



MAESTRÍA EN  
**SEGURIDAD  
OPERACIONAL**  
ESCUELA DE POSTGRADOS DE LA FAC - EPAC / DINES 102918

# III SIMPOSIO DE INVESTIGACIÓN FORMATIVA - MAESO

Gestión Integral del Riesgo:  
Perspectivas desde la Investigación Formativa

ISSN-E 3073-0392



**Comité Organizador**

MY. Francine Pineda Mongui  
Dra. Erika Juliana Estrada Villa  
MBA. Paola Andrea Velandia Reyes  
Ing. Harold Julián Acosta León  
RI. Jenny Carolina Cubillos

**Compiladores**

Dra. Erika Juliana Estrada Villa  
MBA. Paola Andrea Velandia Reyes  
RI. Jenny Carolina Cubillos

**Comité Evaluador**

Ing. Harold Julián Acosta León  
Ing. Rafael Cerpa  
Dra. Angélica Palacios  
Ing. Juan Felipe Jiménez

**Revisión de Texto y Estilo**

MY. Francine Pineda Mongui  
Dra. Erika Juliana Estrada Villa  
MBA. Paola Andrea Velandia Reyes  
RI. Jenny Carolina Cubillos

**Portada y Diseño**

Aldemar Zambrano Torres

**Autores**

MY. Andrés Felipe Garzón Cómbita  
CT. Moreno Peña Miguel Esteban  
TE. Diego Alejandro Cubillos Reina  
TE. David Alejandro Correa Fonseca  
TE. Mayorga Mendieta Miguel Ángel  
TS. Jaime Augusto Vega Martínez  
TS. Arbey Gonzalo Pinto Arévalo

**ISSN-E** 3073-0392 (En línea) Periodicidad anual

### **Información Técnica**

Publicación Producto de Investigación Grupo de investigación GICMA COL0140489  
Tercera Edición, junio 2026. Periodicidad anual, publicación digital Sitio  
Web: <https://www.epfac.edu.co/es/eventos-academicos/seguridad-operacional>

### **Editor**

MY. Francine Pineda Mongui  
Escuela de Posgrados FAC "Capitán José Edmundo Sandoval"  
Nit. 899999102-2  
Cra 11 No. 102-50  
+57(601) 3159816 Extensión 72558  
[admisiones.maeso@epfac.edu.co](mailto:admisiones.maeso@epfac.edu.co)

Bogotá, Colombia ©2026

Editorial Escuela de Posgrados FAC Capitán José Edmundo Sandoval. Los autores son responsables de la información presentada y contenida en los resúmenes. La información de este documento no puede ser reproducida, almacenada o transmitida de manera alguna, ni por ningún medio, ya sea electrónico, químico, mecánico, óptico de grabación o fotocopia sin permiso del autor.

Copyright (c) 2026. Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

## Editorial



La seguridad operacional es, ante todo, una responsabilidad compartida que exige aprendizaje permanente, pensamiento crítico y la capacidad de anticiparse a los desafíos de un entorno aeronáutico cada vez más dinámico y complejo. En este contexto, la investigación formativa se consolida como un instrumento fundamental para transformar la experiencia en conocimiento útil para la toma de decisiones y la gestión del riesgo.

La Maestría en Seguridad Operacional reafirma, a través del III Simposio de Investigación Formativa, su compromiso con la generación y difusión del conocimiento como una herramienta esencial para fortalecer la cultura de seguridad y contribuir al desarrollo del sector aeronáutico. Este escenario académico permitió que los estudiantes de la Cohorte X presentaran los resultados de sus investigaciones, sometiéndolos al análisis y a la retroalimentación de expertos, comprometidos con la excelencia operacional.

Los trabajos reunidos en estas memorias evidencian la diversidad y profundidad de los desafíos que enfrenta actualmente la aviación, así como la capacidad de nuestros maestrantes para abordarlos desde una perspectiva rigurosa, aplicada y orientada a la generación de soluciones. Cada investigación representa no solo un requisito académico, sino también una expresión del compromiso de sus autores con la preservación de la vida, la mejora continua y el fortalecimiento de las capacidades organizacionales.

Estoy convencida de que las organizaciones más seguras son aquellas que aprenden, cuestionan y evolucionan constantemente. Por ello, espero que las investigaciones aquí recopiladas trasciendan estas páginas y se conviertan en una fuente de consulta, reflexión e inspiración para quienes comparten la responsabilidad de hacer de la seguridad operacional no solo un objetivo institucional, sino una convicción que se demuestra todos los días.

*Mayor Francine Pineda Mongui  
Directora Programa Maestría Seguridad Operacional*

## **III Simposio de Investigación Formativa MAESO**

### **Objetivo General**

Dar a conocer los resultados de proyectos de investigación de la Maestría en Seguridad Operacional a la comunidad aeronáutica y en general en modalidad de presentación dinámica de investigación en un evento académico.

### **Finalidades**

Presentar a los participantes y evaluadores los avances de los proyectos de investigación de los estudiantes de cuarto semestre de la Cohorte X de la Maestría en Seguridad Operacional.

Proponer a los expositores un análisis objetivo y de acciones de mejora con el ánimo de fortalecer su trabajo de grado.

Socializar los avances de la investigación del programa de Maestría ante un comité científico y comunidad académica.

Fortalecer el proceso de investigación formativa de los estudiantes de la décima cohorte de la Maestría.

## Gestión del Cambio en Aeronaves de Ala Rotatoria: De la Experiencia a la Alta Tecnología



Fuente: Escuadrón de Helicópteros Grupo de Vuelos Especiales (2025); (Fuerza Aeroespacial Colombiana, 2025)

**MY. Andrés Felipe Garzón Cómbita**  
[andres.garzon@fac.mil.co](mailto:andres.garzon@fac.mil.co)

**Información del autor:** Oficial Piloto, Administrador Aeronáutico de la Escuela Militar de Aviación, piloto militar de ala rotatoria con experiencia operacional consolidada en los equipos Bell 206/AH-60/Huey-II/ Bell-212/TH-67, con más de 2.500 horas como piloto autónomo sin accidentes, actualmente se encuentra cursando la Maestría en Seguridad Operacional en la EPFAC. Se desempeña como Comandante del Escuadrón de Entrenamiento Técnico y Piloto Instructor de la Escuela Internacional de Helicópteros para las Fuerzas Armadas.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-3143-6755>

CvIac:

[https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0002458984](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0002458984)

**Línea de investigación:** Gestión de la Seguridad Operacional

## Resumen

La Fuerza Aeroespacial Colombiana ha sido un referente regional en el desarrollo de capacidades con aeronaves de ala rotatoria, desde el establecimiento del Caata-1, posteriormente conocido como Comando Aéreo de Combate N.º 4 (Fuerza Aérea Colombiana, 2020), hasta el desarrollo del sistema de armamento para el helicóptero Arpía AH-60 (Gómez et al., 2024) y, más recientemente, los destacados programas de formación de pilotos militares de la Escuela Internacional de Helicópteros para las Fuerzas Armadas (Melgarejo, 2024).

A pesar de estos logros, las aeronaves empleadas para el desarrollo de dichas capacidades ya se han venido retirando del servicio como es el caso del UH-1N Huey de la base aérea Yokota al cumplir más de cuarenta años de servicio (United States Air Force, 2025). Este mismo proceso se ha evidenciado en otras fuerzas militares del país. Por ejemplo, el retiro de la flota de helicópteros UH-1N del Ejército Nacional de Colombia, tras más de dos décadas de operación (Ejército Nacional de Colombia, 2025).

