts, and others), and it is analyzed at a high speed (Bleu-Laine, 2021). The tools used for big data analysis are machine learning and deep learning.

Machine learning consists of a set of methods used to automatically find patterns in data (Murphy, 2013). The patterns that are found can be used to make predictions on unseen data and forecast future behavior. These forecasts can help identify subsequent actions without fully understanding the data behavior (Bzdok *et al.*, 2018). Thus, machine learning has proven to be an effective tool in applications such as decision-making, fraud detection, cancer diagnosis, recommendation systems, voice assistants, among others (Bleu-Laine, 2021).

The existing algorithms are displayed in Figure 1, illustrating two primary learning strategies: supervised and unsupervised. This figure outlines the structure of machine learning divided into these two major approaches. In supervised learning, we see classification and regression techniques. Classification includes methods such as decision trees, support vector machines, and artificial neural networks, while regression utilizes approaches like linear regression, Bayesian networks, and neural networks, among others. On the other hand, unsupervised learning encompasses clustering and dimensionality reduction. Clustering employs algorithms like K-means and hierarchical clustering, while dimensionality reduction includes techniques such as principal component analysis and

neural networks. Each technique serves a specific purpose and has unique applications in data analysis and organization (Taherdoost, 2023).

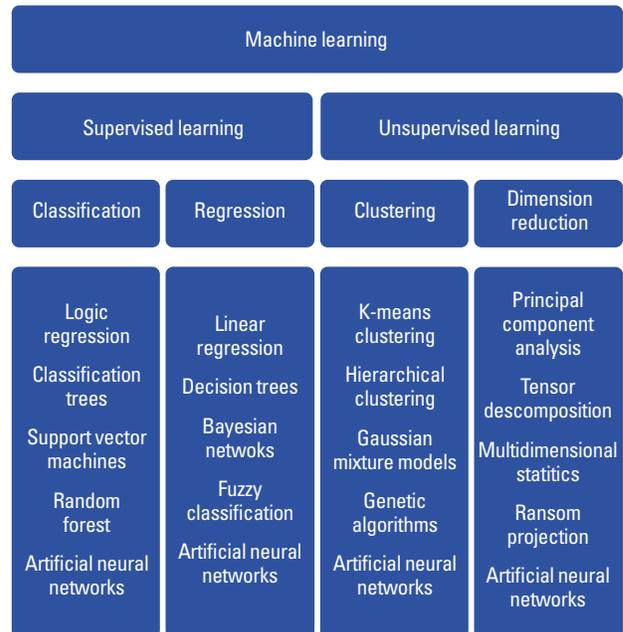


Figure 1. Machine learning algorithms
Source: Louridas & Ebert (2016).

Supervised learning allows a machine learning model to learn the mapping from an input x to an output y , using a training dataset consisting of input-output pairs (Murphy, 2013). In other words, supervised learning is used when the training set comprises the data and the authentic output of the process that uses this data (Vandehzad, 2020).

Classification Algorithms

Classification algorithms are used when the response is based on a finite set of outcomes, *i.e.*, a discrete label.

Regression Algorithms

Regression algorithms estimate and understand relationships between variables. These analyses focus on an independent variable and a series of other variables that vary, making them useful for prediction and forecasting.

Table 2 presents supervised learning algorithms for classification and regression tasks. In classification, key algorithms include logistic regression, decision trees, SVM, KNN, Naive Bayes, random forests, and boosting, all useful for categorizing data. For regression, the list includes linear regression, regression trees, and SVR, which are focused on predicting continuous values.

Table 2.
Supervised algorithms

Task	Algorithm
Classification	Logistic Regression Decision Trees Support Vector Machine (SVM) k-Nearest Neighbor (KNN) Naive Bayes Random Forest Boosting
Regression	Regresión lineal Arboles de regresión Support Vector Regressor

Source: Own elaboration.

The objective of unsupervised learning is to discover knowledge from a dataset (Murphy, 2013). In this case, the data is unlabeled, and machine learning algorithms rely on the structure of the input x to create clusters of similar data points, determine the data distribution within the input space, or reduce higher-dimensional data to 2 or 3 dimensions for visualization purposes (Bishop, 2006). In other words, unsupervised learning is used when the training set consists of data but lacks solutions, requiring the computer to solve the problem on its own (Vandehzad, 2020). In practice, these algorithms are widely used as they do not require labeled datasets, resulting in more available data (Bleu-Laine, 2021).

Clustering Algorithms

Involves grouping together similar data points and separating dissimilar data points. The measure of similarity between data points and the representation of a cluster are key differences among various clustering algorithms (Arts, 2021).

Dimensionality reduction

Dimensionality reduction algorithms aim to reduce the number of variables considered to extract the required information. Table 3 presents unsupervised learning algorithms categorized into clustering and dimensionality reduction tasks. In clustering, algorithms like K-means, DBSCAN, hierarchical clustering, Gaussian mixture models, and hidden Markov models are used to group unlabeled data. For dimensionality reduction, key techniques include principal component analysis (PCA), tensor decomposition, multidimensional statistics, and random projection, all of which simplify data representation by reducing complexity while preserving essential information.

Table 3.
Unsupervised algorithms

Task	Algorithm
Clustering	K-means DBSCAN Hierarchical clustering Gaussian Mixture Models Hidden Markov Models
Dimensionality Reduction	Principal Component Analysis Tensor Decomposition Multidimensional Statistics Random Projection Source: Authors.

Source: Own elaboration.

The purpose of this review is to search and analyze the available information in databases related to artificial intelligence used in air operations, focusing on flight planning processes, trajectory prediction, and resource optimization.

Methodology

Conducting a systematic review requires establishing a work methodology that clarifies and simplifies the search for research and the synthesis process. For this reason, three phases are proposed: planning, execution, and reporting.

Planning

The planning phase involves defining the research problem, formulating the search equation based on keywords, and establishing exclusion criteria. For this research, the selected search equation is:

(TITLE-ABS-KEY (artificial AND intelligence OR machine AND learning) AND TITLE-ABS-KEY (aircraft) AND TITLE-ABS-KEY (trajectory OR prediction OR delay OR flight OR fuel))

The Scopus database was chosen as the database, and the exclusion criteria included all documents that were not research articles.

Execution

The execution process involves applying the search equation across selected databases. Once the information is gathered, various filters are applied, and exclusion criteria are implemented. The exclusion criteria are as follows: the sources must be scientific articles, and they must specifically address topics related to air operations.

Reporting

The reporting phase involves presenting the most relevant information gathered and its impact. This includes an analysis of the types of documents found, the year of publication, and the interaction among studies, with the goal of examining the research objectives, algorithms used, and databases referenced.

Discussions

Analysis of Publication Trends and Keyword Relationships in Machine Learning for Aviation

By conducting the search in Scopus, a total of 423 results were found, as shown in Figure 2. It can be observed that the majority of publications are conference papers, followed by articles.

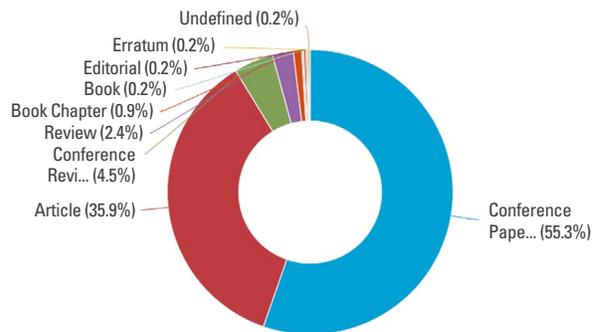


Figure 2. Document types without refinement

Source: Own elaboration.

Applying the exclusion criteria, the number of results was reduced to 162 published articles. Figure 3 displays the distribution of publications by year, revealing that artificial intelligence has had a significant impact on research since 2018.

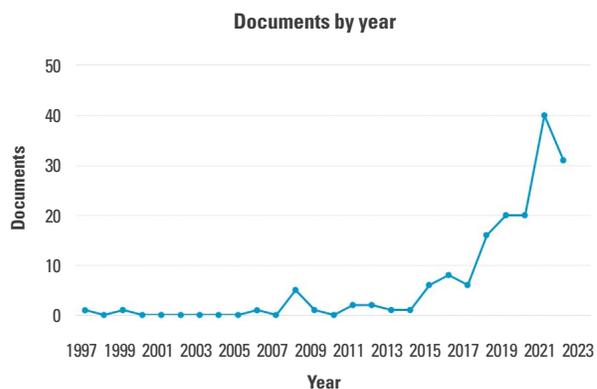


Figure 3. Publications by year

Source: Own elaboration.

Using the collected information, a relationship map was constructed using the vosViewer© program. Figure 4 illustrates the co-occurrence of keywords and the selected search equation. The figure is a relationship map in the field of machine learning as applied to aviation and related systems. The nodes and connections represent interconnected concepts such as neural networks, learning systems, aircraft, and detection technologies. Certain groups of terms are highlighted by color to indicate related topics: red emphasizes areas like deep learning and aircraft detection; blue is linked to aircraft engineering and structural

monitoring; and green clusters focus on learning systems and air transport. This map illustrates how various areas of machine learning interact within the aviation context, from fault prediction and detection to aircraft control and training.

Based on this map, it can be observed that the majority of research revolves around trajectory prediction algorithms and air traffic management, as shown in Figure 5. This indicates a strong focus on these areas within the field of aviation operations.

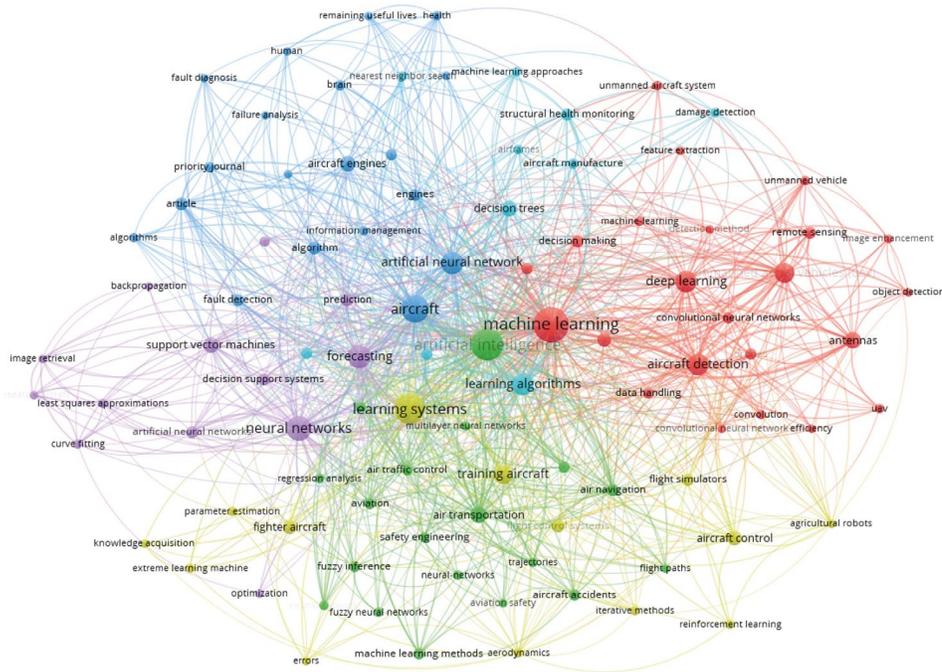


Figure 4. Co-occurrence of keywords
Source: Own elaboration.

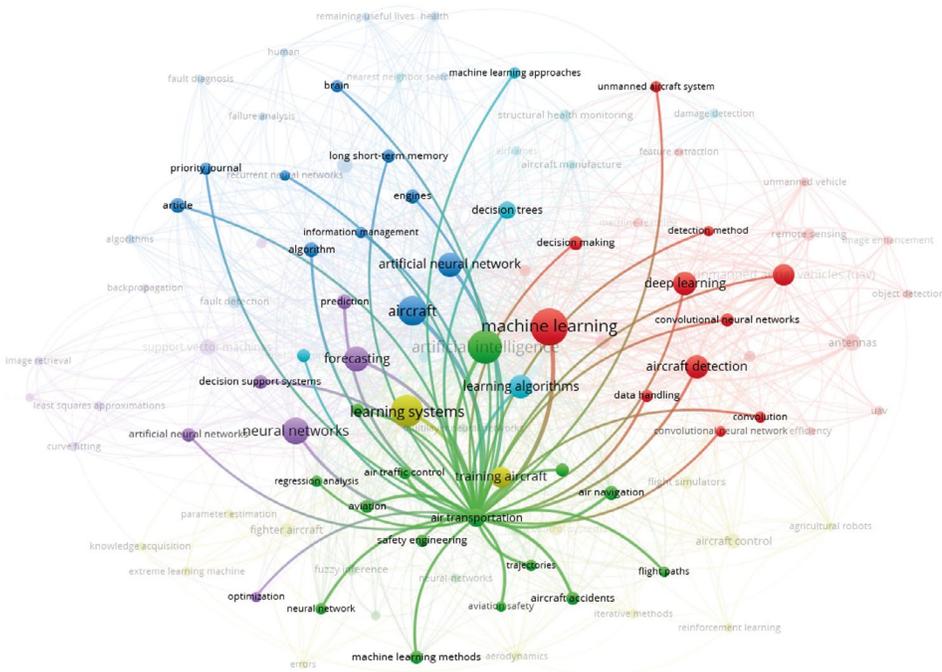


Figure 5. Co-occurrence in air operations
Source: Own elaboration.

Artificial Intelligence in Aircraft Operations

Air traffic management systems focused on trajectory-based operations (ТВО) were proposed in the United States and Europe, named Next Generation Air Transportation System (NextGen) (Federal Aviation Administration [FAA], 2015) and Single European Sky ATM Research (SESAR, 2021), respectively. Nowadays, there are different technologies and equipment that allow accurate aircraft position acquisition and reporting. Integration between Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) and ATM enhances flight efficiency and safety (Besada *et al.*, 2000; Jeon *et al.*, 2015; Yong *et al.*, 22-27 May 2012). Machine learning plays a crucial role in trajectory exploitation and characterization, with clustering, neural networks, and genetic algorithms being commonly employed for trajectory planning and optimization (De Oliveira, 2019).

Most current trajectory prediction research falls under the category of “trajectory-based” methods, which rely on grid-based navigation aid planning. Regarding algorithm structure and parameters, ground-based 4-D trajectory prediction can be primarily divided into aircraft performance-based models and trajectory-based models (Shi, 2020).

Trajectory prediction is an attractive but complex research area as it requires interaction between aircraft operational models, flight planning, and environmental conditions (Courchelle *et al.*, 2019; Cheung, 2018; Roskam, 1998; Takeichi, 2018). Furthermore, the increasing availability of data has facilitated more research in ATM systems. This increase is attributed to detection equipment, ground stations, satellites, and other facilities that provide an ample amount of data for air traffic management systems. An important resource in this context is the Base of Aircraft Data (BADA), which provides theoretical model specifications and related datasets for accurately simulating the behavior of any aircraft (EUROCONTROL, 2004). Additionally, historical flight trajectory data can be collected through ADS-B ground stations, which have been used for trajectory prediction (Harada *et al.*, 7-11 January 2019). Although meteorological data is not easily accessible,

it has a significant impact on trajectory prediction (Choi *et al.*, 25-29 September 2016).

Performance-Based Models

Various research has been conducted on trajectory prediction based on models such as Point-Mass, kinematic, kinetic, and others (Musialek *et al.*, 2010). State estimation models establish the motion equation based on aircraft velocity, position, acceleration, and other attributes. While this model is relatively simple, it can lead to errors due to uncertainty caused by the inability to accurately capture aircraft maneuvers. Therefore, it is effective only for short periods of time (Zeng *et al.*, 2022). Kinetic models analyze aircraft forces based on ideal assumptions, often with limited consideration of real constraints and human behavior (Lymperopoulos *et al.*, 21-24 August 2006; Porretta *et al.*, 2008; Schuster *et al.*, 2012; Schuster & Porretta, 3-7 October 2010). These kinetic models require aircraft performance data, aircraft state, environmental conditions, aircraft intentions, and other parameters, some of which are commercially sensitive and difficult to obtain. They also rely on pre-defined configurations or estimations in existing databases. The uncertainty associated with these input data induces uncertainty in trajectory prediction. For this reason, SESAR research aims to improve this situation (Zeng *et al.*, 2022).