En este contexto, las aeronaves disponibles para la renovación de las flotas de helicópteros cuentan con tecnología de vanguardia, como piloto automático en cuatro ejes, mayor autonomía, mejoras significativas en la aviónica y sistemas HUMS (Health and Usage Monitoring System); dichas capacidades han sido señaladas por los participantes entrevistados durante la investigación, identificados mediante códigos para preservar su anonimato, como elementos característicos de las plataformas de última generación (ID-112, ID-114, ID-115, entrevista semiestructurada, 2025).

Las capacidades previamente descritas generan cambios importantes en la organización a todo nivel; por lo tanto, “se deben adoptar cada vez más marcos proactivos y predictivos para gestionar el cambio, mejorar la seguridad y optimizar la eficiencia operativa” (Skačkauskienė & Leonavičiūtė., 2025, p.2), con el fin de evitar que, en entornos cambiantes, se produzcan estados no deseados dentro del Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional (MAGSO, 2025).

En este marco, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo de gestión del cambio orientado a la transición tecnológica por cambio de aeronave de ala rotatoria en la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC). Para su desarrollo, se tomó como referencia a pilotos, técnicos y personal de mando involucrados en procesos de gestión del cambio asociados a la renovación de aeronaves de ala rotatoria, tanto en el ámbito nacional como internacional. En el contexto militar nacional, participaron integrantes del escuadrón de helicópteros del Grupo de Vuelos Especiales de la FAC, unidad que actualmente opera aeronaves AW-139.

A nivel internacional, se contó con la participación de pilotos de República Dominicana, donde operan aeronaves AW-169 en el escuadrón de rescate. Asimismo, participaron pilotos del Escuadrón de Entrenamiento Básico de Helicópteros de Brasil con el AS350 B3E, así como pilotos del Escuadrón de Helicópteros de Honduras con aeronaves H-145, plataformas incorporadas en los últimos años por estos países.

En complemento a lo anterior, se contó con la participación de pilotos del sector civil de la industria aeronáutica nacional que operan aeronaves EC-145 y Bell 412, así como con personal militar experto en planeación estratégica de otras fuerzas, quienes han participado directamente en procesos recientes de adquisición de capacidades aéreas, entre ellos la incorporación del helicóptero Bell 412EPI para la Aviación Naval de la Armada de la República de Colombia. Garzón, A. (2026).

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, siguiendo a J. W. Creswell y J. D. Creswell (2022), a partir de entrevistas semiestructuradas, las cuales fueron procesadas mediante el software de análisis de datos cualitativos ATLAS.ti (CAQDAS, 2025). Como resultado del proceso de codificación y análisis, se identificaron los peligros con mayor concurrencia en los procesos de renovación de aeronaves, entre los cuales se destacan la insuficiencia en la cadena de suministro de repuestos críticos, la brecha de conocimiento y experiencia en sistemas nuevos, las deficiencias en infraestructura, la degradación de competencias operativas, la pérdida de conciencia situacional y las carencias en programas de formación técnica especializada.

Estos peligros se asocian a factores humanos, organizacionales, técnicos y ambientales, tal como se indica en el Manual de Ejemplos de Taxonomía y Codificación de Peligros del Sistema Regional de Cooperación para la Vigilancia de la Seguridad Operacional (SRVSOP, 2020), lo que permitió evidenciar las principales brechas operacionales asociadas a la transición tecnológica.

Así mismo, con el fin de aportar mayores herramientas al modelo de gestión del cambio, se establecieron, mediante la misma metodología de investigación, los enfoques que deben orientar los planes de acción destinados a mitigar los riesgos derivados de los peligros identificados. Estos enfoques se fundamentan en herramientas ya presentes en la doctrina organizacional de la institución, las cuales requieren fortalecerse para garantizar una transición adecuada, tales como la planeación estratégica del cambio, la gestión de recursos de transición, el entrenamiento, el desarrollo de competencias y habilidades, así como la estandarización y la doctrina.

Los resultados anteriores permiten proponer planes de acción proyectados a mediano y largo plazo, orientados a evitar futuros estados no deseados asociados a la transición de aeronaves. Estos planes se enfocan en la formación y desarrollo de competencias del personal, la estandarización de procedimientos y el aseguramiento logístico y de mantenimiento. De igual manera, se plantea la aplicación de modelos de gestión del cambio organizacional ampliamente reconocidos, como el modelo ADKAR propuesto por Jeff Hiatt (2006), basado en los componentes Awareness, Desire, Knowledge, Ability y Reinforcement, así como el modelo de gestión del cambio de John P. Kotter (2014), estructurado en ocho aceleradores que operan dentro de un sistema dual diseñado para organizaciones que deben adaptarse a entornos dinámicos y de alta velocidad.

De forma complementaria, la incorporación de metodologías de planeamiento por capacidades como DOMPI (Doctrina, Organización, Material, Personal e Infraestructura), definidas por el Ministerio de Defensa Nacional (2018) como los componentes que estructuran el desarrollo de capacidades en el sector defensa, permitirá desarrollar una gestión del cambio más integral, basada en evidencia

investigativa, contribuyendo a mantener a la institución como referente regional en operaciones de ala rotatoria.

**Palabras clave:** Seguridad Operacional, Ala Rotatoria, Cambio Organizacional, Gestión del Cambio

## **Change Management in Rotary-Wing Aviation: Transitioning from Operational Experience to Advanced Technology**

### **Abstract**

The Colombian Aerospace Force has been a regional leader in the development of rotary-wing capabilities, from the establishment of CAATA-1 later known as Combat Air Command No. 4 (Colombian Air Force, 2020) to the development of the weapon system for the Arpía AH-60 helicopter (Gómez et al., 2024), and more recently, the outstanding military pilot training programs conducted at the International Helicopter School for the Armed Forces (Melgarejo, 2024).

Despite these achievements, the aircraft used to develop these capabilities have already been phased out of service. This is also evident in international contexts, such as the retirement of the UH-1N Huey at Yokota Air Base after more than four decades of operation (United States Air Force, 2025). A similar process has been observed in other military branches within the country. For instance, the retirement of the Colombian National Army's UH-1N helicopter fleet after more than two decades of operation (Colombian National Army, 2025).

In this context, the aircraft available for helicopter fleet renewal incorporate state-of-the-art technologies, including four-axis autopilot systems, extended operational range, significant advancements in avionics, and Health and Usage Monitoring Systems (HUMS). These capabilities were highlighted by participants during the research identified through coded references to preserve anonymity as defining features of next-generation platforms (ID-112, ID-114, ID-115, semi-structured interviews, 2025).

The previously described capabilities generate significant changes at all organizational levels; therefore, "increasingly proactive and predictive frameworks must be adopted to manage change, enhance safety, and optimize operational efficiency" (Skačkauskienė & Leonavičiūtė, 2025, p. 2), in order to prevent undesirable conditions in changing environments within the Operational Safety Management System (MAGSO, 2025).

Within this framework, the objective of this research is to propose a change management model focused on the technological transition resulting from the replacement of rotary-wing aircraft in the Colombian Aerospace Force (FAC). To achieve this, the study draws on the experiences of pilots, technicians, and command personnel involved in change management processes associated with the replacement of rotary-wing aircraft, both at the national and international levels. In the national military context, participants included members of the FAC Special Flight Group's helicopter squadron, which currently operates AW-139 aircraft.

At the international level, participants included pilots from the Dominican Republic, where AW-169 aircraft are operated for rescue missions. Additionally, pilots from Brazil's Basic Helicopter Training Squadron, operating the AS350 B3E, and from the Honduran Helicopter Squadron, operating H-145 aircraft, contributed to the study; these platforms have been incorporated by their respective countries in recent years.

In addition to the above, the study included pilots from the civil sector of the national aviation industry operating EC-145 and Bell 412 aircraft, as well as military personnel with expertise in strategic planning from other branches of the armed forces, who have been directly involved in recent air capability acquisition processes, including the incorporation of the Bell 412EPI helicopter into the Colombian Navy's Naval Aviation. Garzón, A. (2026).

The study was conducted using a qualitative approach, following J. W. Creswell and J. D. Creswell (2022), based on semi-structured interviews, which were analyzed using the qualitative data analysis software ATLAS.ti (CAQDAS, 2025). The coding and analysis process enabled the identification of the most prevalent hazards associated with aircraft renewal processes, including shortages in the supply chain for critical spare parts, gaps in knowledge and experience with new systems, infrastructure deficiencies, degradation of operational competencies, loss of situational awareness, and shortcomings in specialized technical training programs.

These hazards are associated with human, organizational, technical, and environmental factors, as outlined in the Manual of Examples of Hazard Taxonomy and Coding of the Regional Cooperation System for Operational Safety Surveillance

(SRVSOP, 2020), which enabled the identification of the main operational gaps associated with the technological transition.

Likewise, in order to provide additional support to the proposed change management model, the same research methodology was applied to define the approaches that should guide the action plans designed to mitigate the risks arising from the identified hazards. These approaches are based on tools already embedded within the institution's organizational doctrine, which require strengthening to ensure a smooth transition, including strategic change planning, transition resource management, training, competency and skill development, as well as standardization and doctrine.

The results obtained enable the proposal of medium and long term action plans aimed at preventing future undesirable situations associated with the aircraft transition. These plans focus on personnel training and competency development, the standardization of procedures, and logistical and maintenance assurance.

In addition, the application of widely recognized organizational change management models is proposed, such as the ADKAR model introduced by Jeff Hiatt (2006), based on the components Awareness, Desire, Knowledge, Ability, and Reinforcement, as well as the model proposed by John P. Kotter (2014), structured around eight accelerators operating within a dual system designed for organizations that must adapt to dynamic and high tempo environments.

Furthermore, the incorporation of capability based planning methodologies such as DOMPI (Doctrine, Organization, Material, Personnel, and Infrastructure), defined by the Ministry of National Defense (2018) as the components that structure capability development in the defense sector, enables the development of a more comprehensive change management approach based on research evidence, contributing to maintaining the institution as a regional leader in rotary wing operations.

**Keywords:** Safety Management System, Rotary-Wing Aviation, Change Management, Organizational Change, Technological Transition

## Referencias

ATLAS.ti Scientific Software Development GmbH. (2026). ATLAS.ti Windows (versión 26.0.0) [ Software de análisis de datos cualitativos]. <https://atlasti.com>

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2022). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (6th ed.). SAGE Publications.

Ejército Nacional de Colombia. (2025). El Ejército de Colombia retira sus últimos helicópteros UH-1N. <https://www.ejercito.mil.co/el-ejercito-de-colombia-retira-sus-ultimos-helicopteros-uh-1n/>

FAC. (2025). Manual de Gestión de la Seguridad Operacional -MAGSO (Tercera ed.). (IGEFA, Ed.) Bogotá, D.C., Colombia: Departamento Estratégico Doctrina Aérea y Espacial -DEDAE-.

Fuerza Aérea Colombiana. (2020). Historia, estructura, roles y doctrina de la Fuerza Aérea Colombiana. [https://www.fac.mil.co/sites/default/files/linktransparencia/informacioninteres/informescomision/historia\\_estructura\\_rol\\_y\\_doctrina\\_de\\_la\\_fuerza\\_aerea\\_colombiana.pdf](https://www.fac.mil.co/sites/default/files/linktransparencia/informacioninteres/informescomision/historia_estructura_rol_y_doctrina_de_la_fuerza_aerea_colombiana.pdf)

Garzón, A. (2026). Modelo de Gestión del Cambio para la Renovación de la Flota de Helicópteros en el Comando Aéreo de Combate N°4 [ Tesis no publicada de maestría en seguridad operacional]. Escuela de Postgrados FAC.

Gómez Miranda, E. O., Gómez Jaramillo, R. A., & Rojas Ortiz, Z. V. (2024). Helicópteros en la Fuerza Aérea Colombiana (1995–2015): Héroes detrás de historias sin contar. Fuerza Aérea Colombiana. [https://cdn227724.fac.mil.co/sites/epfac/files/Docs-EPFAC/Publicaciones/PUB%2024.%20Helic%C3%B3pteros%20en%20la%20Fuerza%20A%C3%A9rea%20Colombiana%20\(1995%20%E2%80%93%202015\).pdf](https://cdn227724.fac.mil.co/sites/epfac/files/Docs-EPFAC/Publicaciones/PUB%2024.%20Helic%C3%B3pteros%20en%20la%20Fuerza%20A%C3%A9rea%20Colombiana%20(1995%20%E2%80%93%202015).pdf)

Hiatt, J. (2006). ADKAR: A model for change in business, government, and our community. Prosci. <https://archive.org/details/adkarmodelforcha0000hiat>

Kotter, J. P. (2014). Accelerate: Building strategic agility for a faster-moving world. Harvard Business Review Press.

Melgarejo Vanegas, M A. (2024) Operaciones Aéreas Humanitarias como instrumento de Relaciones Internacionales de Colombia: Caso "Honduras y

Guatemala 2020" [Artículo de Maestría, Escuela Superior de Guerra "Rafael Reyes Prieto"]. Repositorio institucional ESDEGE. <https://hdl.handle.net/20.500.14205/11255>