The state estimation models used include Kalman Filter (KF), Particle Filter algorithm, and Hidden Markov Model (HMM) as a single-model estimation. For multi-model estimation, multi-model KF, Interacting Multiple Model (IMM), and improved IMM have been used (Zeng *et al.*, 2022). Additionally, some artificial intelligence algorithms have been employed for fuel estimation (Trani *et al.*, 20-22 September 2004), thrust prediction (Dalkiran & Toraman, 2021), wind effects-based speed estimation (Porretta *et al.*, 2008), aircraft conflict detection using the Residual-Based Interacting Multiple Model (RMIMM) (Hwang *et al.*, 11-14 August 2003), and recent research has developed models for trajectory and performance prediction (Hrastovec & Solina, 2016; Tang *et al.*, 2015).

Trajectory-Based Models

Machine learning models utilize algorithms and data mining techniques to learn from historical flight trajectories and meteorological data in order to predict future trajectories. These models are built upon weak or no assumptions and do not require explicit modeling of aircraft performance, procedures, or airspace. Instead, they learn patterns from the input data. These algorithms are also considered a type of data engineering, as their effectiveness improves with larger datasets. Due to the vast amount of trajectory data available, it is possible to extract patterns from complex trajectories and identify important features, providing a preliminary basis for trajectory prediction (Zeng *et al.*, 2022).

Generally, flights follow the same planned route and sequence of waypoints, indicating regularity in historical trajectories. This makes machine learning highly viable (Lin *et al.*, 2019). This methodology extracts the underlying law governing changes in aircraft trajectories over time from a large amount of data and uses this law to predict position trajectories. It typically employs two approaches: the first approach

primarily relies on underlying laws of aircraft operations to excavate representative trajectory patterns, while the second approach is based on input-output space reconstruction (Lin *et al.*, 2019). Different algorithms such as regression algorithms, neural networks, clustering, and other models have been used. Table 4 shows some of the algorithms employed.

Databases

There are several databases that have been used in research related to flight trajectory prediction, including aircraft performance data, aircraft surveillance data, and meteorological data.

Aircraft Performance Data

Performance data includes operational envelopes of the aircraft (speeds, weights, fuel consumption, etc.), aerodynamics, and other parameters. Currently, these data can be found in the BADA, Aircraft Noise and Performance (ANP), among others (Fukuda *et al.*, 2010; Zeng *et al.*, 2022).

Table 4.
Overview of models used for flight prediction

Model	Description	Reference
Regression Model	Linear regression	(Hamed <i>et al.</i> , June 2013; Hong & Lee, 2015; Kanneganti <i>et al.</i> , 23-26 July 2018)
	Stepwise regression	(De Leege <i>et al.</i> , 19-22 August 2013)
	Non-linear regression	(Hamed <i>et al.</i> , June 2013; Tastambekov <i>et al.</i> , 2014)
Neural Network Model	Feedforward neural networks	(Le Fablec & Alliot, May 1999; Verdonk-Gallego <i>et al.</i> , 2018, 2019; Wu <i>et al.</i> , 2020)
	Elman neural network	(Min <i>et al.</i> , 2020)
	LSTM	(Shi <i>et al.</i> , 8-13 July 2018, 2021; Xu <i>et al.</i> , 2021; Yang <i>et al.</i> , 27-30 July 2019; Zeng <i>et al.</i> , 2020; Zhao <i>et al.</i> , 6-8 July 2019)
	DNN + LSTM	(Zhang & Mahadevan, 2020)
	CNN + LSTM	(Ma & Tian, 2020)
	GRU	(Zhang <i>et al.</i> , 2020)
	Bayesian neural network	(Zhang & Mahadevan, 2020)
	Generative Adversarial Network	(Pang & Liu, 6-10 January 2020)
Clustering Model	Gaussian mixture model with clustering	(Barratt <i>et al.</i> , 2019; Tran <i>et al.</i> , 2020; Wang <i>et al.</i> , 2017)
	Random forest with clustering	
	Neural networks with clustering	
Other models	Non-parametric interval prediction	(Hamed, 2014; C. Zhang <i>et al.</i> , 8-10 July 2016)
	Genetic programming	

Source: As shown in the table.

BADA is an aircraft performance model developed by EUROCONTROL in cooperation with aircraft manufacturers and airlines. It is based on the kinetic method for aircraft performance modeling, including the theoretical basis for calculating aircraft performance parameters and specific coefficients for calculating their trajectories. Currently, BADA has two widely used series, Series 3, which contains data for 100% of aircraft operating in Europe, and Series 4, which has improved performance calculations and covers approximately 70% of aircraft operating in Europe (EUROCONTROL, 2004).

ANP is jointly developed by the United States Department of Transportation, the European Control Center, and the European Aviation Safety Agency. This database provides noise and performance characteristics for over 150 types of civil aviation aircraft and is used for noise calculation around airports. Aircraft manufacturers provide data for each type of engine, which is published within the framework of Regulation (EU)598/2014 (Tang *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2022).

Aircraft Surveillance Data

Monitoring data includes various aspects of current positioning and velocity and is provided in real-time. This data is used for trajectory monitoring, as done by the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system and secondary surveillance radar. ADS-B is a surveillance system that uses satellite navigation to locate the aircraft's position and broadcast it to other aircraft or ground antennas. This technique makes aircraft visible and provides situational awareness. The data provided by ADS-B includes (Pham, 2019):

- Flight ID: a unique serial number representing each flight
- Time: date (month/day/year) and UTC time
- Position: latitude (decimal degrees), longitude (decimal degrees), and altitude (ft)
- Ground speed: relative horizontal speed with respect to the ground (knots)
- Rate of climb: change in altitude (feet per minute)

- Heading: orientation of the aircraft with respect to the north (decimal degrees)

FlightRadar24 is a global aircraft flight tracking service that allows real-time visualization of air traffic flow. It combines data from multiple sources, including ADS-B, multilateration, and radar data. FlightRadar24 operates worldwide (including Colombia) and has more than 20,000 ADS-B receivers (FlightRadar24, 2020).

There are other platforms such as FlightAware, OpenSky Network, ADS-B Exchange, and VariFlight, which also receive data from the ADS-B system, manage and visualize it. The drawback with these platforms is that they do not have an extensive network of receivers in Colombia (ADS-B Exchange, 2022; FlightAware, 2020; OpenSky Network, n. d.; VariFlight, 2022).

The Flight Plan Database (<https://flightplandatabase.com/>) has a large collection of flight plans primarily intended for flight simulation. For this reason, most plans do not have any flight identification or time information. However, they can be used as a guide for route planning (Kiesiläinen, 2020).

Meteorological Data

Meteorological data provides information related to environmental conditions, such as temperature, wind direction and speed, air pressure, and changes in gravity and magnetic forces. The most commonly used databases include EUROCONTROL with European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), North American Mesoscale Forecast System (NAM), among others (Zeng *et al.*, 2022).

The China Meteorological Data Network (CMDC, 2022) is a collector and manager of weather files and information. They collect, process, store, retrieve, and provide meteorological data worldwide. ECMWF (2022) is an organization that reanalyzes weather data, provides weather forecasts, and develops numerical models and data assimilation systems. They provide the Copernicus atmospheric monitoring and climate change services of the European community.

The National Center for Environmental Information (NCEI, 2019) provides global climate, forecasts, alerts, and analysis for external partners and user communities. It is one of the world's largest environmental data archives in terms of data quantity and forecasting models.

Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) is a system composed of the World Meteorological Organization. It mainly utilizes sensors, computers, and communication systems on existing aircraft to collect, process, format, and transmit meteorological data to the ground station via satellite or radio links. The collected data can be used in various meteorological applications, including weather forecasts for the public, weather monitoring and prediction, weather disaster alert systems, and, most importantly, weather monitoring and prediction to support the aviation industry (World Meteorological Organization [WMO], 2022).

WorldClim corresponds to a high-resolution global climate database, which includes 19 types of bioclimatic databases and monthly basic climate databases (WorldClim, 2022). Meteoblue calculates high-quality meteorological data worldwide, provides visualization, forecasting, storage, mobile applications, and other capabilities dedicated to various industries (Meteoblue, 2022). The open data from the Finnish Meteorological Institute contains datasets available to the public for free in a digital format (Finnish Meteorological Institute, 2013).

Conclusion

In conclusion, this study has shown that a structured methodology can refine the gathered information on artificial intelligence applications in aviation operations, especially in trajectory prediction, meteorology, fuel efficiency, aircraft performance, and air traffic management. Over the past four years, there has been a notable increase in research in this field.

The use of machine learning methodologies has led to significant improvements across various aspects of aviation. In trajectory prediction, models like

linear regression, neural networks, and clustering systems have enhanced route and arrival time accuracy. In meteorology, machine learning has improved real-time weather forecasting, which is crucial for flight safety. Fuel consumption has been optimized by models that consider factors such as altitude and speed, resulting in cost savings and reduced emissions. In air traffic management, machine learning has increased system capacity, helping to manage congestion more effectively.

In summary, machine learning applications in aviation operations offer valuable benefits in efficiency, safety, and sustainability. The rising interest and research in this area reflect a strong commitment to leveraging artificial intelligence to advance the aviation industry.

Conflicts of interest: We declare that we have no conflicts of interest.

References

- ADS-B Exchange. (2022). *What is ADSBX?* [online]. <https://www.adsbexchange.com/>
- Arts, E. (2021). *A Novel Approach to Flight Phase Identification using Machine Learning* [master dissertation, University of Hamburg]. <https://elib.dlr.de/141738/1/EmyArtsMasterthesis.pdf>
- Barratt, S. T., Kochenderfer, M. J. & Boyd, S. P. (2019). Learning Probabilistic Trajectory Models of Aircraft in Terminal Airspace from Position Data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(9), 3536-3545. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2877572>
- Besada, J. A., Garcia, J., de Miguel, G., Jimenez, F. J., Gavin, G., & Casar, J. R. (2000). Data Fusion Algorithms based on Radar and ADS Measurements for ATC Application. In: *The Record of the IEEE 2000 International Radar Conference* (P. 93-103). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2000.851812>
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer-Verlag. <https://www.springer.com/gp/book/9780387310732>
- Bleu-Laine, M.-H. (2021). *A Methodology for the Prediction and Analysis of Precursors to Flight Adverse Events* [master dissertation, Georgia Institute of Technology]. <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/64698>

- Bzdok, D., Altman, N. & Krzywinski, M. (2018). Points of Significance: Statistics versus Machine Learning. *Nature Methods*, 15(4), 233-234. <https://doi.org/10.1038/NMETH.4642>
- Calvo-Fernández, E. (2017). *Planificación de trayectorias 4D de aeronaves en entornos multiobjetivo* [doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/47387/1/ESTHER_CALVO_FERNANDEZ.pdf
- Cheung, J. C. H. (2018). Flight Planning: Node-Based Trajectory Prediction and Turbulence Avoidance. *Meteorological Applications*, 25(1), 78-85. <https://doi.org/10.1002/MET.1671>
- Choi, S., Kim, Y. J., Briceno, S. & Mavris, D. (2016, 25-29 September). *Prediction of Weather-Induced Airline Delays based on Machine Learning Algorithms* [paper]. 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC), Sacramento, California, United States. <https://doi.org/10.1109/DASC.2016.7777956>
- China Meteorological Data Network (CMDN). (2022). *China Meteorological Data Network. About Us*. [online]. <https://data.cma.cn/en/?r=article/getLeft&id=348&keyIndex=2>
- Courchelle, V., Soler, M., González-Arribas, D. & Delahaye, D. (2019). A Simulated Annealing Approach to 3D Strategic Aircraft Deconfliction based on En-Route Speed Changes under Wind and Temperature Uncertainties. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 103, 194-210. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2019.03.024>
- Dalkiran, F. Y. & Toraman, M. (2021). Predicting Thrust of Aircraft using Artificial Neural Networks. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 93(1), 35-41. <https://doi.org/10.1108/AEAT-05-2020-0089>
- De Leege, A. M. P., Van Paassen, M. M. & Mulder, M. (2013, 19-22 August). *A Machine Learning Approach to Trajectory Prediction* [paper]. AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference, Boston, Massachusetts, United States. <https://doi.org/10.2514/6.2013-4782>
- De Oliveira, M. (2019). *A Data-Driven Approach for Air Traffic Operational Performance Characterization and Prediction* [thesis seminar, São José dos Campos]. <https://tinyurl.com/48fvv4pa>
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). (2022). *About Us* [online]. <https://www.ecmwf.int/en/about>
- EUROCONTROL. (2004). *User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA)* [online]. <https://www.eurocontrol.int/publication/user-manual-base-aircraft-data-bada>
- Federal Aviation Administration (FAA). (2015). Next Generation Air Transportation System (NextGen). FAA Website, May 2010, 28-30. <https://www.faa.gov/nextgen/>
- Finnish Meteorological Institute. (2013). *Data Sets Made Available* [online]. <https://en.ilmatietaenlaitos.fi/open-data-sets-available>
- FlightAware. (2020). *Rastreador de vuelos / Estado de vuelos* [online]. <https://flightaware.com/>
- FlightRadar24. (2020). *Live Flight Tracker - Real-Time Flight Tracker Map* [online]. <https://www.flightradar24.com/how-it-works>
- Fukuda, Y., Shirakawa, M. & Senoguchi, A. (2010). Development and Evaluation of Trajectory Prediction Model. In: *27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2010 (ICAS 2010)* (P. 3090-3097). ICAS Secretariat. <https://www.proceedings.com/content/009/009889webtoc.pdf>
- Gössling, S. & Humpe, A. (2020). The Global Scale, Distribution and Growth of Aviation: Implications for Climate Change. *Global Environmental Change*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102194>
- Hamed, M. G. (2014). *Non-Parametric High Confidence Interval Prediction: Application to Aircraft Trajectory Prediction* [doctoral dissertation, Université de Toulouse]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00951327>
- Hamed, M. G., Gianazza, D., Serrurier, M. & Durand, N. (2013, June). *Statistical Prediction of Aircraft Trajectory: Regression Methods vs. Point-Mass Model* [paper]. 10th USA/Europe ATM R&D Seminar, Chicago, Illinois, United States. <http://www.atmseminar.org/>
- Harada, A., Takeichi, N. & Oka, K. (2019, 7-11 January). *An Optimal Trajectory-Based Trajectory Prediction Method for Automated Traffic Flow Management* [paper]. AIAA SciTech 2019 Forum, San Diego, California, United States. <https://doi.org/10.2514/6.2019-1360>
- Hong, S. & Lee, K. (2015). Trajectory Prediction for Vectored Area Navigation Arrivals. *Journal of Aerospace Information Systems*, 12(7), 490-512. <https://doi.org/10.2514/1.1010245>
- Hrastovec, M. & Solina, F. (2016). Prediction of Aircraft Performances based on Data Collected by Air Traffic Control Centers. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 73, 167-182. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.10.018>
- Hwang, I., Hwang, J. & Tomlin, C. (2003, 11-14 August). *Flight-Mode-Based Aircraft Conflict Detection using a Residual-Mean Interacting Multiple Model Algorithm* [paper].

- AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas, United States. <https://doi.org/10.2514/6.2003-5340>
- Jeon, D., Eun, Y. & Kim, H. (2015). Estimation Fusion with Radar and ADS-B for Air Traffic Surveillance. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 13(2), 336-345. <https://doi.org/10.1007/s12555-014-0060-1>
- Kanneganti, S. T., Chilson, P. B. & Huck, R. (2018, 23-26 July). Visualization and Prediction of Aircraft Trajectory using ADS-B [paper]. NAECON 2018 - IEEE National Aerospace and Electronics Conference, Dayton, Ohio, United States. <https://doi.org/10.1109/NAECON.2018.8556782>
- Kiesiläinen, J. (2020). *Predicting Aircraft Arrival Times with Machine Learning* [master dissertation, University of Jyväskylä]. <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/69366/1/URN%3ANBN%3Afi%3A%3Ajyu-202006023624.pdf>
- Le Fablec, Y. & Alliot, J.-M. (1999, May). *Using Neural Networks to Predict Aircraft Trajectories* [paper]. International Conference on Artificial Intelligence.
- Lin, Y., Yang, B., Zhang, J. & Liu, H. (2019). Approach for 4-D Trajectory Management based on HMM and Trajectory Similarity. *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)*, 27(3), 246-256. [https://doi.org/10.6119/JMST.201906_27\(3\).0007](https://doi.org/10.6119/JMST.201906_27(3).0007)
- Louridas, P. & Ebert, C. (2016). Machine Learning. *IEEE Software*, 33(5), 110-115. <https://doi.org/10.1109/MS.2016.114>
- Lymeropoulos, I., Lygeros, J. & Lecchini, A. (2006, 21-24 August). *Model-Based Aircraft Trajectory Prediction during Takeoff* [paper]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, Colorado, United States. <https://doi.org/10.2514/6.2006-6098>
- Ma, L. & Tian, S. (2020). A Hybrid CNN-LSTM Model for Aircraft 4D Trajectory Prediction. *IEEE Access*, 8, 134668-134680. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010963>
- McCorduck, P. & Cfe, C. (2004). *Machines Who Think: A Personal Inquiry into the History and Prospects of Artificial Intelligence*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429258985>
- Medeiros, D. M. C., Silva, J. M. R. & Bousson, K. (2012). RNAV and RNP AR Approach Systems: The Case for Pico Island Airport. *International Journal of Aviation Management (IJAM)*, 1(3), 181. <https://doi.org/10.1504/ijam.2012.045738>
- Meteoblue. (2022). *Meteoblue. Weather Close to You* [online]. <https://content.meteoblue.com/es>
- World Meteorological Organization (WMO). (2022). *About the AMDAR Observing System* [online]. <https://public.wmo.int/en/programmes/global-observing-system/amdar-observing-system>
- Min, W., Jiawei, W., Jinhui, G., Lihua, S. & Bogong, A. (2020). Multi-Point Prediction of Aircraft Motion Trajectory based on GA-Elman-Regularization Neural Network. *Integrated Ferroelectrics: An International Journal*, 210(1), 116-127. <https://doi.org/10.1080/10584587.2020.1728853>
- Murphy, K. P. (2013). *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. The MIT Press
- Musialek, B., Munafo, C. F., Ryan, H. & Paglione, M. (2010). *Literature Survey of Trajectory Predictor Technology* [online]. <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/tctn11-1.pdf>
- National Centers for Environmental Information (NCEI). (2019). *Resources* [online]. <https://www.ncei.noaa.gov/resources>
- OpenSky Network. (n.d.). *About Us* [online]. <https://opensky-network.org/about/about-us>
- Pang, Y. & Liu, Y. (2020, 6-10 January). *Conditional Generative Adversarial Networks (CGAN) for Aircraft Trajectory Prediction Considering Weather Effects* [paper]. AIAA Scitech 2020 Forum, Orlando, Florida, United States. <https://doi.org/10.2514/6.2020-1853>
- Pham, D.-T. (2019). *Machine Learning-Based Flight Trajectories Prediction and Air Traffic Conflict Resolution Advisory* [thesis, Université Paris Sciences et Lettres]. <https://theses.hal.science/tel-02870575>
- Porretta, M., Dupuy, M.-D., Schuster, W., Majumdar, A. & Ochieng, W. (2008). Performance Evaluation of a Novel 4D Trajectory Prediction Model for Civil Aircraft. *The Journal of Navigation*, 61(3), 393-420. <https://doi.org/10.1017/S0373463308004761>
- Robert, C. (2014). Machine Learning, a Probabilistic Perspective. *Chance*, 27(2), 62-63. <https://doi.org/10.1080/09332480.2014.914768>
- Roskam, J. (1998). *Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls - Part II*. DARcorporation.
- Russell, S. & Norving, P. (2009). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall.
- Schuster, W., Porretta, M. & Ochieng, W. (2012). High-Accuracy Four-Dimensional Trajectory Prediction for Civil Aircraft. *The Aeronautical Journal*, 116(1175), 45-66. <https://doi.org/10.1017/S0001924000006618>
- Schuster, W. & Porretta, M. (2010, 3-7 October). *High-Performance Trajectory Prediction for Civil Aircraft* [paper].

- 29th Digital Avionics Systems Conference, Salt Lake City, Utah, United States. <https://doi.org/10.1109/DASC.2010.5655515>
- Single European Sky ATM Research (SESAR). (2021). *Delivering the Digital European Sky* [online]. <https://www.sesarju.eu/>
- Shi, Z. (2020). *4-D Trajectory Prediction and Its Application in Air Traffic Management* [doctoral dissertation, University of Technology Sydney]. <https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/143917>
- Shi, Z., Xu, M. & Pan, Q. (2021). 4-D Flight Trajectory Prediction with Constrained LSTM Network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(11), 7242-7255. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3004807>
- Shi, Z., Xu, M., Pan, Q., Yan, B. & Zhang, H. (2018, 8-13 July). *LSTM-Based Flight Trajectory Prediction* [paper]. 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Rio de Janeiro, Brasil. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489734>
- Spencer, K. S. (2011). *Fuel Consumption Optimization using Neural Networks and Genetic Algorithms* [master dissertation, Universidade Técnica de Lisboa]. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395143171393/dissertacao.pdf>
- Taherdoost, H. (2023). Machine Learning Algorithms: Features and Applications. In: *Encyclopedia of Data Science and Machine Learning* (P. 938-960). <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-9220-5.ch054>
- Takeichi, N. (2018). Adaptive Prediction of Flight Time Uncertainty for Ground-Based 4D Trajectory Management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 335-345. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2018.07.028>
- Tang, X., Chen, P. & Zhang, Y. (2015). 4D Trajectory Estimation Based on Nominal Flight Profile Extraction and Airway Meteorological Forecast Revision. *Aerospace Science and Technology*, 45, 387-397. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.06.001>
- Tastambekov, K., Puechmorel, S., Delahaye, D. & Rabut, C. (2014). Aircraft Trajectory Forecasting using Local Functional Regression in Sobolev Space. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 39, 1-22. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2013.11.013>
- Tran, P., Pham, D.-T., Schultz, M., Alam, S. & Le, T.-H. (2020). *Short-Term Trajectory Prediction using Generative Machine Learning Methods* [paper]. International Conference for Research in Air Transportation (ICRAT) 2020, Nanyang Technological University, Singapore. <https://www.researchgate.net/publication/342706973>
- Trani, A. A., Wing-Ho, F. C., Schilling, G., Baik, H. & Seshadri, A. (2004, 20-22 September). *A Neural Network Model to Estimate Aircraft Fuel Consumption* [paper]. AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum, Chicago, Illinois, United States. <https://doi.org/10.2514/6.2004-6401>
- Vandehzad, M. (2020). *Efficient Flight Schedules with utilizing Machine Learning Prediction Algorithms* [master dissertation, Malmö University]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1480542/FULLTEXT01.pdf>
- VariFlight. (2022). *Living on Time* [online]. <https://www.variflight.com/en/>
- Verdonk-Gallego, C. E., Gómez-Comendador, V. F., Amaro-Carmona, M. A., Arnaldo-Valdés, R. M., Sáez-Nieto, F. J. & García-Martínez, M. (2019). A Machine Learning Approach to Air Traffic Interdependency Modelling and Its Application to Trajectory Prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 107, 356-386. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2019.08.015>
- Verdonk-Gallego, C. E., Gómez-Comendador, V. F., Sáez-Nieto, F. J., Orenge-Imaz, G. & Arnaldo-Valdés, R. M. (2018). Analysis of Air Traffic Control Operational Impact on Aircraft Vertical Profiles Supported by Machine Learning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 883-903. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2018.03.017>
- Wang, Z., Liang, M. & Delahaye, D. (2017). *Short-Term 4D Trajectory Prediction using Machine Learning Methods* [paper]. 7th SESAR Innovation Days, Belgrade, Serbia. <https://enac.hal.science/hal-01652041>
- WordClim. (2022). *Global Climate and Weather Data* [online]. <https://www.worldclim.org/data/index.html>
- Wu, Z.-J., Tian, S. & Ma, L. (2020). A 4D Trajectory Prediction Model based on the BP Neural Network. *Journal of Intelligent Systems*, 29(1), 1545-1557. <https://doi.org/10.1515/jisys-2019-0077>
- Xu, Z., Zeng, W., Chu, X. & Cao, P. (2021). Multi-Aircraft Trajectory Collaborative Prediction Based on Social Long Short-Term Memory Network. *Aerospace*, 8(4), 115-137. <https://doi.org/10.3390/aerospace8040115>
- Yang, K., Bi, M., Liu, Y. & Zhang, Y. (2019, 27-30 July). *LSTM-Based Deep Learning Model for Civil Aircraft Position and Attitude Prediction Approach* [paper]. 2019 Chinese Control Conference (ccc), Guangzhou, China. <https://doi.org/10.23919/CHICC.2019.8865874>

- Yong, T. Honggang, W., Zhili, X. & Zhongtao, H. (2012, 22-27 May). *ADS-B and SSR data fusion and application* [paper]. 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), Zhangjiajie, China. <https://doi.org/10.1109/CSAE.2012.6272769>
- Zeng, W., Chu, X., Xu, Z., Liu, Y. & Quan, Z. (2022). Aircraft 4D Trajectory Prediction in Civil Aviation: A Review. *Aerospace*, 9(1), 91-110. <https://doi.org/10.3390/aerospace9020091>
- Zeng, W., Quan, Z., Zhao, Z., Xie, C. & Lu, X. (2020). A Deep Learning Approach for Aircraft Trajectory Prediction in Terminal Airspace. *IEEE Access*, 8, 151250-151266. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016289>
- Zhang, C., Zhang, X., Shi, C. & Liu, W. (2016, 8-10 July). *Aircraft Trajectory Prediction Based on Genetic Programming* [paper]. 2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), Beijing, China. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2016.44>
- Zhang, H., Huang, C., Xuan, Y. & Tang, S. (2020). Real-Time Prediction of Air Combat Flight Trajectory using GRU. *Xi Tong Gong Cheng Yu Dian Zi Ji Shu/Systems Engineering and Electronics*, 42(11), 2546-2552. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2020.11.17>
- Zhang, X. & Mahadevan, S. (2020). Bayesian Neural Networks for Flight Trajectory Prediction and Safety Assessment. *Decision Support Systems*, 131. <https://doi.org/10.1016/J.DSS.2020.113246>
- Zhao, Z., Zeng, W., Quan, Z., Chen, M. & Yang, Z. (2019, 6-8 July). *Aircraft Trajectory Prediction using Deep Long Short-Term Memory Networks* [paper]. CICTP 2019: Transportation in China — Connecting the World, Nanjing, China. <https://doi.org/10.1061/9780784482292.012>

Inteligencia aérea en apoyo a la interdicción de aeronaves vinculadas al narcotráfico

| Fecha de recibido: 18 de julio de 2024 | Fecha de aprobado: 10 de agosto de 2024 |

| Reception date: July 18, 2024 | Approval date: August 10, 2024 |

| Data de recebimento: 18 de julho de 2024 | Data de aprovação: 10 de agosto de 2024 |

Jaime Ramiro Andrade Albuja

<https://orcid.org/0009-0003-4812-8361>
jaimeandrade@fae.mil.ec

Licenciado en Administración Aeronáutica Militar
Investigador - Fuerza Aérea Ecuatoriana, Ecuador
Rol del investigador: teórico y escritura

Graduate in Military Aeronautical Administration
Researcher - Ecuadorian Air Force, Ecuador
Researcher's role: theoretical and writing

Graduado em Administração Aeronáutica Militar
Investigador - Força Aérea Equatoriana, Equador
Papel do investigador: teórico e escritor

Gustavo Adolfo Cedeño Bravo

<https://orcid.org/0009-0005-7688-2366>
gcedeno@fae.mil.ec

Mag. en Ingeniería informática – computación móvil
Investigador - Fuerza Aérea Ecuatoriana, Ecuador
Rol del investigador: teórico y escritura

Master in Computer Engineering - Mobile Computing
Researcher - Ecuadorian Air Force, Ecuador
Researcher's role: theoretical and writing

Mestrado em Engenharia Informática - Computação Móvel
Investigador - Força Aérea Equatoriana, Equador
Papel do investigador: teórico e escritor

Cómo citar este artículo: Andrade Albuja, J. R. y Cedeño Bravo, G. A. (2025). Inteligencia aérea en apoyo a la interdicción de aeronaves vinculadas al narcotráfico. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 104-113. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.787>



Inteligencia aérea en apoyo a la interdicción de aeronaves vinculadas al narcotráfico

Air intelligence in support of the interdiction of aircraft linked to drug trafficking

Inteligência aérea em apoio à interdição de aeronaves ligadas ao narcotráfico

Resumen: Las organizaciones narcodelictivas que operan internacionalmente han permeado la seguridad del Estado ecuatoriano y han vulnerado, en varias ocasiones, la soberanía de su espacio aéreo. Esto ha generado que la Fuerza Aérea Ecuatoriana adopte un nuevo concepto operacional que le permita emplear sus medios en el ámbito interno. El presente artículo describe la metodología adoptada para la detección, identificación, interdicción e intervención de Tráficos No Identificados (TNI) que pretenden realizar sus actividades ilegales en territorio ecuatoriano. Para el efecto, se han recopilado y analizado los registros estadísticos que datan desde 2003 hasta 2023, segregándose en dos etapas. La primera corresponde a los incidentes ocurridos antes de la implementación de los Centros de Mando y Control (CMC) con sus radares de vigilancia; y la segunda se da luego de la implementación del referido sistema, el mismo que se encuentra operando desde el año 2017 y que complementó su efectividad con los diferentes procedimientos empleados por la Inteligencia Aérea Operacional, que permitieron la inhabilitación del 36 % de áreas aptas ubicadas en el Litoral ecuatoriano. El hallazgo más relevante corresponde al índice obtenido en los últimos cinco años, considerados los más efectivos en la detección, interdicción e intervención de aeronaves vinculadas al narcotráfico, ya que representan el 57 % del total de casos, con un promedio de cinco casos por año. Esto permite concluir que el control efectivo del espacio aéreo ecuatoriano mejoró a raíz de la implementación de los CMC y la participación directa de la Inteligencia Aérea Operacional.

Palabras clave: centros de mando y control; inteligencia aérea operacional; tráfico no identificados.

Abstract: International narcotic trafficking organizations have permeated the security of the Ecuadorian state and have, on several occasions, violated the sovereignty of its airspace. This has led the Ecuadorian Air Force to adopt a new operational concept that allows it to employ its resources within the internal domain. This article describes the methodology adopted for the detection, identification, interdiction, and intervention of Unidentified Traffic (UT) attempting to carry out illegal activities in Ecuadorian territory. To this end, statistical records from 2003 to 2023 have been collected and analyzed, segmented into two phases. The first phase covers incidents that occurred before the implementation of the Command and Control Centers (CMC) with their surveillance radars; and the second phase covers the period after the implementation of the CMC system, which has been operational since 2017 and was complemented by various procedures employed by Operational Air Intelligence, leading to the incapacitation of 36% of suitable areas in the Ecuadorian coastline. The most relevant finding pertains to the index obtained over the last five years, considered the most effective in detecting, interdiction, and intervention of aircraft linked to drug trafficking, as these years represent 57% of the total cases, with an average of five cases per year. This allows us to conclude that effective control of Ecuadorian airspace improved following the implementation of the CMC and the direct involvement of Operational Air Intelligence.

Keywords: Command and control centers; operational air intelligence; unidentified traffic.

Resumo: Organizações narcotraficantes que operam internacionalmente têm permeado a segurança do Estado equatoriano e, em várias ocasiões, violaram a soberania do seu espaço aéreo. Isso levou a Força Aérea Equatoriana a adotar um novo conceito operacional que lhe permite empregar seus recursos no âmbito interno. Este artigo descreve a metodologia adotada para a detecção, identificação, interdição e intervenção de Tráficos Não Identificados (TNI) que pretendem realizar suas atividades ilegais no território equatoriano. Para tanto, foram coletados e analisados registros estatísticos de 2003 a 2023, segmentados em duas fases. A primeira fase corresponde aos incidentes ocorridos antes da implementação dos Centros de Comando e Controle (CMC) com seus radares de vigilância; e a segunda fase abrange o período após a implementação do sistema CMC, que está operacional desde 2017 e foi complementado por vários procedimentos empregados pela Inteligência Aérea Operacional, resultando na incapacitação de 36% das áreas aptas localizadas no Litoral equatoriano. A descoberta mais relevante refere-se ao índice obtido nos últimos cinco anos, considerados os mais eficazes na detecção, interdição e intervenção de aeronaves vinculadas ao narcotráfico, representando 57% do total de casos, com uma média de cinco casos por ano. Isso permite concluir que o controle efetivo do espaço aéreo equatoriano melhorou após a implementação dos CMC e a participação direta da Inteligência Aérea Operacional.