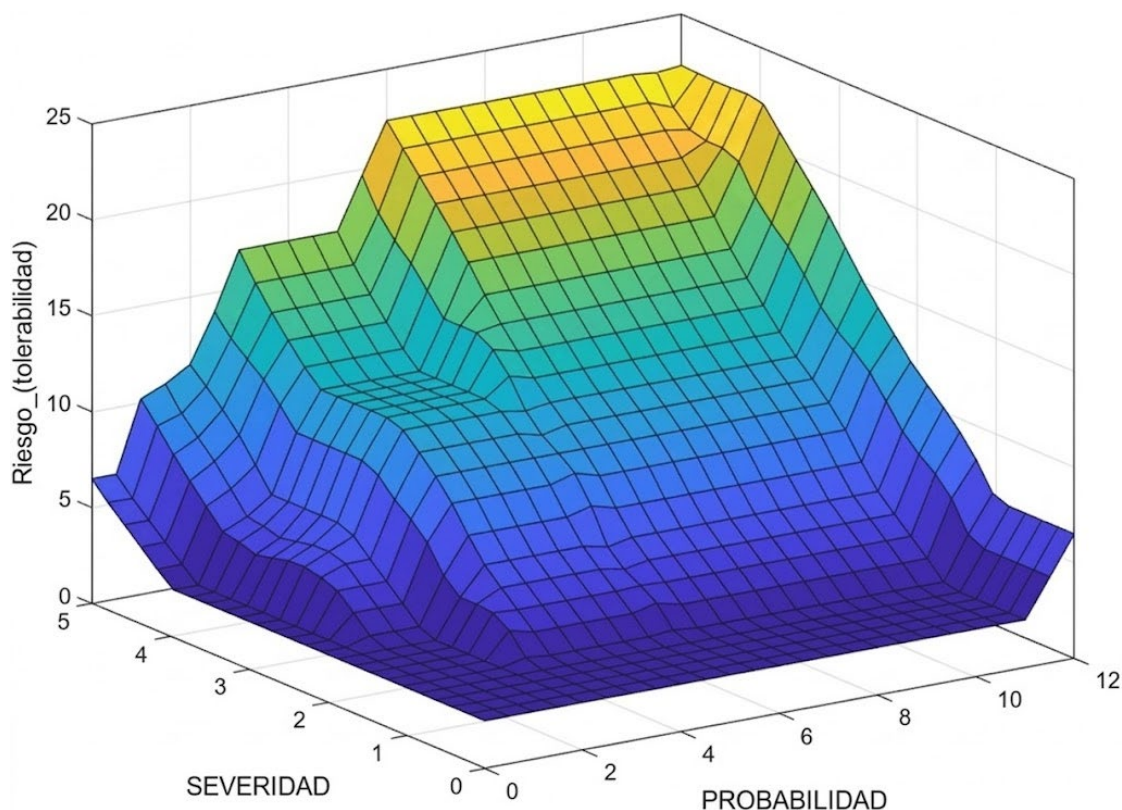
Ministerio de Defensa Nacional. (2018). Guía metodológica de planeamiento por capacidades. <https://www.mindefensa.gov.co/estrategia-y-planeacion/proyeccion-de-capacidades-e-innovacion/modelo-capacitas/conceptos-clave>

Sistema Regional de Cooperación para la Vigilancia de la Seguridad Operacional. (2020). Manual de ejemplos de taxonomía y codificación de peligros del SRVSOP (M-GEN-003). [https://srvsop.aero/site/wp-content/uploads/2026/01/SRVSOP\\_HazardsTaxonomyCodingExamplesManual\\_sp\\_Final\\_06Mar2020-1.pdf](https://srvsop.aero/site/wp-content/uploads/2026/01/SRVSOP_HazardsTaxonomyCodingExamplesManual_sp_Final_06Mar2020-1.pdf)

Skačkauskienė, I., & Leonavičiūtė, V. (2025). Change Management in Aviation Organizations: A Multi-Method Theoretical Framework for External Environmental Uncertainty. *Sustainability*, 17(15), 6994. <https://doi.org/10.3390/su17156994>

United States Air Force. (2025). 459 AS executes UH-1N Huey fini-flights. Yokota Air Base. <https://www.yokota.af.mil/News/Yokota-News/ArticleDisplay/Article/4293208/459-as-executes-uh-1n-huey-fini-flights/>

**Modelo de evaluación de riesgos de seguridad operacional para la Fuerza  
Aeroespacial Colombiana basado en lógica difusa.**



**CT. Moreno Peña Miguel Esteban**  
[miguelmorenop@epfac.edu.co](mailto:miguelmorenop@epfac.edu.co)

**Información del autor:** Oficial piloto de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, Ingeniero Mecánico de la Escuela Militar de Aviación (EMAVI), con una destacada trayectoria en el sector aeronáutico. Su perfil combina de manera excepcional la formación académica con la experiencia en línea de vuelo como Piloto de Transporte e Instructor de vuelo en los equipos Cessna C-208B Grand Caravan y Beechcraft Super King Air 350 (SK350). Con más de ocho años de experiencia en Seguridad Operacional enfocados en la investigación de accidentes aéreos, orientando su labor al análisis técnico y la prevención de sucesos catastróficos.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-1460-527X>

Cvlac: [https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0002458988](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0002458988)

**Línea de investigación:** Gestión de la Seguridad Operacional

## **Resumen**

La aviación moderna se consolida como un sistema sociotécnico de alta complejidad Sikora (2015) en el cual la interacción dinámica y no lineal entre el factor humano, la infraestructura tecnológica y el entorno organizacional exige marcos regulatorios rigurosos y robustos. Frente a los desafíos que esto representa para el análisis de la incertidumbre, la presente investigación evalúa las debilidades de las matrices de riesgo tradicionales (Thomas et al. 2014) y propone superarlas mediante la integración de modelos matemáticos contemporáneos, específicamente sistemas basados en la teoría de lógica difusa (Zadeh, L. A. 1965). Para esto, se realiza una revisión de literatura de las principales aplicaciones de esta teoría, orientada a contrastar sus ventajas con respecto a las deficiencias de la matriz de riesgos tradicional (OACI 2018).

Según la Organización de Aviación Civil Internacional OACI (2018), los Sistemas de Gestión de Seguridad Operacional (SMS) deben considerar las interacciones e interfaces entre las personas, los procesos y la tecnología. Al respecto, Sikora (2015) sostiene que, debido a la complejidad del sistema, la identificación de peligros debe trascender los modelos de causalidad lineal con el fin de comprender la naturaleza no determinista del riesgo. En este sentido, Bieder (2023, p. 24) advierte que la aviación funciona como un sistema de sistemas, en el cual operan múltiples entidades con objetivos propios que convergen a través de interfaces desafiantes.

Es por ello, que la siguiente investigación se fundamenta en un diseño metodológico cualitativo estructurado bajo los postulados de Creswell and Creswell (2023), adoptando el protocolo de revisión sistemática de la literatura propuesta por Okoli (2015). El objetivo es fundamentar la pertinencia de la lógica difusa como un modelo superior en la evaluación de la seguridad operacional a través del análisis de brechas teóricas y las debilidades metodológicas de las matrices de riesgo tradicionales.

Para lo cual, siguiendo el protocolo de Okoli (2015) se consolidó la búsqueda en las bases de datos académicas ScienceDirect, Springer, Taylor & Francis,

EBSCO host, Web of Science y China Knowledge Network, aplicando criterios de inclusión que incluyeron modelos cuantitativos para la gestión de riesgos, documentos que implementaran la teoría de gestión de riesgos sin apoyarse en matrices de evaluación convencionales, y las investigaciones centradas en la aplicación de lógica difusa en dominios relacionados a la seguridad operacional y gestión de riesgos.

Lo anterior, permitió realizar un proceso sistemático de revisión en el que se identificaron 349 documentos relevantes. De estos, se depuró una muestra de  $n=77$  textos relacionados con la evaluación de riesgos, la seguridad operacional y lógica difusa, consolidando finalmente una muestra de  $n=18$ , que fueron procesados mediante el gestor de referencias Refworks (Ex Libris 2026). El análisis metódico de esta literatura, reveló que la multidimensionalidad de la aviación hace que el funcionamiento del sistema en general dependa de la vinculación de todos sus elementos asociados y sus interacciones mutuas (Somanpillai Vijayakumariamamma 2023). En consecuencia y derivado precisamente de estas complejas interrelaciones, la seguridad operacional deja de ser un factor estático para manifestarse como una propiedad dinámica y emergente del sistema en su conjunto (Muller et al. 2014).