Palavras-chave: Centros de comando e controle; inteligência aérea operacional; tráfico não identificados.

Introducción

La promulgación de políticas y acuerdos internacionales que establecen la necesidad de adoptar un enfoque de “seguridad multidimensional”, con el fin de hacer frente a las nuevas amenazas y riesgos globales que afectan internamente a cada uno de los Estados, ha conducido a los decisores políticos a instituir estrategias que demandan la participación directa y activa de sus Fuerzas Armadas para el cumplimiento de misiones no comunes a la naturaleza de sus competencias.

En Ecuador, la Política de la Defensa Nacional de 2018 establece amenazas y riesgos en contra de la seguridad integral del Estado. Entre estos se identifica al Crimen Organizado Transnacional (COT) y sus delitos conexos, destacando al narcotráfico como el de mayor afectación. Para hacer frente a este flagelo en el ámbito aéreo, la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE) ha orientado su empleo operativo hacia misiones de interdicción que permitan identificar y neutralizar aeronaves que, utilizando el espacio aéreo ecuatoriano, puedan estar ejecutando operaciones vinculadas al Tráfico Ilícito de Drogas (TID) por vía aérea.

A pesar de los continuos esfuerzos realizados por la FAE, existen particularidades que dificultan la vigilancia y el control del espacio aéreo nacional, especialmente la ubicación geográfica del Ecuador, que lo sitúa entre Colombia y Perú, dos países considerados como los máximos productores de la hoja de coca en el mundo (Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito [UNODC], 2020). Esta particularidad ha despertado especial interés para el COT, motivándolo a cometer sus actividades ilícitas, entre ellas el traslado de Sustancias Catalogadas Sujetas a Fiscalización (SCSF) por vía aérea, empleando aeronaves de bajo *performance* que son modificadas para incrementar su autonomía de vuelo.

Esta forma de operación aprovecha la infraestructura aeronáutica del país, especialmente las pistas aéreas registradas y autorizadas por la Dirección General de Aviación Civil (DGAC), pero que, en muchas ocasiones, no son objeto de controles rutinarios por parte de dicha autoridad. Así mismo, adecúan

espacios terrestres con características propicias para ejecutar operaciones aéreas, tales como planadas de más de 600 metros, carreteras extensas o terrenos planos en el interior de ingenios azucareros, camaroneas, palmicultoras, e incluso bordes de playa con suelo compacto.

Desde 2003, se han presentado 44 incidentes relacionados con vuelos ilegales vinculados al narcotráfico, los cuales se han suscitado en las provincias de: Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Guayas, Los Ríos y Galápagos. Frente a estos eventos, el sistema de inteligencia de la FAE redireccionó el esfuerzo de búsqueda de información, con base en su doctrina básica que se orienta a recopilar información sobre el enemigo, el terreno y las condiciones meteorológicas.

Si bien no existen antecedentes metodológicos que orienten el empleo de la inteligencia aérea ante este tipo de fenómenos, el principio de flexibilidad que rige el ciclo de producción de inteligencia ha logrado adaptarse a los requerimientos de información presentados por los diferentes niveles de mando y conducción. Según esta consideración, se ha generado una nueva metodología que, mediante la aplicación de métodos científicos y empíricos, permite identificar y analizar patrones de comportamiento comunes en las actividades de narcotráfico, con el fin de anticiparse al *modus operandi* de las organizaciones narcodelictivas que pretenden utilizar el espacio aéreo ecuatoriano para ejecutar el tráfico de SCSF.

Metodología adoptada en la lucha contra el TID por vía aérea

Uno de los factores primordiales en la lucha contra el TID por vía aérea radica en el fortalecimiento de las capacidades de análisis e interpretación de datos por parte del sistema de inteligencia aérea; así como en su relacionamiento operativo y táctico, que permita la compartimentación de informaciones oportunas con otros organismos de inteligencia, nacionales e internacionales.

Con base en esta premisa, se ha propuesto un esquema de procedimientos para la interdicción de aeronaves vinculadas al narcotráfico, que requiere la participación de varios componentes de la Defensa Aérea, como equipos radar y Fuerza de Reacción Inmediata (FRI), y, paralelamente, la intervención de unidades especializadas de las Fuerzas Armadas y Policía Nacional. Con esta idea de maniobra, el sistema de inteligencia aérea operativa ha identificado tres fases para el apoyo en el control del narcotráfico que se ejecuta por vía aérea:

1. *Fase de preparación:* En la cual se realizan los procedimientos de análisis e interpretación de datos que permiten identificar los diferentes requerimientos críticos que las organizaciones narcodelictivas necesitan para su operación.
2. *Fase de intervención:* En la cual, una vez obtenidos los productos de inteligencia aérea operativa, resultantes del análisis e interpretación de datos, se procede a la intervención, mediante la inhabilitación de pistas aéreas no controladas por la DGAC o de áreas aptas para la ejecución de operaciones aéreas ilícitas que, en su mayoría, se encuentran en planadas extensas y carreteras de segundo o tercer orden.
3. *Fase de acción directa (reacción):* En la cual interviene directamente el sistema de la Defensa Aérea, empleando dos de sus componentes: los equipos radar para la detección y conducción de las operaciones aéreas propias, y la FRI con la participación directa de todos los medios aéreos con capacidad de ejecutar misiones de interdicción.

Para ejecutar la fase de preparación, la inteligencia aérea conjuga varias herramientas de análisis, entre las cuales se destacan la fotointerpretación, los estudios multitemporales y el análisis a través de sistemas de georreferenciación. Sin embargo, la información más precisa y detallada es la que se obtiene por medio de los sensores de la Fuerza Aérea, una vez que las aeronaves ejecutan las misiones aéreas de reconocimiento. Este cúmulo de información permite a los intérpretes y analistas mantener actualizada la base de

datos sobre pistas autorizadas por la DGAC y áreas aptas para operaciones aéreas ilícitas que pueden ser utilizadas por las organizaciones narcodelictivas.

Una vez obtenidos los productos de inteligencia georreferenciados, se procede a la fase de intervención, mediante la cual se realizan las coordinaciones correspondientes para inhabilitar pistas aéreas que se encuentran registradas por la DGAC, pero que carecen de control por parte de dicho organismo. Cabe señalar que las referidas pistas no registran operaciones regulares de vuelo y, sin embargo, se encuentran habilitadas, pudiendo ser objeto de uso para la ejecución de operaciones aéreas ilícitas.

Así mismo, se realizan los acercamientos correspondientes para inhabilitar grandes espacios de terreno que son considerados como áreas aptas para la ejecución de operaciones aéreas ilícitas, debido a que cumplen ciertas características específicas (extensión, compactación de suelo, planicie, etc.). Estas áreas suelen encontrarse dentro de palmicultoras o ingenios azucareros, por lo cual los permisos para su inhabilitación son coordinados con los propietarios de los predios correspondientes. Por otro lado, existen áreas ubicadas en terrenos públicos, tales como vías de segundo o tercer orden y planadas de gran extensión, entre otras, y los permisos para su inhabilitación se tramitan con los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) de cada jurisdicción. En todos los casos detallados, la inhabilitación se realiza mediante la colocación de obstáculos o la formación de zanjas, con una separación de 300 metros entre ellas.

Finalmente, la fase de acción directa (reacción) activa a las aeronaves de la Fuerza Aérea que se encuentran en alerta y conforman la FRI, quienes ejecutan misiones de interdicción con la finalidad de tomar contacto con el TMI, identificarlo y escoltarlo u obligarlo a aterrizar en una pista aérea previamente controlada por las unidades especializadas de las Fuerzas Armadas y la Policía Nacional.

Como se puede observar en la Figura 1, durante la fase de acción directa (reacción) se reúne un equipo multidisciplinario en el CMC, presidido por el comandante de la Unidad Operativa y asesorado por el oficial de Inteligencia Aérea y el oficial de Control Aerotáctico.

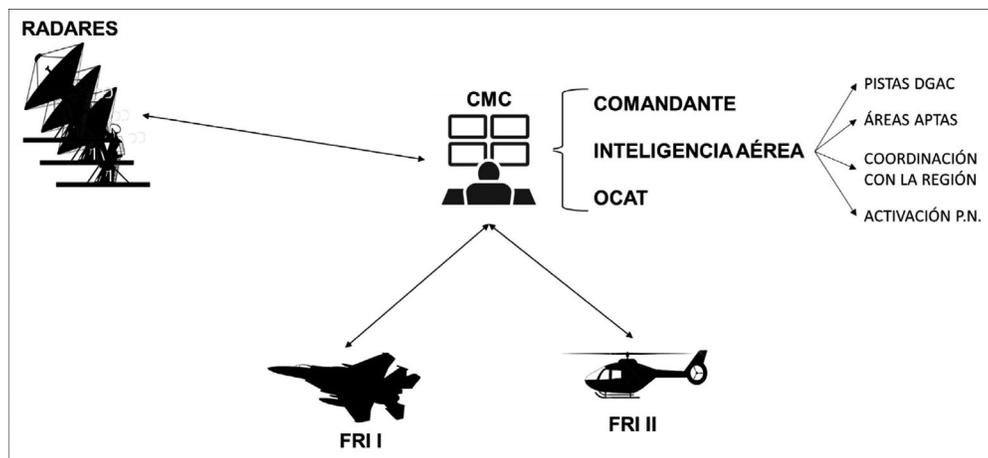


Figura 1. Esquema de participación durante la fase de acción directa
Fuente: elaboración propia.

Para que la conducción del comandante sea precisa y oportuna, el oficial de Inteligencia Aérea debe proporcionar información sobre las posibles pistas no controladas por la DGAC o aquellas áreas aptas en donde el TNI podría operar. Al mismo tiempo, compartimenta la información referida con las unidades especializadas de las Fuerzas Armadas y la Policía Nacional, a fin de que se realice la detención de la aeronave en tierra, conjuntamente con el decomiso del cargamento y la aprehensión de la tripulación. Cabe señalar que la información proporcionada por el oficial de Inteligencia Aérea obedece al proceso de análisis y ejecución de las fases de preparación e intervención.

Así mismo, cuando el caso lo amerita, la información de interés es compartimentada con los organismos de inteligencia de la región, a fin de mantener ploteadas a las aeronaves que se direccionan hacia el espacio aéreo ecuatoriano o que, a su vez, mantienen un rumbo desde territorio ecuatoriano hacia Centroamérica o México.

Es importante reconocer que existen falencias de cobertura radar, debido a la orografía del territorio ecuatoriano. Con el fin de solventar estas deficiencias, especialmente en las áreas por donde se ha identificado el ingreso reiterado de TNI a bajo nivel, el sistema de inteligencia aérea operativa ha implementado la conformación de una Fuerza de Reacción de Observadores Aéreos (FROA), compuesta por personal de

inteligencia aérea táctica, perteneciente a los reparos dependientes del Comando de Operaciones Aéreas y Defensa (COAD). Estos últimos, ante una alerta de un posible vuelo ilegal, se despliegan a lugares estratégicos en donde no existe cobertura radar para dar el alertamiento oportuno del paso de un TNI que esté utilizando un corredor de aproximación ubicado en las cercanías de referidos lugares y así asesorar al comandante en la conducción de la FRI.

Resultados

El TID por vía aérea se ha venido realizando de forma esporádica en el Ecuador, mediante el uso de aeronaves de bajo *performance* que han sido modificadas para incrementar su capacidad de carga y su autonomía de vuelo, lo cual les permite decolar desde México o Centroamérica e ingresar a territorio ecuatoriano por las costas de Esmeraldas, Manabí o Santa Elena, y aprovechar la infraestructura aeronáutica nacional en lo que corresponde a aeropuertos, pistas registradas y autorizadas por la DGAC (controladas y no controladas); también, para que hagan uso de espacios de terrenos extensos que son adecuados intencionalmente para operaciones aéreas ilícitas, carreteras de primer o segundo orden, entre otras áreas aptas. La propuesta

presentada en el apartado anterior ha permitido contrarrestar el accionar de esta amenaza para la seguridad integral del Estado, adoptando nuevas y mejores estrategias para el control del espacio aéreo ecuatoriano, en donde el principal actor lo ha constituido la Fuerza Aérea a través del COAD.

Resultados de la fase de preparación

Producto de las experiencias, las misiones de reconocimiento y los procesos de análisis operacional y de inteligencia, ha sido posible determinar que las áreas aptas para la ejecución de operaciones aéreas ilícitas con aeronaves de bajo *performance*, generalmente, se ubican en el interior de propiedades privadas (palmicultoras e ingenios azucareros, entre otras) en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Los Ríos y Guayas. Además, se han presentado indicios del uso de infraestructura aeronáutica en Galápagos, luego del incidente relacionado con el robo de una aeronave que estaba bajo custodia policial, en el año 2021. Entre las principales características que han sido identificadas como patrones comunes en las áreas consideradas para la ejecución de operaciones aéreas ilícitas por parte de aeronaves de bajo *performance*, se encuentran:

- a. Selección del área en función de la geografía y las plantaciones existentes.

- b. Adecuación de planadas que van desde los 500 x 5 m, hasta los 2000 x 5 m, las cuales deben poseer una superficie de suelo compacto.
- c. Conformación de complejos de áreas, aprovechando la cercanía entre otras áreas que presentan las mismas características de dimensión, y que se encuentren dentro de un diámetro no mayor a 15 km.
- d. Sectores alejados de poblados, pero que mantengan presencia de colaboradores, reclutados por medio de intimidación y/o asignación económica.
- e. Empleo de equipo pesado para la adecuación de las áreas, en corto tiempo.
- f. Antecedentes de operación de TMI en el área o decomisos de scsf por parte de la Policía Nacional en sectores aledaños.
- g. Vías que conecten al eje vial principal, para soporte logístico.
- h. Selección de lugares en donde existe gran influencia de organizaciones criminales ligadas a grupos narcotraficantes mexicanos, como el Cartel de Sinaloa o el Cartel de Jalisco Nueva Generación.

La Figura 2 detalla las características óptimas para la selección de áreas que permitan ejecutar operaciones aéreas ilícitas.



Figura 2. Parámetros de identificación de un área apta
Fuente: Departamento de Inteligencia Aérea del COAD.

Con base en este punto de partida, se han podido identificar y georreferenciar aquellas áreas del Litoral ecuatoriano que cumplen con las condiciones antes detalladas, obteniendo los resultados detallados en la Tabla 1.

Tabla 1.
Detalle de áreas aptas para la ejecución de operaciones aéreas ilícitas

Provincia	Áreas (2023)
Esmeraldas	09
Manabí	03
Santa Elena	10
Guayas	13
Los Ríos	04
El Oro	02
Total	41

Fuente: Departamento de Inteligencia Aérea del COAD.

Resultados de la fase de intervención

Con el fin de disminuir los requerimientos críticos de las organizaciones narcodelictivas que han ejecutado el TID por vía aérea, se han orientado los esfuerzos coordinados hacia la destrucción y/o inhabilitación de las áreas aptas identificadas en la fase anterior. Cabe señalar que en todo momento ha prevalecido el derecho de propiedad de sus propietarios, ya sean intermediaciones públicas o privadas, para lo cual se realizan las coordinaciones necesarias que permitan obtener las autorizaciones pertinentes.

Como resultado del esfuerzo coordinado entre las autoridades seccionales, la Policía Nacional, las Fuerzas Armadas y el COAD, se han intervenido veintiséis áreas aptas, localizadas en las provincias de Guayas, Santa Elena y Manabí, en donde se ha presentado la mayor parte de los eventos de vuelos ilícitos, lo que ha permitido negar el uso de referidas áreas por parte de las organizaciones narcodelictivas.

Es importante destacar que esta fase, junto con la de preparación, constituyen un ciclo en el sentido de que, a pesar de los esfuerzos coordinados para mantener inhabilitadas las áreas intervenidas, algunas de

ellas han vuelto a ser habilitadas luego de un periodo de tiempo, lo cual se ha podido constatar mediante la ejecución de misiones aéreas de reconocimiento, cuyos resultados, a la fecha, han arrojado la rehabilitación de tres áreas que fueron inhabilitadas en 2022.

Tabla 2.
Áreas aptas 2022 vs. áreas aptas 2023

Provincia	Áreas (2022)		Provincia	Áreas (2023)
Esmeraldas	09		Esmeraldas	09
Manabí	17		Manabí	03
Santa Elena	08		Santa Elena	10
Guayas	18		Guayas	13
Los Ríos	10		Los Ríos	04
El Oro	02		El Oro	02
Total	64		Total	41

Fuente: Departamento de Inteligencia Aérea del COAD.

La Tabla 2 detalla la fase de intervención, cuya ejecución es responsabilidad directa del sistema de inteligencia aérea táctica, materializado en las unidades militares dependientes del COAD, que ha dejado como resultado una reducción del 36 % de áreas aptas ubicadas en el Litoral ecuatoriano, dando prioridad a las provincias donde existe mayor incidencia de TNI.

Resultados de la fase de acción directa (reacción)

Es importante destacar que uno de los componentes neurálgicos para que la propuesta planteada sea efectiva es el sistema de detección, el mismo que se encuentra materializado y centralizado en los CMC. Desde el año 2017, se implementaron referidos centros con los equipos LTR-20 que, en forma permanente, ejecutan la vigilancia y el control del espacio aéreo nacional, permitiendo al comandante operacional dirigir la conducción directa de las operaciones mediante una oportuna toma de decisiones. A raíz de este acontecimiento, se han obtenido los siguientes resultados sobre las incidencias de TNI vinculadas al narcotráfico (Tabla 3):

Tabla 3.
Detalle de TNI que ingresaron a Ecuador en el periodo 2018-2022

Año	Fecha	Esmeraldas	Guayas	Manabí	Sta. Elena	Total
2018	04-mar		1			1
Total 2018			1			1
2019	01-abr			1		1
	10-mar			1		1
	13-abr		1			1
	20-may	1				1
	24-nov			1		1
	29-abr		1			1
Total 2019		1	2	3		6
2020	10-ago		1			1
	22-oct			1		1
	24-jun			1		1
	29-mar			1		1
Total 2020		1	3			4
2021	02-mar				1	1
	15-oct		1		1	2
	18-feb	1				1
	22-nov				1	1
	27-abr		1			1
	28-may		1			1
Total 2021		1	3		3	7
2022	07-nov				1	1
	07-oct		1			1
	11-nov				1	1
	18-abr		1			1
	19-ago		1			1
	24-abr		1		1	2
Total 2022			4		3	7
Total		2	11	6	6	25

Fuente: Departamento de Inteligencia Aérea del COAD.

La Tabla 3 detalla los TNI vinculados al narcotráfico suscitados en territorio ecuatoriano desde el año 2018, arrojando un total de veinticinco casos. Este periodo ha sido el más productivo para la detección y la interdicción de aeronaves vinculadas con el narcotráfico, lo que representa el 57% del total de

casos¹, con un promedio de cinco casos por año. Por otra parte, los diecinueve casos restantes se suscitaron en un periodo de catorce años, con un promedio de 1,35 casos por año. Estos datos también permiten corroborar que, con la implementación de los CMC y los equipos radar LTR-20, se mejoró la capacidad de detección TNI que vulneran el espacio aéreo marítimo ecuatoriano con proyección hacia el territorio continental.

Es importante señalar que los datos presentados corresponden a incidencias alertadas y/o detectadas por el Sistema de Defensa Aérea ecuatoriano; sin embargo, no todos ellos fueron intervenidos en el país. Debido al oportuno intercambio de información, producto de la colaboración interagencial con organismos de inteligencia aérea de la región, varios TNI que operaron en el Ecuador fueron intervenidos en México.

Tabla 4.
Detalle de TNI que operaron en Ecuador y fueron intervenidos en México

Año	Fecha	México
2021	05-dic	1
	05-jun	1
	16-oct	1
	22-nov	1
Total 2021		4
2022	07-nov	1
	07-oct	1
	19-ago	1
	24-abr	1
Total 2022		5
Total		9

Fuente: Departamento de Inteligencia Aérea del COAD.

Como se puede interpretar de la Tabla 4, el intercambio de información entre Ecuador y los organismos de inteligencia aérea de México ha permitido intervenir varios casos de TNI que tuvieron lugar en el país en los años 2021 y 2022. En un comparativo entre

¹ De 2003 a la fecha, se han suscitado 44 casos de TNI vinculados al narcotráfico y que han operado en territorio ecuatoriano.

la Tabla 3 y la Tabla 4, se obtiene que, de los siete casos de TNI que operaron en Ecuador en 2021, cuatro fueron intervenidos en México, lo cual representa el 57 % de casos. Por otro lado, de los siete casos de TNI que operaron en Ecuador en 2022, cinco fueron intervenidos en México, lo cual representa el 71 % de casos.

Por su parte, las operaciones de intervención de TNI dentro del territorio ecuatoriano han alcanzado su éxito gracias al trabajo coordinado entre la Fuerza Aérea y las unidades especializadas de la Policía Nacional, especialmente la Unidad de Investigaciones Antinarcóticos (UIAN). Finalmente, es relevante destacar que, hasta julio de 2023, no se han registrado incidencias de TNI vinculadas al narcotráfico dentro del espacio aéreo ecuatoriano.

Discusión

Para comprender la complejidad que implica la ejecución de una misión aérea de interdicción por parte de la FRI ante un alertamiento de TNI, es necesario conocer que la mayoría de estas incidencias se han presentado en horarios nocturnos (20:00-04:00), lo cual dificulta la identificación visual de las aeronaves a ser interdictadas. Sumado a esto, se encuentra la altura a la que se realizan los vuelos ilícitos, que no sobrepasa los 500 pies, lo cual genera que la detección y el seguimiento radar sea limitado debido a la orografía del territorio continental ecuatoriano.

Así mismo, las posibilidades de utilizar varias pistas no controladas por la DGAC o áreas aptas se incrementan ante sus condiciones de operatividad y ante la proyección del TNI hacia un determinado sector, generando que exista una mayor dificultad cuando las unidades especializadas de las Fuerzas Armadas y la Policía Nacional tengan que intervenir en tierra a dichas aeronaves. Para solventar estas falencias, se adoptó la propuesta detallada, la cual permite fasear la intervención por parte de todos los organismos participantes (escuadrones operativos, defensa aérea e inteligencia aérea).

La fase de preparación ha alcanzado los resultados esperados, especialmente en cuanto a la materialización de una base de datos georreferenciada, la cual orienta el esfuerzo de búsqueda de información hacia las áreas de interés, optimizando tiempo y enfocando las misiones aéreas de reconocimiento. Así mismo, ha permitido focalizar los pedidos de imágenes satelitales hacia zonas estratégicas que permiten proyectarse hacia la posibilidad de utilización de otras áreas no consideradas. Desde su implementación, se han identificado 64 áreas aptas y se han registrado el 100 % de las pistas autorizadas por la DGAC, segregando aquellas que carecen de control por parte de la autoridad aeronáutica del país.

Por su parte, la fase de intervención ha permitido hasta el momento inhabilitar el 36 % de áreas aptas para la ejecución de operaciones aéreas ilícitas, reduciendo las posibilidades de operación por parte de los TNI hacia zonas que, ante un alertamiento oportuno, son inmediatamente controladas por las unidades especializadas de las Fuerzas Armadas y la Policía Nacional. En esta fase, se deberá analizar la posibilidad legítima, legal y necesaria para ejecutar procedimientos de inhabilitación definitiva de las áreas consideradas como aptas; así como las pistas DGAC que no presentan operaciones aéreas recurrentes y, sin embargo, continúan autorizadas por parte de mencionado organismo.

Finalmente, la fase de acción directa (reacción), constituye la esencia de la Fuerza Aérea, y ha dejado los resultados más evidentes, ya que la FRI ha logrado interdicción de veinticinco² TNI que, posteriormente, han sido intervenidos y/o detenidos tanto en el país como en México. Así mismo, el sistema de inteligencia aérea operativa ha reaccionado oportunamente ante el alertamiento de trazas ilícitas, orientando la conducción y decisión del comandante operativo; y, mediante la compartimentación de información útil y efectiva, en tiempo real, se han logrado resultados positivos por parte de las unidades tácticas en tierra.

² Periodo comprendido entre 2018 y 2022, posterior a la implementación de la propuesta presentada.

Conclusiones

Como conclusión, se ha podido determinar que los TNI vinculados al narcotráfico que han operado en el Ecuador aprovechan la infraestructura aeronáutica del país, en lo referente a las pistas registradas y autorizadas por la DGAC, especialmente aquellas no controladas. Así mismo, se valen de áreas geográficas que presentan características propicias para la ejecución de operaciones aéreas con aeronaves de bajo *performance*, pues se destacan su extensión (> 500 x 5 m), su compactación de suelo y sus conexiones viales. Las áreas de mayor interés para ejecutar estas operaciones aéreas ilícitas se ubican en el Litoral ecuatoriano.

El éxito alcanzado en las diferentes misiones aéreas de interdicción de estos TNI se da como resultado del trabajo coordinado entre el comandante del nivel operativo, los escuadrones aéreos, el Sistema de Defensa Aérea, el análisis y procesamiento de información por parte del sistema de Inteligencia Aérea, y las unidades especializadas de las Fuerzas Armadas y la Policía Nacional, quienes constituyen un equipo de trabajo multidisciplinario y sinérgico, bajo un mando centralizado y una ejecución descentralizada.

Es importante señalar que las labores de inteligencia para reducir las operaciones aéreas ilícitas se han venido desarrollando de manera constante desde el año 2012. En este sentido, en los registros estadísticos que reposan en el Departamento de Inteligencia Aérea del COAD, existen 44 incidentes de TNI vinculados con el narcotráfico, de los cuales más del 50% fueron detectados en los últimos cinco años, guardando relación directa con la implementación de la propuesta planteada.

Un factor fundamental ha sido el oportuno intercambio de información con organismos de inteligencia aérea de la región, especialmente de México; así como la eficiente compartimentación de información con las unidades especializadas de Fuerzas Armadas y Policía Nacional, lo cual ha permitido la exitosa intervención y detención de cargamentos, aeronaves y sus tripulaciones, suscitados en Ecuador o México.

El análisis y procesamiento de la información por parte del sistema de inteligencia aérea operativa ha aportado significativamente en el asesoramiento para la toma de decisiones durante la ejecución de las misiones aéreas de interdicción, ya que ha permitido al comandante operativo, a través del CMC, direccionar a la FRI hacia las posibles áreas de aterrizaje; y, al mismo tiempo, realizar la compartimentación de información con las unidades tácticas en tierra para complementar referidas interdicciones.

Referencias

- Avilés Farre, J. (2005). Las amenazas globales del siglo XXI. *Arbor*, 180(708), 247-268. <https://doi.org/10.3989/arbor.2005.i709.506>
- Beliz, G. (2012). *Gobernar la seguridad ciudadana en América Latina y el Caribe: amenazas, desafíos y nudos estratégicos de gestión*. Banco Interamericano de Desarrollo. <http://dx.doi.org/10.18235/0007623>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (cepal). (2022). *Base de datos y publicaciones estadísticas* [en línea]. <https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=3&lang=es>
- Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE). (2020). *Manual de Instrucción de Planificación por Capacidades*. FAE.
- Gallardo-Castañeda, M. (2019). Riesgos y amenazas para la seguridad multidimensional. *Transformaciones estratégicas globales, retos y repercusiones* (Academia de Guerra Ejército de Chile, ed.; pp. 65-83). Centro de Estudios Estratégicos CEEAG.
- Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito (UNODC). (2020). *Informe Mundial sobre las Drogas 2020* [en línea]. <https://wdr.unodc.org/wdr2020/index2020.html>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2004, 2 de diciembre). *Asamblea General: Quincuagésimo noveno período de sesiones. A/59/565* [en línea]. <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n04/602/34/pdf/n0460234.pdf>
- World Economic Forum (WEF). (2022, 11 de enero). *The Global Risks Report 2022* [en línea]. <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2022/>

Fundamentos y estructura del Colegio del Aire

| Fecha de recibido: 28 de junio de 2024 | Fecha de aprobado: 24 de agosto de 2024 |

| Reception date: June 28, 2024 | Approval date: August 24, 2024 |

| Data de recebimento: 28 de junho de 2024 | Data de aprovação: 24 de agosto de 2024 |

Germán Barragán-Chávez

<https://orcid.org/0000-0002-4244-4510>

directorpraxis@gmail.com

Mag. Educación con Innovación de la Práctica Docente
Profesor asignatura del Colegio del Aire - Centro Universitario de Ciencias
Económico-Administrativas, Universidad de Guadalajara, México
Rol del investigador: teórico y escritura

Master in Education with Innovation in Teaching Practice
Professor at Colegio del Aire - Centro Universitario de Ciencias
Económico-Administrativas, University of Guadalajara, Mexico
Researcher's role: theoretical and writing

Mestrado em Educação com Inovação na Prática Docente
Docente no Colegio del Aire - Centro Universitario de Ciencias
Económico-Administrativas, Universidad de Guadalajara, México
O papel do investigador: teórico e escritor

Cómo citar este artículo: Barragán-Chávez, G. (2025). Fundamentos y estructura del Colegio del Aire.
Ciencia y Poder Aéreo, 20(1), 114-127. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.828>



Fundamentos y estructura del Colegio del Aire

Resumen: El principal problema en la Educación Superior Militar es la escasa información que hay sobre ella, se sabe poco y en México se publica menos. En la educación militar, como en otros sistemas educativos, los éxitos o los fracasos dependen de la forma como se lleva a cabo la gestión, la planeación estratégica y los procesos para operar dicha planeación. Tales posibilidades son naturales, como en todas las organizaciones, desde la forma como se diseña su estructura, la planeación, las estrategias y las tácticas operacionales, hasta la administración.

Esta investigación se llevó a cabo con el objetivo de explorar la gestión que se realiza en el Colegio del Aire, una institución de educación superior del sistema educativo militar de México, para identificar su concepción, normatividad, estructura, financiamiento y la planeación estratégica que se realiza en ella. Se trata de una investigación documental, con enfoque cualitativo desde una visión analítica, a través de la revisión y el análisis de documentos oficiales que permitan identificar sus políticas, normatividad, gobernabilidad, gobernanza, administración, planeación estratégica y su financiamiento. Se destaca que la educación militar en México tiene más de doscientos años. La institución analizada fue fundada en 1959, tiene virtudes como reconocimiento en la formación de oficiales de la Fuerza Aérea Mexicana para dar certeza en la seguridad del espacio aéreo, tiene especialistas en la aeronáutica y la administración militar, y tiene fortalezas al ser una organización consolidada. Como oportunidades, está la de vincularse con otras instituciones educativas civiles, y la gestión y la planeación estratégica son áreas que merecen ser mejoradas.

Palabras clave: administración educativa; educación superior militar; financiamiento; gestión de la educación, planeación estratégica.

Fundamentals and structure of the Colegio del Aire

Abstract: The main issue in Higher Military Education is the lack of information about it—little is known, and even less is published in Mexico. In military education, as in other educational systems, success or failure depends on how management, strategic planning, and the processes for operating that planning are carried out. These possibilities are natural, as in all organizations, from the way its structure is designed, the planning, strategies, and operational tactics, to administration.

This research was conducted with the objective of exploring the management practices at the Air College, an institution of higher education within Mexico's military education system, to identify its conception, regulations, structure, funding, and strategic planning. It is a documentary investigation with a qualitative approach from an analytical perspective, through the review and analysis of official documents to identify its policies, regulations, governance, administration, strategic planning, and funding. It is worth noting that military education in Mexico has over two hundred years of history. The institution analyzed was founded in 1959 and has strengths, such as recognition in the training of Mexican Air Force officers to ensure the security of airspace. It also has specialists in aeronautics and military administration and is a consolidated organization. Opportunities include forming partnerships with other civilian educational institutions, and management and strategic planning are areas that deserve improvement.

Keywords: Educational administration; higher military education; funding; education management; strategic planning.