Es por esto, que bajo la óptica de la seguridad operacional, el riesgo mediado por la realidad, se comporta como una propiedad emergente y dinámica a raíz de las propias interacciones del sistema, generando un entorno de incertidumbre (Skorupski 2016). En consecuencia, como lo menciona Cox (2008) los métodos tradicionales de gestión de riesgos exigidos por los SMS, específicamente las matrices de riesgo 5x5, presentan deficiencias matemáticas y lógicas estructurales, las cuales pueden inducir a la organización a errores sistémicos (Mhangami et al. 2022).

Particularmente, la literatura advierte acerca de las deficiencias en el uso de matrices de riesgo como la comprensión de rango, error de definición de los criterios de la matriz y la baja resolución para discriminar niveles intermedios de riesgo (Thomas et al. 2014). Esta falta de definición en las matrices puede conducir a la asignación de categorías idénticas a escenarios con niveles de tolerabilidad

numéricamente distintos generando que, en el peor de los casos, se subestimen riesgos con alto potencial de impacto.

En el mismo sentido, autores como Hubbard (2020); Jensen (2024) argumentan que estas herramientas asignan calificaciones idénticas a riesgos cuantitativamente dispares. Paralelamente, Jiang et al. (2017) argumentan que su dependencia de multiplicaciones ordinales erróneas imposibilita un análisis de tolerabilidad del riesgo con precisión; a tal punto, que la categorización cualitativa de estas matrices produce resultados inconclusos incurriendo en una falsa percepción de quien los interpreta.

Con el fin de resolver estas limitaciones metodológicas, este estudio empleó la teoría de lógica difusa expuesta por Zadeh (1965), mediante la construcción de un sistema de inferencia difuso el cual logra la matematización de la vaguedad y la subjetividad inherentes al juicio humano en sistemas complejos (Hadjimichael 2009). Este enfoque permite una transición desde la evaluación ordinal hacia una modelación no lineal del riesgo, integrando el conocimiento técnico de un panel de expertos y la data de seguridad operacional de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC 2025).

Bajo esta arquitectura técnica, el modelamiento del sistema de inferencia fue diseñado en el entorno del software Matlab. Para esto, se procedió a la fuzzificación de variables de entrada cualitativas (probabilidad y severidad) mediante la asignación de funciones de membresía que fueron procesadas a través de reglas Si y Entonces o If-Then modelando las interacciones complejas. Posterior, la salida del sistema se sometió a un proceso de defuzzificación utilizando el método de centroide con el fin de obtener un valor nítido siguiendo la aproximación metodológica de (Merola et al. 2024). Este diseño logró superar la rigidez de la lógica bivalente tradicional de Vacca González and Pantoja Benavides (2008), lo que permitió efectuar la evaluación de los riesgos en un espectro continuo reflejando las condiciones reales de la operación.

En conclusión, los hallazgos demuestran que la implementación de la inferencia soluciona problemas como el de comprensión del rango propio de las matrices (Cox 2008). Este enfoque, subsana las imprecisiones derivadas del cálculo

con escalas ordinales y mitiga de manera significativa los sesgos cognitivos del evaluador (Hubbard 2020). En consecuencia, el modelo genera índices continuos que traducen evaluaciones cualitativas en resultados cuantitativos procesables, consolidando así, una genuina toma de decisiones basada en datos (Hubbard 2020; OACI 2018).

Como principal aporte práctico, la investigación entrega una herramienta computacional desarrollada en el entorno de MATLAB, cuya arquitectura garantiza su total integración y adaptabilidad a cualquier SMS dentro del ecosistema aeronáutico internacional mejorando la precisión en la evaluación de los riesgos.

**Palabras clave:** Evaluación de riesgo, Lógica difusa, Seguridad Operacional

## **Operational Safety Risk Assessment in the Colombian Aerospace Force Using Fuzzy Logic Theory**

### **Abstract:**

Modern aviation has consolidated into a highly complex sociotechnical system (Sikora, 2015) in which the dynamic and non-linear interaction between human factors, technological infrastructure, and the organizational environment demands rigorous and robust regulatory frameworks. Given the challenges this represents for uncertainty analysis, the present research evaluates the weaknesses of traditional risk matrices (Thomas et al., 2014) and proposes overcoming them by integrating contemporary mathematical models, specifically systems based on fuzzy logic theory (Zadeh, 1965). To this end, a literature review of the primary applications of this theory was conducted, aimed at contrasting its advantages against the deficiencies of the traditional risk matrix (ICAO, 2018).

According to the International Civil Aviation Organization (ICAO, 2018), Safety Management Systems (SMS) must account for the interactions and interfaces between people, processes, and technology. In this regard, Sikora (2015) argues that, due to system complexity, hazard identification must transcend linear causality models to understand the non-deterministic nature of risk. Furthermore, Bieder (2023, p. 24) warns that aviation functions as a "system of systems," wherein multiple entities operate with their own objectives, converging through challenging interfaces.

Therefore, this research is founded on a qualitative methodological design structured under the postulates of Creswell and Creswell (2023), adopting the systematic literature review protocol proposed by Okoli (2015). The objective is to substantiate the pertinence of fuzzy logic as a superior model in operational safety assessment through the analysis of theoretical gaps and the methodological weaknesses of traditional risk matrices.

Following Okoli's (2015) protocol, the search was consolidated across academic databases including ScienceDirect, Springer, Taylor & Francis, EBSCOhost, Web of Science, and the China National Knowledge Infrastructure (CNKI). Inclusion criteria encompassed quantitative risk management models, studies implementing risk

management theory without relying on conventional evaluation matrices, and research focused on the application of fuzzy logic in domains related to operational safety and risk management.

This systematic review process initially identified 349 relevant documents. This sample was refined to  $n = 77$  texts related to risk assessment, operational safety, and fuzzy logic, ultimately consolidating a final sample of  $n = 18$ , which were processed using the RefWorks reference manager (Ex Libris, 2026). The methodical analysis of this literature revealed that the multidimensionality of aviation means the overall functioning of the system depends on the linkage of all its associated elements and their mutual interactions (Somanpillai & Vijayakumariamamma, 2023). Consequently, and derived precisely from these complex interrelations, operational safety ceases to be a static factor, manifesting instead as an emergent and dynamic property of the system as a whole (Muller et al., 2014).

From an operational safety perspective, risk mediated by reality behaves as an emergent and dynamic property stemming from the system's own interactions, generating an environment of uncertainty (Skorupski, 2016). Consequently, as noted by Cox (2008), the traditional risk management methods mandated by SMS—specifically 5x5 risk matrices—present structural mathematical and logical deficiencies that can induce systemic errors within an organization (Mhangami et al., 2022).

Specifically, the literature warns of deficiencies in the use of risk matrices such as range compression, poor definition of matrix criteria, and low resolution for discriminating intermediate risk levels (Thomas et al., 2014). This lack of resolution can lead to the assignment of identical categories to scenarios with numerically distinct tolerability levels, potentially resulting in the underestimation of risks with high impact potential.

Similarly, authors such as Hubbard (2020) and Jensen (2024) argue that these tools assign identical ratings to quantitatively disparate risks. Concurrently, Jiang et al. (2017) assert that their reliance on flawed ordinal multiplication precludes an accurate risk tolerability analysis; to such an extent that the qualitative categorization

of these matrices produces inconclusive results, creating a false perception for the decision-maker interpreting them.

To resolve these methodological limitations, this study employed the fuzzy logic theory introduced by Zadeh (1965) through the construction of a fuzzy inference system that achieves the mathematical formulation of the vagueness and subjectivity inherent in human judgment within complex systems (Hadjimichael, 2009). This approach enables a transition from ordinal evaluation to non-linear risk modeling, integrating the technical knowledge of an expert panel with operational safety data from the Colombian Aerospace Force (FAC, 2025).

Under this technical architecture, the inference system was modeled within the MATLAB software environment. Qualitative input variables (probability and severity) underwent fuzzification through the assignment of membership functions, which were then processed via If-Then rules to model complex interactions. Subsequently, the system's output underwent defuzzification using the centroid method to obtain a crisp value, following the methodological approach of Merola et al. (2024). This design successfully overcame the rigidity of the traditional bivalent logic described by Vacca González and Pantoja Benavides (2008), allowing risk assessment to be conducted across a continuous spectrum that reflects real operational conditions.

In conclusion, the findings demonstrate that implementing fuzzy inference solves inherent matrix problems such as range compression (Cox, 2008). This approach rectifies the inaccuracies derived from calculations with ordinal scales and significantly mitigates evaluator cognitive bias (Hubbard, 2020). Consequently, the model generates continuous indices that translate qualitative evaluations into actionable quantitative results, thereby consolidating genuine, data-driven decision-making (Hubbard, 2020; ICAO, 2018).

As its primary practical contribution, this research delivers a computational tool developed in the MATLAB environment, whose architecture guarantees its full integration and adaptability into any SMS within the international aeronautical ecosystem, significantly improving risk assessment accuracy.

**Keywords:** Operational Safety; Risk Assessment; Fuzzy Logic;

## Referencias

Bieder C (2023) Safety management systems and their origins : insights from the aviation industry : hbk. CRC Press, .

Cox ALJ (2008) What's Wrong with Risk Matrices 28:497–512. doi: 10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x.

Creswell JW, Creswell JD (2023) Research design : qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. Sage, Los Angeles.

Ex Libris (2026) RefWorks. doi: <https://refworks.proquest.com/>.

FAC (2025) Manual de Gestión de la Seguridad Operacional.

Hadjimichael M (2009) A fuzzy expert system for aviation risk assessment. Expert Systems with Applications 36. doi: 10.1016/j.eswa.2008.07.081.

Hubbard DW (2020) The Failure of Risk Management : Why It's Broken and How to Fix It.

Jensen RC (2024) Seven Attributes of RISK ASSESSMENT MATRIXES 69:26–33.

Jiang W, Xie C, Zhuang M, Tang Y (2017) Failure mode and effects analysis based on a novel fuzzy evidential method. Applied Soft Computing 57. doi: 10.1016/j.asoc.2017.04.008.

Merola F, Bernardeschi C, Lami G (2024) A Risk Assessment Framework Based on Fuzzy Logic for Automotive Systems. Safety 10. doi: 10.3390/safety10020041.

Mhangami W, King S, Barry D (2022) Application, Utility and Acceptability of Data Analytics in Safety Risk Management of Airline Operations 7:580–582. doi: 10.36001/phme.2022.v7i1.3295.

Muller R, Wittmer A, Drax C (2014) Aviation Risk and Safety Management- Methods and applications in Aviation Organisations. doi: 10.1007/978-3-319-02780-7.

OACI (2018) Doc 9859 — Safety Management Manual (SMM).

Okoli C (2015) A Guide to Conducting a Standalone Systematic Literature Review 37:43. doi: 10.17705/1cais.03743.

Sikora I (2015) Risk Assessment, Modelling And Proactive Safety Management System In Aviation: A Literature Review.

Skorupski J (2016) The simulation-fuzzy method of assessing the risk of air traffic accidents using the fuzzy risk matrix 88:76–87. doi: 10.1016/j.ssci.2016.04.025.

Somanpillai Vijayakumariamamma A (2023) On the treatment of risk/safety aspects within safety assessment of aviation. Dissertation, uis.

Thomas P, Bratvold RB, Bickel JE (2014) The Risk of Using Risk Matrices 6:56–66.

Vacca González H, Pantoja Benavides JF (2008) Los conjuntos borrosos, modelación cualitativa de la realidad en ingeniería 2:98–108.

Zadeh LA (1965) Fuzzy sets 8:338–353. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

Zadeh LA (1965) Fuzzy sets 8:338–353. doi: x.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

## Evaluación de un programa de formación en toma de decisiones aeronáuticas para pilotos militares



Fuente: Fotografía de cabina de Aeronave (Fuerza Aérea Colombiana, 2020)

**TE. Diego Alejandro Cubillos Reina**  
[diego.cubillos@fac.mil.co](mailto:diego.cubillos@fac.mil.co)

**Información del autor:** Oficial piloto de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, administrador aeronáutico y profesional en Ciencias Militares Aeronáuticas graduado de la Escuela Militar de Aviación (EMAVI), estudiante de la Maestría en Seguridad Operacional de la Escuela de Postgrados de la FAC. Actualmente se desempeña como comandante del Elemento de Ataque del Escuadrón de Combate 301 en el Grupo Aéreo del Casanare (GACAS). Con 10 años de experiencia en especialidad de vuelo donde ha ejercido funciones en los niveles táctico, operacional y estratégico como piloto de equipos como C-182 y copiloto de equipos C-212.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-5928-7566>

CvLAC:

[https://scienti.minciencias.gov.co/cv/lac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0000102511](https://scienti.minciencias.gov.co/cv/lac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000102511)

**Línea de investigación:** Factores Humanos

## **Resumen**

El conocimiento sobre factores humanos comprende un proceso que integra una componentes físicos, psicológicos y ambientales, que, al entrelazarse, permiten obtener diferentes estados cognitivos asociados al ser humano (Kim et al., 2022). Este proceso se inicia con percepciones de señales del entorno (Salas, E. y Maurino, D., 2010) y su interacción con los componentes del sistema de aviación (Reason, 1990). No obstante, la mala interpretación de diferentes estímulos (Proctor, R. y Salvendy, G., 2006) puede derivar en “sesgos” (Kahneman y Tversky, 1973) que obstaculizan la evaluación objetiva de riesgos durante una operación.

Ante este escenario, la conciencia situacional y el CRM (Crew Resource Management), sumados a la experiencia y la atención al detalle, se convierten en elementos críticos para optimizar la reacción del individuo bajo estrés; siendo estas determinantes en la toma de decisiones y el buen juicio, factores esenciales para la mitigación del error humano.

La Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) identificó la importancia de la toma de decisiones en la aviación, lo que permitió establecer una herramienta útil para los pilotos, como lo es el modelo FACDEE (Factor – Alternativa - Consecuencias - Decisión - Ejecución - Evaluación), pero que presenta una falencia en cuanto a su aplicabilidad e interiorización. Situación que afecta indirectamente la toma de decisiones y pone en riesgo la seguridad operacional de la institución (Vásquez, 2022).