Fundamentos e estrutura do Colegio del Aire

Resumo: O principal problema na Educação Militar Superior é a escassez de informações sobre o tema—sabe-se pouco e no México se publica ainda menos. Na educação militar, assim como em outros sistemas educacionais, os sucessos ou fracassos dependem da forma como são realizadas a gestão, o planejamento estratégico e os processos para operar esse planejamento. Essas possibilidades são naturais, como em todas as organizações, desde a forma como sua estrutura é desenhada, o planejamento, as estratégias e táticas operacionais, até a administração.

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de explorar a gestão no Colégio do Ar, uma instituição de educação superior do sistema educativo militar do México, para identificar sua concepção, normatividade, estrutura, financiamento e planejamento estratégico. Trata-se de uma pesquisa documental, com abordagem qualitativa a partir de uma visão analítica, por meio da revisão e análise de documentos oficiais que permitam identificar suas políticas, normatividade, governabilidade, governança, administração, planejamento estratégico e financiamento. Destaca-se que a educação militar no México tem mais de duzentos anos. A instituição analisada foi fundada em 1959 e possui virtudes como o reconhecimento na formação de oficiais da Força Aérea Mexicana para assegurar a segurança do espaço aéreo. Conta com especialistas em aeronáutica e administração militar, e possui fortalezas como organização consolidada. Entre as oportunidades está a de se vincular a outras instituições de ensino civis, e a gestão e o planejamento estratégico são áreas que merecem ser aprimoradas.

Palavras-chave: Administração educacional; educação superior militar; financiamento; gestão da educação; planejamento estratégico.

Introducción

Este estudio se llevó a cabo en el Colegio del Aire, una de las instituciones de educación superior perteneciente al Sistema Educativo Militar de México. Allí, se forma a los especialistas de la Fuerza Aérea Mexicana (FAM), cuyos profesionistas egresados servirán en funciones y de acuerdo con lo establecido en la legislación, los fundamentos y la estructura de la Secretaría de la Defensa Nacional de México (Sedena). A su vez, el estudio forma parte de un proyecto de investigación doctoral titulado “Gestión Formativa en el Sistema Educativo Militar”.

La Educación Superior Militar para muchos es un enigma, se sabe poco y en México se publica menos; por lo tanto, es una de las principales situaciones a atender en esta investigación. El principal problema que se señala aquí es la escasa o nula información que se publica sobre la educación militar en México.

En esta línea de conocimientos, algunos de los especialistas en educación militar y en el estudio de las Fuerzas Armadas coinciden en la filosofía conservadora, tradicionalista y hasta “lineal” que tienen dichas instituciones. Klepak (2012) expresa que las instituciones de educación militar corren y se responsabilizan de los riesgos que involucran sus éxitos o fracasos, los cuales pueden ser tan naturales como en otras organizaciones y que dependerán de los enfoques que se planteen para su organización, del diseño de su estructura organizacional, de la planeación estratégica que realicen y de las tácticas operacionales que lleven a cabo, así como del financiamiento, la administración y la gestión que se realiza allí.

Para reforzar lo anterior, en un estudio realizado en Ucrania, Panfilov y Petrova (2018) señalan que las prácticas militares doctrinales conducen a la rigidez en la estructura de la organización militar y reducen las posibilidades de adoptar nuevas condiciones a su existencia.

Como lo describe la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2019), los trece subsistemas públicos y privados que representan a la educación superior en México enfrentan desafíos,

retos y oportunidades. Se consideran como las principales: la revisión de las políticas para el acceso, la calidad de los procesos educativos y las oportunidades que brindan.

Ante esta situación y los desafíos que tiene la educación en México, se toma la gran oportunidad y con entusiasmo la posibilidad de explorar cómo funciona y lo que se realiza en el Sistema Educativo Militar para transferir las políticas públicas sobre educación. Estas se han generado para las nuevas funciones de los militares del país en la seguridad del espacio aéreo, la seguridad pública, las actividades militares correspondientes y las funciones como profesionales en sus respectivas especialidades dentro del Ejército mexicano y la FAM.

Adicional a lo anterior, Gutiérrez-Albán *et al.* (2019) describen que la educación militar debe comenzar por cumplir determinados objetivos, como alcanzar una mayor y mejor relación con las universidades de sus respectivos países. También, requiere integrarse al sistema de educación superior para comenzar el proceso de validación nacional e internacional de sus ofertas académicas, a fin de incorporar métodos y experiencias universitarias de otras instituciones en las actividades de los alumnos y profesores de dichos planteles militares.

Para este artículo, se entenderá como gestión lo que describe Casassus (1998) al relacionar eficazmente la organización, sus estructuras, sistemas, modelos, capacidades, la gente y los objetivos con una buena estrategia. Se muestra como una gran responsabilidad u oportunidad para adaptarse a la nueva realidad que viven las instituciones educativas militares, a fin de seguir de la mano de las nuevas políticas educativas militares y de la nueva ley general de educación superior en México.

En la razón de esta lógica, se establece el siguiente cuestionamiento: ¿cuáles son las bases, los fundamentos y la estructura para el funcionamiento del sistema educativo militar en México? Con este planteamiento, se pretende explorar cómo funciona el sistema educativo militar, y describir las bases con que fue creado y su estructura organizacional, tomando en consideración la teoría organizacional desde el

modelo culturalista que ofrece una perspectiva muy exclusiva al ser una institución educativa militar con una cultura determinada.

Metodología

Esta investigación es de orientación documental y de campo. Se realizó bajo un enfoque cualitativo, y desde una perspectiva analítica, para explorar la creación, la normatividad, el financiamiento, la función, la organización, la planeación estratégica y la administración de los presupuestos de egreso e ingreso de la educación superior militar en México. Como caso de estudio, se contempló el Colegio del Aire con la finalidad de explorar su historia, la gestión, las condiciones, las fortalezas, las oportunidades y las posibles debilidades que presenta. La idea es plantear sugerencias y recomendaciones que les permitan fortalecer las estructuras organizacionales, mejorar los procesos, actualizar los programas educativos y promover el robustecimiento de la planeación estratégica.

La teoría de las organizaciones se enfoca en el estudio de las estructuras y los procesos organizacionales. Las instituciones de educación superior militar son organizaciones que requieren ser estudiadas en la interacción entre los miembros de la organización y su entorno. Como lo señalan Di Maggio y Powell (1994), existen organizaciones que generan una tendencia de isomorfismo normativo y coercitivo, en la cual se produce una influencia de normas profesionales, creencias compartidas y valores que llevan a las organizaciones a adoptar prácticas comunes para ganar legitimidad y aceptación en su entorno, las regulaciones gubernamentales, las normas del sector militar y las prácticas similares para cumplir con estas exigencias.

Desde la perspectiva de Robbins y Judge (2020), la teoría de las organizaciones militares puede dividirse en tres enfoques principales: el enfoque clásico, el enfoque humanista y el enfoque contingente. El enfoque clásico se centra en la eficiencia y la estructura organizativa en el ámbito militar, mientras que el enfoque humanista se ajusta a las necesidades y

motivaciones de los soldados y el personal militar, de tal manera que se alinea con el análisis de este estudio.

Resultados de la investigación

Historia del sistema educativo militar

La Educación Militar en México, como lo describe García (2017), tiene una historia de más de doscientos años, anterior a la conquista europea. En ese entonces, los guerreros aztecas o mexicas recibían su formación militar desde una edad temprana en escuelas que los formaban como hombres de liderazgo, destreza militar, fuerza para el combate y para la dirección de los distintos ejércitos que comandaban. El Calmécac era una institución educativa en la cultura azteca donde se formaban a los hijos de los guerreros, nobles y sacerdotes. En dicha institución, se daban las primeras enseñanzas del arte militar, cultura y formación para el mando (López, 2003).

Según Fernández (2008), en términos de la educación militar organizada, la historia comienza en la época colonial. Durante la colonización española, se establecieron varias instituciones educativas militares en México, como el Colegio de San Ildefonso, que se fundó en 1551 como una institución destinada a la educación de los hijos de los nobles españoles y se centraba en la formación de líderes civiles y militares.

Sin embargo, para la Sedena (2019) el primer antecedente de una escuela militar está fechado en 1765, cuando se ordenó construir una escuela de artillería en Veracruz y otra en la actual Ciudad de México con el método de enseñanza que se llevaba a cabo en España, aunque dicha institución militar no llegó a culminarse.

Con la información que brindan Fernández (2008) y la Sedena (2019), había algunas escuelas militares en el siglo XVIII, pero con la política que hubo durante la Nueva España no se permitía el acceso a hijos de españoles nacidos en México, ni a los mestizos para convertirse en cadetes. Esa categoría se les asignaba, y se les asigna actualmente, a los alumnos de las escuelas militares, quienes siguen siendo aspirantes a oficiales.

Tenían, entonces, un trato discriminatorio o una concepción de elitismo, ya que los graduados de dichas escuelas podían convertirse en oficiales y ascender hasta obtener altas jerarquías en el Ejército.

La misma Sedena (2019) establece que hubo razones familiares, sociales y de estatus para que Diego García Conde le propusiera al gobierno de la Nueva España en 1817 llevar a cabo la creación de un Colegio Militar que formara oficiales del Ejército y que los cadetes recibieran una enseñanza sobre la profesión militar. Dicha propuesta se hizo realidad conforme la Independencia de México se consumaba. El primer nombre que recibió ese colegio militar fue Academia de Cadetes; finalmente, en 1822, quedó instalada la institución en el edificio que alguna vez albergara a la Santa Inquisición y quedó como primer director el general Diego García Conde. La duración del nombre fue efímera, pues el 11 de octubre de 1823, el General José Joaquín Herrera, quien era el ministro de Guerra y Marina de aquella época, expidió un decreto que fundó el Colegio Militar y lo trasladó al estado de Veracruz, al que se le llamó Colegio Militar de Perote (Sedena, 2019).

En la actualidad, la educación militar y el sistema educativo militar en México son administrados por la Sedena y cuentan con varias instituciones educativas, incluyendo al Heroico Colegio Militar, el Colegio del Aire, el Colegio de Defensa Nacional y la Escuela Militar de Medicina, entre otras más de once escuelas militares que forman, educan, adiestran y enseñan la filosofía y la axiología de la institución a los futuros oficiales y líderes del Ejército mexicano y la FAM ahora en un nivel superior (pregrado y posgrado).

Historia del Colegio del Aire

El Colegio del Aire tuvo sus orígenes en 1959, con una iniciativa del general de división piloto aviador Roberto Fierro Villalobos, quien en aquella época era jefe de la FAM. A él se le atribuye haber impulsado el proyecto de dicha institución educativa militar para integrar a las escuelas de la Fuerza Aérea y desarrollar homogeneidad en la enseñanza militar con especialidad en

aeronáutica. El 9 de septiembre de 1959, se expidió el decreto por el cual se instaura la creación del Colegio del Aire en las instalaciones de la Base Aérea Militar N.º 5, inauguración que se realizó durante la gestión del presidente Adolfo López Mateos, siendo designado como primer director del Colegio del Aire el general piloto aviador Roberto Salido Beltrán. La institución tiene como misión “preparar profesionalmente al personal de la Fuerza Aérea Mexicana” (Sedena, 2022a).

Creación del Colegio del Aire

Fundamentos legales en la Constitución

Los fundamentos legales que llevan a la creación del Colegio del Aire se describen en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Se contempla el derecho a la educación en los diferentes niveles educativos y en las obligaciones que tienen los mexicanos a que sus hijos reciban educación, incluso la educación militar.

El Artículo 3 señala que toda persona tiene derecho a la educación, que es obligatoria, universal, inclusiva, pública, gratuita y laica. En el Artículo 25, se describe que le corresponde al Estado el desarrollo nacional y el empleo con un ingreso justo, permitiendo el acceso a la riqueza. Mientras que el Artículo 31 señala las responsabilidades y obligaciones de los mexicanos; en su párrafo 1, los padres son responsables de la educación de sus hijos, requieren supervisar que reciban la educación obligatoria, y, en su caso, reciban la educación militar; en el párrafo 2, muestra como parte de las responsabilidades y obligaciones recibir instrucción cívica y militar para ser diestros en el uso de las armas y versados de la disciplina militar.

Constitución legal histórica del Colegio del Aire

El Colegio del Aire se instituyó históricamente a través de dos decretos presidenciales, uno llevado a cabo por el titular del Poder Ejecutivo, el general Lázaro

Cárdenas del Río. Como lo dispone el Diario Oficial de la Federación, data del 24 de junio de 1938, cuando se expide el Reglamento de la Dirección General de Educación Militar, que en su Artículo 2 le brinda la facultad de supervisar las labores educativas en las Escuelas Militares. Otro decreto fue el ordenado por el entonces presidente de la República Adolfo López Mateos, con fecha del 9 de septiembre de 1959, en el que se establece la creación del Colegio del Aire como una institución necesaria para el buen funcionamiento de la FAM.

a cabo en una institución que canalice y concentre el esfuerzo educativo hacia los objetivos comunes; adicional a eso, que los recursos derogados se centrarán en una y no en múltiples instituciones.

Contexto del sistema educativo militar

El sistema educativo militar forma parte del Sistema Educativo de México como un subsistema. Se imparte educación superior, media superior y de especialización técnica del Ejército mexicano y la FAM. Lo integran las distintas instituciones de educación militar que forman en las distintas áreas del conocimiento, y por la especialidad técnica que así lo requiere, para cumplir con la formación del recurso humano que demanda la Sedena; también lo capacita, actualiza, adiestra y profesionaliza de acuerdo con los requerimientos que establecen las políticas, la filosofía, la axiología, los objetivos y las líneas de acción de la misma dependencia, a fin de realizar las actividades y funciones que así se demandan según las especialidades técnicas, profesionales y de mando (Sedena, 2023).

El sistema educativo militar se supedita a las indicaciones, necesidades, normativas y estrategias de la Sedena; se administra y se gestiona a través de la Dirección General de Educación Militar y la Rectoría de la Universidad del Ejército y Fuerza Aérea, para lo cual se ordena su operación a través de su propia legislación y normatividad por medio de la Ley General de Educación Militar y su reglamento.

La operatividad del sistema educativo militar se distribuye en sus instituciones, identificadas como: colegios, escuelas, unidades, institutos y dependencias donde se imparte la educación militar. Allí coinciden y se forman alrededor de 13 000 estudiantes, quienes desarrollan sus capacidades profesionales bajo una estructura académica, escolar y formativa diferente a la usualmente empleada en las universidades del país. Dos de las instituciones más relevantes que conforman el sistema educativo militar, con un nivel de reconocimiento nacional e internacional, son el Heroico

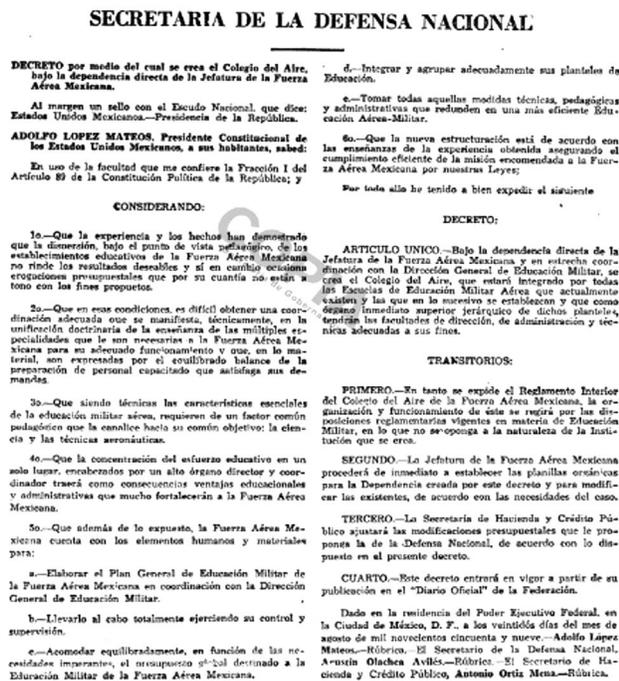
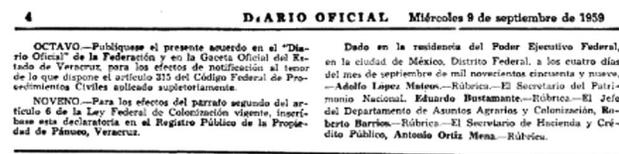


Figura 1. Decreto creación del Colegio del Aire
Fuente: Diario Oficial de la Federación, 1959.