Por ello la investigación aplicada, con enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo) como el diseño e implementación del programa integral de entrenamiento sistematizado en ADM basado en el modelo FACDEE, permite mejorar el proceso de la toma de decisiones de los pilotos de la institución. Este enfoque integra diferentes conceptos de entrenamiento unidos a la experiencia (Dismukes, 2006), lo que permite a los pilotos utilizar procesos de toma de decisiones naturalistas (basados en el reconocimiento de patrones), pero advierte que el entrenamiento debe fortalecer la capacidad de detectar cuándo esos patrones no encajan en situaciones nuevas o ambiguas.

Bajo este enfoque la investigación realizada de un análisis abductivo (Hernández S., et al., 2014), el Diseño de Triangulación Concurrente (DITRIAC) es una estrategia de investigación mixta donde el investigador:

- Recopila y analiza datos cuantitativos y cualitativos de forma simultánea (en paralelo).
- Mantiene independencia entre ambos métodos durante la fase de campo; es decir, no se mezclan mientras se recolectan.
- Realiza la triangulación en la etapa de interpretación, comparando los resultados para validar las hipótesis, encontrar convergencias o identificar discrepancias.

En contexto, este modelo permite cuantificar la frecuencia de errores o decisiones (vías estadísticas) y al mismo tiempo, percibir las causas profundas mediante la observación de la experiencia y el juicio de los pilotos, logrando una explicación lógica y completa del fenómeno

Para mejorar el anterior proceso, se aplicó un cuestionario tipo encuesta (Medina et al., 2023) a los pilotos que vuelan las aeronaves Huey 2, Ranger y Caravan -los dos primeros helicópteros y la última a la fija- empleadas por la FAC, permitiendo recolectar datos cualitativos y cuantitativos sobre la percepción de los pilotos respecto al modelo FACDEE.

Dichos cuestionarios se complementaron con entrevistas semiestructuradas (Bernal, 2016) a pilotos instructores, con el fin de identificar con precisión las posibles brechas y áreas de mejora en la forma como se aplica actualmente el modelo FACDEE, determinando así aspectos cualitativos sobre el modelo.

Los resultados revelan que los pilotos dominan la teoría del modelo, pero fallan en las habilidades prácticas para aplicarlo en situaciones reales, lo que demuestra que el simple hecho de conocer el acrónimo no es suficiente para garantizar una buena toma de decisiones y reducir el error humano (Cassens et al., 2011).

Por lo tanto, se optó por la optimización del proceso mediante el fortalecimiento tanto del entrenamiento como del emparejamiento de las herramientas disponibles, con el propósito de estructurar una forma ordenada para tomar una decisión. Como resultado, los pilotos adquieren una secuencia de trabajo e interiorizan el proceso

que se ejecuta, demostrando la importancia de obtener una buena decisión. Igualmente, esta estructura ordenada se replica en el equipo de trabajo que participa en la ejecución de las operaciones aéreas, así como en el proceso de decisión para la FAC.

De acuerdo con lo anterior, los hallazgos del presente análisis evidencian que la FAC debe propender por mejorar el dominio de las herramientas desarrolladas al interior de la institución y, del mismo modo, apoyarse en el conjunto integral de recursos disponibles. Lo anterior, se sustenta en que las estadísticas de accidentalidad aérea, tanto a nivel nacional como internacional, señalan reiteradamente el error humano y las deficiencias en la toma de decisiones aeronáuticas como las causas primarias de los accidentes e incidentes de aviación.

La constante evolución de la humanidad es directamente proporcional con la de la industria aeronáutica (AAAES, 2023). Por ello, se debe tener en cuenta que la adaptación pronta a nuevas técnicas y procedimientos de conocimiento genera una serie de desafíos doctrinales en cuanto a la gestión del cambio de conceptos básicos, con trazabilidad poco medible en el tiempo, pero de alta relevancia. Los resultados lograron aterrizar el complemento del modelo "Airmanship" involucrando al personal dentro de las operaciones aéreas y permitiendo una mejora continua a través del entrenamiento sistemático

Como consecuencia directa de esta realidad, la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) requiere la implementación de un Modelo de Gestión del Error y Toma de Decisiones Estratégicas que trascienda el entrenamiento técnico convencional. Bajo el marco de Dismukes (2006) y la metodología DITRIAC (Hernández S., et al., 2014), la institución debe articular tres ejes de acción para reducir la tasa de accidentalidad:

- Fortalecimiento de la Memoria Prospectiva: Dado que el error humano suele ocurrir por interrupciones en tareas críticas, la FAC debe estandarizar "puntos de resiliencia" en sus cabinas para retomar procesos tras una distracción.
- Triangulación de Datos de Seguridad: Utilizar el diseño DITRIAC para cruzar las estadísticas de accidentes (cuantitativas) con las experiencias narrativas de los

pilotos en simuladores (cualitativas). Esto permite identificar no solo qué falló, sino el por qué cognitivo detrás de la decisión.

- **Cultura de Autocrítica y Juicio Experto:** Integrar los conceptos de Dismukes sobre los "límites de la pericia", entrenando al piloto para reconocer cuándo su experiencia previa lo está llevando a un sesgo de confirmación peligroso.

En Conclusión, la FAC debe evolucionar hacia un sistema donde las herramientas institucionales no sean solo manuales, sino procesos dinámicos que ayuden al piloto a gestionar su propia vulnerabilidad cognitiva en tiempo real.

**Palabras clave:** Factores de riesgo, seguridad aérea, comportamiento humano, pilotos.

## **Evaluation of an Aeronautical Decision-Making Training Program for Military Pilots**

### **Abstract**

Knowledge of human factors encompasses a process integrating physical, psychological, and environmental components that, when intertwined, yield various cognitive states (Kim et al., 2022). This process begins with the perception of environmental cues (Salas & Maurino, 2010) and their interaction with aviation system components (Reason, 1990). However, the misinterpretation of stimuli (Proctor & Salvendy, 2006) can lead to "biases" (Kahneman & Tversky, 1973) that hinder objective risk assessment during operations. In this context, Situational Awareness and CRM (Crew Resource Management), combined with experience and attention to detail, are critical for optimizing reactions under stress and mitigating human error.

The Colombian Aerospace Force (FAC) identified the importance of decision-making by establishing the FACDEE model (Factor, Alternative, Consequences, Decision, Execution, Evaluation). Despite its existence, there is a gap in its practical application and internalization, which indirectly jeopardizes operational safety (Vásquez, 2022). This applied research utilizes a mixed-methods approach (quantitative and qualitative) through a Concurrent Triangulation Design (DITRIAC). This strategy allows for the simultaneous collection and analysis of data, maintaining independence during the field phase and performing triangulation during the interpretation stage to validate hypotheses and identify discrepancies.

To address these gaps, surveys were administered to Huey 2, Ranger, and Caravan pilots, complemented by semi-structured interviews with instructor pilots. Results indicate that while pilots master the theory of the FACDEE model, they struggle with the practical skills required for real-time application. Consequently, the research proposes optimizing the process by strengthening systematic training and aligning available tools to help pilots internalize a structured work sequence.