Se argumenta en los Artículos 1, 2, 3 y 4 del decreto de creación publicado en 1959 (Figura 1) que la experiencia, el conocimiento y las necesidades instauran la unificación axiológica y doctrinaria, y la enseñanza de las especialidades, ciencias y técnicas de la aeronáutica, que es más conveniente para la nación y la enseñanza. Por lo tanto, deciden que ese proceso se lleve

Colegio Militar y el Colegio del Aire; el primero lleva a cabo la formación de los líderes, mandos y especialistas de la seguridad en tierra, mientras que el segundo forma a los especialistas que desempeñarán sus funciones en la FAM para mantener la seguridad aérea, fortalecer el desarrollo aeroespacial del país y conservar la seguridad del espacio aéreo mexicano.

Por lo tanto, se puede señalar que el sistema educativo militar es el que forma, capacita y profesionaliza al recurso humano que requiere la Sedena para cubrir las vacantes y los requerimientos de personal que se desempeñarán en actividades militares, profesionales y de mando en las distintas dependencias, organizaciones, instituciones y establecimientos militares. Entonces, se consideraría que el sistema educativo militar es el ofertante, en tanto que la Sedena y los alumnos son los demandantes de la educación que ofrece el sistema educativo.

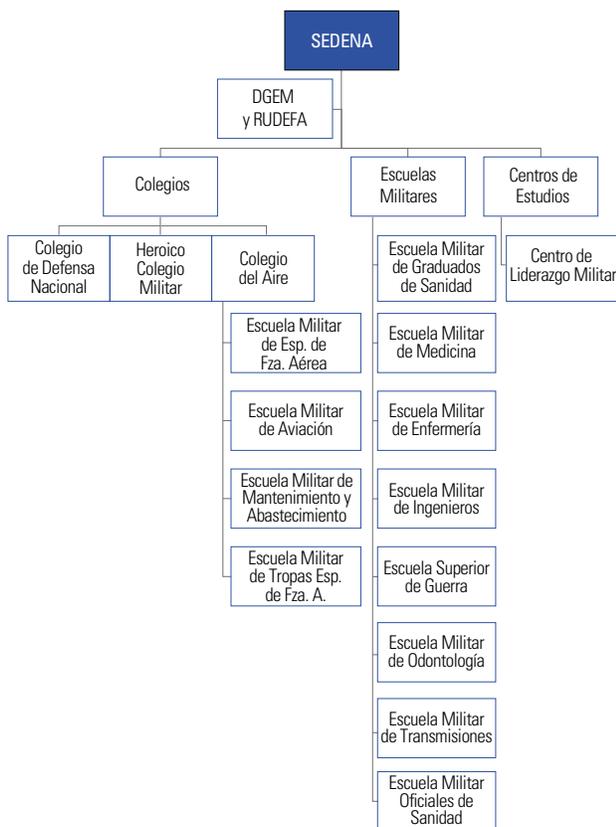


Figura 2. Distribución del sistema educativo militar en México
Fuente: elaboración propia a partir de documentos de la Sedena (2022c).

El Colegio del Aire

El Colegio del Aire, como lo señala la Sedena (2019), es una institución del sistema educativo militar de México que a partir del 1 de septiembre del 2015 elevó el nivel de estudios, como la mayoría de las instituciones de ese sistema, a un nivel superior o terciario en los distintos programas de estudio que se ofrecen. Su ubicación física se encuentra en la ciudad de Zapopan, Jalisco, al occidente del país, en las instalaciones de la Base Aérea Militar Número Cinco (BAM 5).

En el Colegio del Aire, se encuentran: la Escuela Militar de Aviación (EMA), la Escuela Militar de Especialistas de Fuerza Aérea (EMEFA) y la Escuela Militar de Mantenimiento y Abastecimiento (EMMA). En estas instituciones educativas, se ofrecen las Licenciaturas en Administración Militar, en Seguridad Pública, en Aeronáutica Militar, en Meteorología Militar, en Ingeniería en Electrónica de Aviación y en Ingeniería en Aeronáutica; además, la Maestría en Meteorología. Actualmente, hay alrededor de los 1100 estudiantes y allí se forman los oficiales de la FAM que se emplearán como pilotos aviadores, controladores de vuelo, meteorólogos, mecánicos de aviación, abastecedores de material aéreo, especialistas en electrónica de aviación y armamento aéreo, y militares y especialistas de la FAM.

Gracias a la infraestructura del Colegio del Aire, se cuenta con la factibilidad de llevar a cabo el estudio teórico, simulado y práctico en sus modernas instalaciones, ya que tiene laboratorios con simuladores, herramientas, aeronaves, estaciones meteorológicas y operaciones aéreas, e incluye actividades que permiten desarrollar o impulsar las capacidades profesionales-técnicas de los alumnos que cursan los actuales programas educativos de nivel terciario.

Influencia en el contexto internacional

El Colegio del Aire, desde su fundación, ha mantenido un vínculo educativo y de formación a nivel internacional con otras instituciones militares de Latinoamérica. Además, tiene un acercamiento con los ministerios de otros países, entre ellos Honduras, El Salvador y

Guatemala, recibiendo y formando a integrantes de otros ejércitos internacionales, siguiendo la filosofía que han construido y que, como lo señala la Sedena (2022b), se ha establecido en su visión:

Consolidarse como una institución vanguardista en educación aeronáutica, reconocida a nivel nacional e internacional, por la información competente del personal egresado, acorde a los cambios científicos y tecnológicos mundiales, poseedor de liderazgo, valores, virtudes, vocación de servicio y compromiso institucional, que favorece a la seguridad y desarrollo del país.

Como lo describe Arellano-Gault (2004), cada una de las instituciones del sistema educativo militar en México tiene un ambiente particular, redes interinstitucionales específicas, con filosofía, valores, símbolos, normas y *stakeholders* que dan sentido e interpretación a las acciones que allí se realizan. Es de resaltar que dichas instituciones educativas tienen una situación muy especial por el tipo de profesionistas que forman y las múltiples funciones que realizan los egresados de dichos planteles militares, dado el encargo normativo e institucional.

De acuerdo con el Programa Sectorial de la Defensa Nacional 2020-2024, se expresa como parte de la “Relevancia del Objetivo Prioritario 3: Contribuir a preservar la Seguridad Nacional y garantizar la Seguridad Interior”. A su vez, dispone que se mantiene la participación en actividades cívicas y deportivas para conservar la amistad entre las naciones, además de desarrollar vínculos de cooperación con otras naciones y organismos internacionales.



Figura 3. Alumnos del Colegio del Aire en desfile cívico-militar en París (Francia)
Fuente: Sedena (2022a).

En el mismo contexto sobre la internacionalización del sistema educativo militar, se puede dar a conocer que hay prácticas de colaboración internacional, ya que hoy en día en el Colegio del Aire se forma profesionalmente a siete alumnos extranjeros, de Guatemala, El Salvador y Honduras. Así, se sigue la Estrategia Prioritaria 3.5 del Programa Sectorial de la Defensa Nacional, en la que se establece cooperar internacionalmente y proyectar al Ejército mexicano y a la FAM para fortalecer las capacidades institucionales. Con este objetivo, se describen acciones puntuales:

- Mostrar a nivel internacional la disciplina del Ejército mexicano y de la FAM en eventos cívicos, militares y culturales para mantener en buen estado las relaciones con otros países.
- Concretar la reciprocidad en capacitación y adiestramiento con otras fuerzas armadas.
- Impulsar la participación en competencias internacionales.

Además de la acción 6.4.1. “Fortalecer la capacitación del personal militar en materia de Derechos Humanos y Derecho Internacional Humanitario, mediante cursos, conferencias, seminarios y talleres nacionales e internacionales”, otras acciones de internacionalización o de influencia a nivel internacional se señalan en la Ley de Educación Militar del Ejército y Fuerza Aérea Mexicanos (2022). Allí se ordena, en la sección segunda, lo relacionado con los estudiantes extranjeros que forman parte del sistema educativo militar en México, y se describe lo siguiente: “Artículo 32.- La Sedena dará a conocer y ofrecerá a los Ministerios de Defensa



Figura 4. Alumnos del Colegio del Aire en desfile cívico-militar en Pekín (China)
Fuente: Sedena (2022a).

extranjeros, los cursos, capacitaciones y oferta académica disponible para que el personal de dichos países realice estudios en el sistema educativo militar”.

Planeación estratégica del Colegio del Aire

Toda organización e institución de educación superior instauro sus mecanismos de planeación estratégica con bases sólidas que le permitan llegar al cumplimiento de las metas y los objetivos trazados. Como lo señala Lemaitre (2018), las organizaciones e instituciones valoran los procesos de aseguramiento de la calidad, y lo importante es contar con un marco normativo que permita vislumbrar el desarrollo de las instituciones de educación superior, a través de procesos de planeación, para mejorar los estándares de calidad en el conjunto de los sistemas educativos u organizacionales.

Para analizar la planeación estratégica del Colegio del Aire, se ha decidido revisar el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024, el Programa Sectorial de la Defensa Nacional, el Plan General de Educación Militar y la conjunción entre ellos.

Plan Nacional de Desarrollo de México (PND)

Según lo señala la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal), un PND debe ser una herramienta que permita coordinar acciones entre distintos representantes del sector público, privado y de la sociedad civil para alcanzar los objetivos establecidos. El PND debe ser un documento de carácter participativo que involucre a los grupos interesados en la definición de metas y estrategias, de manera que sea una herramienta que refleje los requerimientos y las necesidades de la población.

La Cepal también enfatiza que un PND debe tener una visión integral del desarrollo, que no solo incluya aspectos económicos, sino también sociales y ambientales. Asimismo, debe ser un plan flexible y adaptable,

capaz de responder a cambios en el entorno nacional e internacional, y contar con mecanismos que revisen, evalúen y midan el avance hacia los objetivos establecidos.

En México, de acuerdo con la Constitución Política, se establece con carácter o rango constitucional el tema de la planeación estratégica. Según el Artículo 26, inciso A, el Estado organizará la planeación con mecanismos democráticos que lleven al crecimiento del país, que requiere o debe determinar los objetivos de dicha planeación, y se hará conforme a las estrategias y los instrumentos que establezca la misma ley.

En la Ley de Planeación, en su Artículo 21, se señala que el PND deberá contener por lo menos lo siguiente:

- I. Un análisis general;
- II. Los ejes o temas de mayor importancia, que impulsen el crecimiento;
- III. Los objetivos específicos que determinen lo que se desea lograr y que permitan atender los temas prioritarios identificados en el diagnóstico;
- IV. Las estrategias para llevar a cabo las acciones que lleven al logro puntual;
- V. “Los indicadores de desempeño y las metas que permitan dar seguimiento al logro de los objetivos definidos en el Plan, y todo aquello que permita el logro de los objetivos”.

En el caso del proceso de elaboración, discusión, análisis, entrega y publicación del PND del periodo de gobierno 2018-2024, sucedió algo que ni los mismos miembros de ese gobierno se esperaban. De acuerdo con la Gaceta Parlamentaria 5266-xviii y el Diario Oficial de la Federación, se presentaron dos PND: uno creado o recabado por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, que cumple con las especificaciones normadas en la Ley de Planeación; y otro presentado por el Ejecutivo Federal, en el cual muestra una serie de elementos discursivos de origen político, donde se expresan cuestiones que parecieran ideas filosóficas que quieren transmitir a las masas un mensaje doctrinario, ya que carece de lo elemental establecido para un PND de un país.

Aun con esta situación localizada respecto a lo que se autorizó por las Cámaras de diputados y senadores, se diseñaron programas sectoriales para cada área de interés. Para esta investigación sobre el Colegio del Aire, institución perteneciente al sistema educativo militar, se tomó en cuenta la planeación y los objetivos establecidos en el Programa Sectorial de la Defensa Nacional 2020-2024, donde una de las acciones puntuales es: “Fortalecer el sistema educativo militar”.

Estructura institucional del Colegio del Aire

El Colegio del Aire, al ser una institución de educación superior militar perteneciente al sistema educativo militar, se rige bajo las normas, la organización, la estructura, la filosofía y la cultura institucional militar. La Ley que Crea la Universidad del Ejército y Fuerza Aérea (1975), en su Artículo 2, establece que la misma universidad depende del secretario de la Defensa Nacional “a través de la Dirección General de Educación Militar, la que asumirá funciones de rectoría”.

En la Ley Orgánica del Ejército y Fuerza Aérea Mexicanos, en su Artículo 122, textualmente se señala que las instituciones de educación militar tendrán por objeto la educación profesional de los miembros del Ejército mexicano y la FAM. Continuando con su estructura institucional, la Ley de Educación Militar del Ejército y Fuerza Aérea Mexicanos, en su Artículo 14, señala que: “Las Instituciones de Educación Militar se clasifican en: I. Colegios; II. Escuelas; III. Centros de Estudios; IV. Unidades-Escuela, y v. Institutos”.

Mientras tanto, en el Artículo 2 del Reglamento General del Colegio del Aire se ordena que: “El Colegio del Aire es una institución educativa militar que tiene como misión regir la formación profesional de los oficiales Pilotos Aviadores y de los servicios de la Fuerza Aérea para satisfacer las necesidades de esta”.

Respecto a la forma como se organiza institucionalmente el Colegio del Aire, en el Artículo 3 del Reglamento General del Colegio del Aire se dispone que

dicha institución depende de la Dirección General de Educación Militar y de la Rectoría de la Universidad del Ejército y Fuerza Aérea, y en su Artículo 8 establece que las instituciones de educación militar que dependen de dicho Colegio son las siguientes:

- Escuela Militar de Aviación (EMA);
- Escuela Militar de Mantenimiento y Abastecimiento (EMMA);
- Escuela Militar de Especialistas de Fuerza Aérea (EMEFA), y
- Otros que se determinen al efecto.

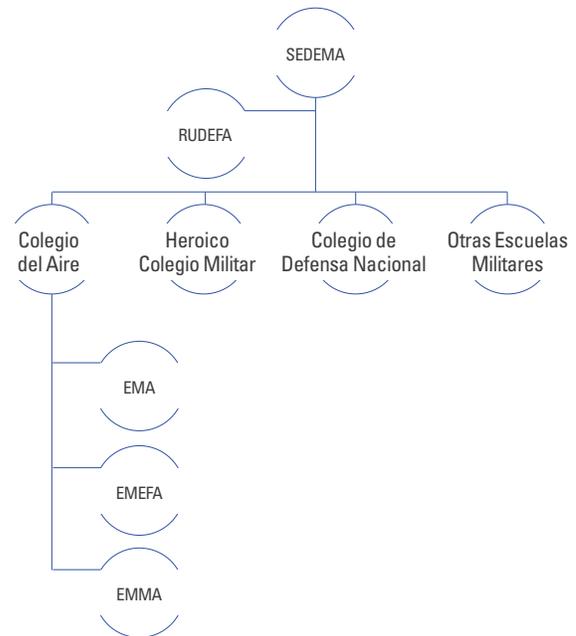


Figura 5. Estructura institucional del Colegio del Aire

Fuente: elaboración propia con información del Reglamento General del Colegio del Aire.

Organigrama del Colegio del Aire

Al igual que toda institución de educación superior y toda organización de carácter público, el Colegio del Aire, como lo señala Arellano-Gault (2004), es una organización estructurada, compuesta por individuos o actores organizacionales, con la capacidad de interpretar y transferir las normas y los símbolos para lograr objetivos específicos.

De acuerdo con lo señalado en el Reglamento General del Colegio del Aire, la organización también queda sujeta a la disponibilidad de los recursos y los presupuestos designados por el Presupuesto de Egresos de la Federación, y establece en la normativa institucional lo que se muestra a continuación en la Figura 6.

Contexto educativo del Colegio del Aire

Actualmente, en el Colegio del Aire se forman los recursos humanos que la Sedena dispondrá para la defensa del espacio aéreo, las operaciones aéreas militares y la seguridad interior. Como se ha referido antes, en dicha institución se alojan tres diferentes escuelas que forman o especializan a los estudiantes de esos planteles (EMA, EMEFA y EMMA). En los datos mostrados en la Tabla 1, se puede encontrar una drástica diferencia entre los alumnos que ingresan, aquellos que permanecen y la eficiencia terminal: casi en un 48 %.

Tabla 1. Alumnos en el Colegio del Aire

Escuela	Ingreso 2020	Ingreso 2021	Ingreso 2022	Ingreso 2023	Total actual
EMA	161	145	130	115	551
EMMA	83	281	254	250	868
EMEFA	140	64	142	46	392
				Total	1811

Fuente: elaboración propia con datos de la Sedena (2023).

Financiamientos

En relación con el financiamiento de las universidades, Mendoza (2016) señala que los rectores y los directores de las universidades públicas vociferan que los principales problemas de las instituciones son en materia de financiamiento. Los recursos les son insuficientes para atender de manera apropiada las

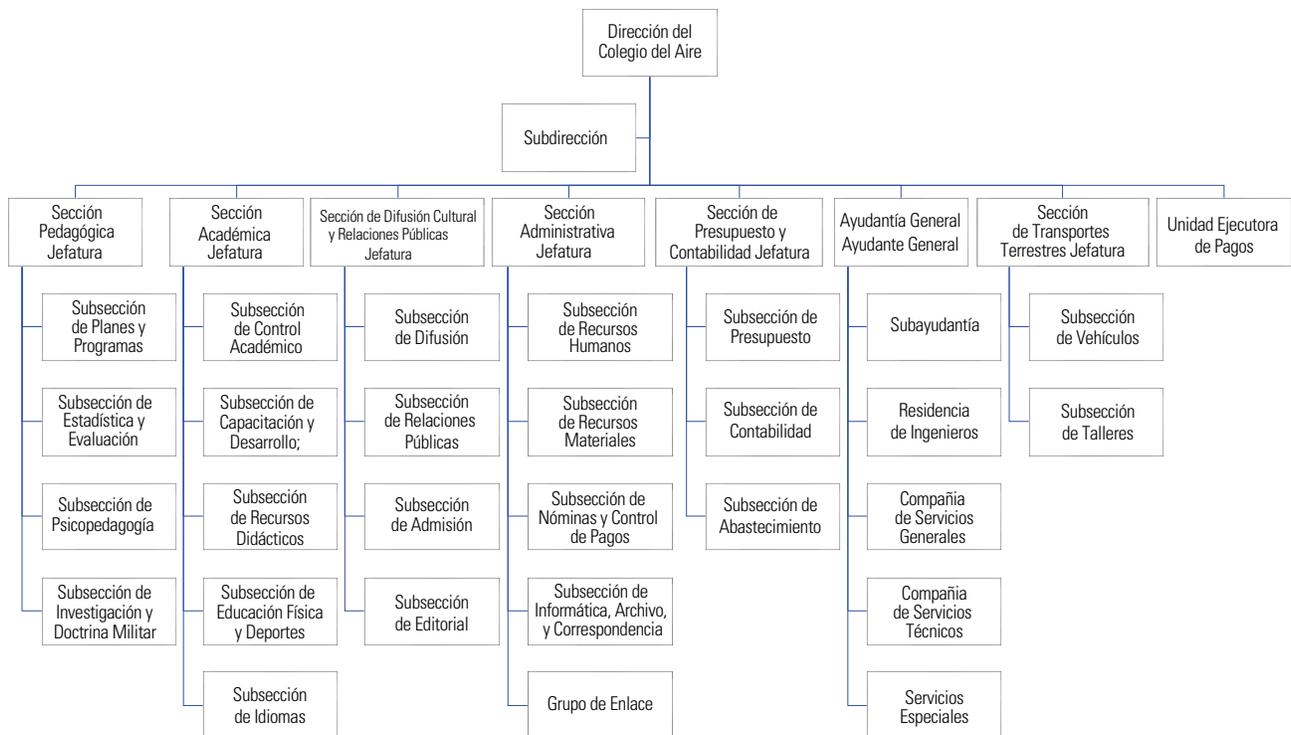


Figura 6. Organigrama del Colegio del Aire

Fuente: elaboración propia con información del Reglamento General del Colegio del Aire.

necesidades de crecimiento y/o consolidación académica de sus respectivos planteles o centros de estudio. Y para algunos, hay poca certeza de recibir los recursos etiquetados por el Estado y los gobiernos estatales. En México, las universidades públicas cuentan con un financiamiento en dos vertientes o rubros, una participación federal y otra con participación de los estados.

El Colegio del Aire, al ser una institución perteneciente al sistema educativo militar en México, es decir que imparte educación militar, tiene una dependencia directa con la Sedena. De acuerdo con el Presupuesto de Egresos de la Federación, el Colegio del Aire recibe el financiamiento federal, dirigido hacia la Sedena que está señalada con el rubro 7; los recursos económicos llegan por medio de la Dirección General de Educación Militar y la Rectoría de la Universidad del Ejército y Fuerza Aérea con su asignación 115, etiquetado como Educación (5) y el código 3 por la educación superior, con un presupuesto otorgado en 2022 para todo el sistema educativo militar de 270.518.154 pesos mexicanos (Transparencia Presupuestaria, 2023).

Dicho presupuesto designado para la educación militar contempla rubros que otras instituciones educativas no tienen, debido a que el sistema educativo militar, además de considerar la educación en sí misma, también brinda alojamiento en modo de internado a sus estudiantes, alimentación y comidas (desayuno, comida y cena), así como uniformes, ropa interior, calzado, tocados y armamento para prácticas, entre otros enseres.

A continuación, en la Tabla 2, se muestra el concepto asignado u otorgado para la educación militar, del cual se desprende una partida para el Colegio del Aire, su concepto de asignación y el recurso utilizado de acuerdo con el Presupuesto de Egresos de la Federación (Transparencia Presupuestaria, 2023).

Cómo parte del análisis al presupuesto, es de resaltar que, a diferencia de otras instituciones educativas que dirigen casi el 90 % del presupuesto hacia la nómina, en el sistema educativo militar dirigen 53 % a servicios profesionales, estímulos, recompensas, sueldos y salarios, dedicando también una parte importante a la alimentación y el vestuario de los estudiantes.

Tabla 2.
Financiamientos a la educación militar

Modalidad o concepto de asignación	Porcentaje del recurso utilizado
Alimentos y utensilios	7.8 %
Ayudas sociales	9.7 %
Combustibles, lubricantes y aditivos	0.3 %
Equipo e instrumental médico y de laboratorio	0.3 %
Herramientas, refacciones y accesorios menores	0.4 %
Maquinaria, otros equipos y herramientas	0.0 %
Materiales y artículos de construcción y de reparación	0.8 %
Materias primas y materiales de producción y comercialización	2.3 %
Mobiliario y equipo de administración	0.1 %
Mobiliario y equipo educacional y recreativo	0.01 %
Otras prestaciones sociales y económicas	24.7 %
Productos químicos, farmacéuticos y de laboratorio	0.5 %
Remuneraciones adicionales y especiales	20.8 %
Remuneraciones al personal de carácter permanente	8.3 %
Seguridad social	1.3 %
Servicios básicos	1.7 %
Servicios de arrendamiento	0.2 %
Servicios de instalación, reparación, mantenimiento y conservación	0.3 %
Servicios de traslado y viáticos	6.6 %
Servicios financieros, bancarios y comerciales	0.0001 %
Servicios oficiales	0.011 %
Servicios profesionales, científicos, técnicos y otros servicios	11.5 %
Vestuario, blancos, prendas de protección y artículos deportivos	2.2 %
Total	100 %

Fuente: elaboración propia con información del Presupuesto de Egresos de la Federación (Transparencia Presupuestaria, 2023).

Conclusiones

Actualmente, y con base en las políticas nacionales, la defensa nacional y la educación superior son dos áreas importantes en México. En esta investigación, tienen

una gran relación y están interconectadas, con un impacto significativo en el desarrollo profesional de los mexicanos y en la seguridad del país.

En términos de defensa nacional, México cuenta con un conjunto de fuerzas armadas compuestas por el Ejército, la Armada y la Fuerza Aérea, que trabajan en conjunto para proteger la integridad territorial, la soberanía y la seguridad del país. Además, México también tiene una serie de políticas y estrategias para abordar las amenazas y los desafíos a la seguridad nacional, como el crimen organizado, la violencia y el terrorismo.

Por otro lado, la educación es un pilar fundamental para la seguridad nacional y para el desarrollo social y económico de México. El sistema educativo militar cuenta con más de quince instituciones que trabajan en conjunto para formar, desarrollar las habilidades y las competencias profesionales, y enseñar la doctrina militar con la filosofía axiológica de la institución a los futuros oficiales, líderes y mandos. El objetivo es que los egresados dirijan a las tropas de las fuerzas armadas y desempeñen funciones profesionales y de especialización, con el fin de dar seguridad a las personas, al espacio aéreo, a la soberanía de la nación y a la seguridad interior. A su vez, deberán compartir los conocimientos con otros de menor o mayor rango jerárquico y promocionar la educación superior militar.

Sin embargo, aún existen desafíos en el sistema educativo militar, como la desigualdad en el acceso a la educación, la planeación estratégica específica por instituciones, la capacitación constante, la autoevaluación de los procesos, la innovación tecnológica y el aseguramiento de la calidad de la educación.

Es importante destacar que la educación también juega un papel importante en la defensa nacional, ya que una población militar educada es más capaz de contribuir al desarrollo del país y estar preparada para enfrentar las amenazas contra la seguridad nacional. Además, el sistema educativo militar también puede ser utilizado para promover valores y principios que son importantes para la defensa nacional, como el patriotismo y el respeto a la ley.

La investigación y planeación estratégica será un fundamento que fortalezca a las instituciones educativas del sistema educativo militar y que lleve al logro de los objetivos prioritarios que constituyen tanto el Plan General de Educación Militar, como el Programa Sectorial de la Defensa Nacional, en vista del desarrollo y cumplimiento de las metas del país, lo cual genera una oportunidad de abrir líneas de investigación de cada programa educativo en el sistema educativo militar.

Recomendaciones y propuestas

Impulsar la investigación de la gestión educativa, la educación militar, el arte y la ciencia militar, y la planeación estratégica, a través de un equipo de profesores investigadores internos y externos que permitan explorar cada una de las áreas y especialidades. Todo lo anterior, de tal forma que se vislumbre el desarrollo científico, se difunda sus conocimientos y se realice a través de la formación de investigadores, con metodologías científicas que amplíen las posibilidades de acercarse al conocimiento y la divulgación de la ciencia. Esta recomendación se hace alineada a los objetivos principales, las estrategias prioritarias y las acciones puntuales dispuestas en el Programa Sectorial de la Defensa Nacional 2020-2024, que fomentan la investigación científica:

- 5.4.- Impulsar la calidad y nivel de la educación y adiestramiento militar, para alcanzar la formación axiológica, intelectual, física y profesional para atender la función primigenia de defensa del Estado Mexicano;
- 5.4.6. Fortalecer la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación, en los campos de las ciencias militares y biomédicas, así como en las ramas de la ingeniería con proyectos factibles y alcanzables;
- 5.4.7. Impulsar la preparación profesional del personal militar dedicado a la investigación científica y desarrollo tecnológico;
- 5.4.8. Activar áreas destinadas a la investigación en planteles militares del sistema educativo militar para promover el interés en actividades científicas y de desarrollo tecnológico.

El proceso puede comenzar desde que las autoridades y los directivos del sistema educativo militar decidan conjuntar al equipo de profesores e investigadores de la planta docente que favorecerán la investigación, las academias, el conocimiento y la planeación de estrategias acordes a las necesidades de los planteles, a fin de promover posibles soluciones adecuadas.

Es adecuado seleccionar a aquellos que tienen nivel de doctorando y doctorado, y que hayan realizado y publicado investigaciones con propuestas claras que beneficien la educación militar, que impulsen el desarrollo tecnológico y la experimentación con material aéreo y sistemas de defensa, y que mejoren los procesos organizacionales, con el fin de conjuntar un equipo multidisciplinario que favorezca a todo el sistema educativo militar de México.

Referencias

- Arellano-Gault, D. (2004). *Gestión estratégica para el sector público. Del pensamiento estratégico al cambio organizacional*. Fondo de Cultura Económica.
- Casassus, J. (1998). Descentralización de la gestión a las escuelas y calidad de la educación: ¿mitos o realidades? *Propuesta Educativa*, 10(21).
- DiMaggio, P. J. y Powell, W. (1994). Retorno a la jaula de hierro: el isomorfismo institucional y la racionalidad colectiva en los campos organizacionales. *El nuevo institucionalismo en el análisis organizacional* (W. Powell & P. DiMaggio, comps.; pp. 104-125). Fondo de Cultura Económica.
- Fernández, J. (2008). La educación militar en México: un enfoque histórico. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 13(37), 813-835.
- García, A. (2017). La educación militar en México: una perspectiva histórica. *Estudios de Historia de la Educación*, 18, 83-98.
- Gutiérrez-Albán, L. G., Teneda Garcés, V. O y Narváez Ríos, R. R. (2019). La formación militar desde el enfoque por competencias: caso tecnología superior en ciencias militares. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa* 4(8), 107-114.
- Klepak, H. (Comp.). (2012) *Formación y educación militar: los futuros oficiales y la democracia*. Resdal [en línea]. <https://www.resdal.org/educacion/educacion-militar.pdf>
- Lemaitre, M. J. (Ed.). (2018). *La educación superior como parte del sistema educativo de América Latina y el Caribe: calidad y aseguramiento de la calidad*. Unesco.
- López, A. (2003). El Calmécac: una institución educativa en la cultura mexicana (Azteca). *Estudios de Cultura Náhuatl*, 34, 41-56.
- Mendoza Rojas, J. (2016). *Financiamiento de la educación superior en la primera mitad del gobierno de Enrique Peña Nieto: ¿fin del periodo de expansión?* Perfiles Educativos | vol. XXXIX, núm. 156. IISUE-UNAM
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2019). *El futuro de la educación superior en México: fortalecimiento de la calidad y la equidad. Revisión de Políticas Nacionales de Educación*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/005689e0-es>
- Panfilov, A. y Petrova, L. (2018). *La educación militar es la estrategia principal de formación de la personalidad de los líderes militares modernos*. Universidad Nacional de Derecho Yaroslav Mudryi [en línea]. <https://doi.org/10.21564/2075-7190.38.140005>
- Robbins, S. P. y Judge, T. A. (2020). *Comportamiento organizacional* (17.ª ed.). Pearson Educación.
- Secretaría de la Defensa Nacional (Sedena). (2019). *Reseña histórica del Heroico Colegio Militar* [en línea]. <https://www.gob.mx/sedena/acciones-y-programas/resena-historica-del-heroico-colegio-militar>
- Secretaría de la Defensa Nacional (Sedena). (2022a). *Actividades militares de la Escuela Militar de Aviación* [en línea]. <https://www.gob.mx/sedena/acciones-y-programas/actividades-militares-de-la-escuela-militar-de-aviacion>
- Secretaría de la Defensa Nacional (Sedena). (2022b). *Colegio del Aire* [en línea]. <https://www.gob.mx/sedena/acciones-y-programas/colegio-del-aire-318435>
- Secretaría de la Defensa Nacional (Sedena). (2022c). *Historia del Colegio del Aire. Antecedentes históricos* [en línea]. <https://www.gob.mx/sedena/acciones-y-programas/historia-del-colegio-del-aire>
- Secretaría de la Defensa Nacional (Sedena). (2023). *Sistema educativo militar* [en línea]. <https://www.gob.mx/sedena/articulos/sistema-educativo-militar-31103>
- Transparencia Presupuestaria. (2023). *Presupuesto de Egresos de la Federación (PEF). Plataforma de datos abiertos* [en línea]. <https://www.transparenciapresupuestaria.gob.mx/Datos-Abiertos>

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 às 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/cienciaypoderareero>) o al correo cienciaypoderareero@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.

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

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 and 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
- 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

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

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
- 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.

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

ADASTRA



01

Vol. 20

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

Enero-junio del 2025 | pp. 1-139

CIENCIA Y PODER AÉREO

Revista Científica de la Escuela de Postgrados de la FAC

Vol. 20 n.º 1 | enero-junio del 2025 | pp. 1-139 | ISSN 1909-7050 E-ISSN 2389-9468

Doi: <https://doi.org/10.18667/issn.1909-7050> | Bogotá, Colombia | Periodicidad semestral