Findings suggest that the FAC must improve the mastery of institutional tools, as global accident statistics consistently point to human error and deficient ADM as

primary causes. Following the frameworks of Dismukes (2006) and DITRIAC, the institution should focus on three axes: strengthening prospective memory, triangulating safety data (crossing accident stats with narrative pilot experiences), and fostering a culture of self-criticism and expert judgment. In conclusion, the FAC must evolve toward a system where institutional tools are dynamic processes that help pilots manage their own cognitive vulnerabilities in real time.

**Keywords:** Risk factors, aviation safety, human behavior, pilots.

## Referencias

- AAAES. (2023). Manual de factores humanos para la aviación de Estado. Fuerza Aérea Colombiana.  
[https://aaaes.fac.mil.co/sites/aaaes/files/AAAES/documentos/normatividad2024/manual\\_de\\_factores\\_humanos\\_para\\_la\\_aviacion\\_de\\_estado\\_mafah.pdf](https://aaaes.fac.mil.co/sites/aaaes/files/AAAES/documentos/normatividad2024/manual_de_factores_humanos_para_la_aviacion_de_estado_mafah.pdf)
- Bernal, C. A. (2016). Metodología de la investigación (3.ª ed., pp. 244–257). Pearson Education.
- Cassens, R. E., Young, J. P., & Green, J. P. (2018). Elements related to teaching pilots aeronautical decision making (pp. 10–25). University of Minnesota.  
<https://doi.org/10.22488/okstate.18.100415>
- Dismukes, R. K. (2006). Human error in aviation. Ashgate.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1973). On the psychology of prediction. *Psychological Review*, 80(4), 237–251. <https://doi.org/10.1037/h0034747>
- Kim, J., Yu, M., & Sunghyup, S. (2022). Study on factors that influence human errors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5696. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095696>
- Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Raquel, L., Martel, C., & Roxana, C. (2023). Técnicas e instrumentos de investigación. Instituto Universitario de Innovación Digital. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.080>
- Proctor, R. W., & Salvendy, G. (2006). Sensation and perception. En G. Salvendy (Ed.), *Handbook of human factors and ergonomics* (pp. 53–80). John Wiley & Sons.
- Reason, J. (1990). Human error. Cambridge University Press.
- Salas, E., & Maurino, D. (2010). Human factors in aviation. En T. B. Sheridan (Ed.), *Organizational perspectives in human factors* (p. 52). Elsevier.
- Vásquez, C. (2023). Requisitos de un modelo de toma de decisiones aeronáuticas para la Fuerza Aérea Colombiana [Tesis de posgrado, Escuela de Posgrados de la Fuerza Aérea Colombiana].

**Fortalecimiento de competencias críticas para la seguridad operacional  
mediante el simulador REDBIRD en el CACOM-7**



Fuente: Fotografía simulador Redbird MCX. Fuerza Aeroespacial Colombiana (2020)

**TE. David Alejandro Correa Fonseca**  
[david.correa@fac.mil.co](mailto:david.correa@fac.mil.co)

**Información del autor:** Oficial piloto, profesional en ciencias militares aeronáuticas de la Escuela Militar de Aviación (EMAVI), con experiencia en aviones de ala fija, T-41, T-37, C-208, C-212, instructor de aerodinámica. Actualmente se desempeña como Especialista táctico de Seguridad Operacional del grupo de combate N.71 y profesor en el pregrado de Ciencias militares aeronáuticas de la Escuela Militar de aviación.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-8916-2047>

Cvlac:

[https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0002458990](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0002458990)

**Línea de investigación:** Factores Humanos

## **Resumen**

El Comando Aéreo de Combate No. 7 (CACOM-7) desarrolla operaciones aéreas en los departamentos de Valle del Cauca, Cauca, Nariño, Quindío y Risaralda, así como en los municipios de Litoral del San Juan y Sipí, en el departamento del Chocó (FAC, 2015). Estas áreas presentan un alto nivel de criticidad operacional debido a diversos factores, entre los que se destacan las condiciones de orden público, la compleja topografía y la variabilidad meteorológica, elementos que incrementan el nivel de riesgo en la ejecución de las operaciones aéreas. En este contexto, se hace necesario fortalecer las competencias técnicas y no técnicas fundamentales en el desarrollo de las misiones constitucionales en el CACOM-7.

Rodríguez y Ramírez (2023) afirman:

El desempeño humano en aviación requiere un abordaje integral, comprendiendo que sus componentes “técnicos” no alcanzan resultados aislados de los componentes “no técnicos” y viceversa. Debido a esto, el enfoque de competencias cobra pertinencia y relevancia, por cuanto articula conocimientos, habilidades y actitudes en un marco de comportamiento correcto, propio del principio institucional de integralidad (p.69).

Por otro lado, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) define las competencias como la “combinación de conocimientos, habilidades y actitudes (KSAS) requeridas para desempeñar una tarea dentro de un estándar prescrito bajo una condición determinada” (OACI,2013). Desde esta perspectiva, el entrenamiento basado en competencias constituye una herramienta clave para mejorar el desempeño operacional de las tripulaciones del CACOM-7 y contribuir a la mitigación de riesgos asociados a la operación aérea en entornos complejos.

El presente estudio tiene como objetivo proponer la implementación de un entrenamiento basado en competencias mediante el simulador REDBIRD MCX, como una estrategia para integrar las barreras tecnológicas y de aprendizaje organizacional dentro del Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional. Este enfoque permite fortalecer las competencias operacionales de las tripulaciones en

un entorno controlado, facilitando la gestión de riesgos antes de su materialización en vuelo. En este sentido, el simulador REDBIRD MCX (2026) se presenta como la herramienta idónea para este propósito tipo AADT, ya que su versatilidad técnica permite una formación escalable que abarca desde la etapa estudiantil hasta el nivel de tripulaciones profesionales.

Asimismo, recientemente se resalta que el uso de simuladores, combinado con procesos estructurados de retroalimentación y debriefing, potencia el desarrollo de competencias técnicas, cognitivas y digitales, esenciales para la operación en sistemas aeronáuticos modernos (Ramanjaneyulu, 2026): Por lo tanto, las herramientas tecnológicas no son suficientes por si solas para realizar un entrenamiento completo. Por consiguiente, es necesario un entrenamiento estructurado que desarrolle estas tecnologías de simulación (REDBIRD MCX), con la toma de decisiones, trabajo en equipo y la capacidad para adaptarse a un contexto operacional crítico. Aunque todos estos enfoques son prometedores, su uso en la aviación se enfrenta a muchas barreras a nivel institucional, de instructor, de aprendizaje y regulatorio (Rizvi et al., 2025).

La investigación se orientó al diseño de un entrenamiento basado en competencias mediante el simulador REDBIRD, dirigido a los tripulantes del Comando Aéreo de Combate No. 7 (CACOM-7), bajo un enfoque cualitativo y un razonamiento deductivo. Este proceso partió de los lineamientos institucionales de la Fuerza Aeroespacial Colombiana y de la concepción de competencia definida por la OACI como la integración de conocimientos, habilidades y actitudes. Metodológicamente, el estudio adoptó un método descriptivo, correlacional y explicativo (Hernández, 2023), al buscar no solo caracterizar las competencias, sino también analizar su relación con variables operacionales como las horas de vuelo y los sucesos asociados al factor humano en el periodo 2019–2025.

El desarrollo de la investigación fue centrada en comprender el desempeño humano dentro del contexto operacional del CACOM-7. En este sentido, se orientó a identificar las competencias susceptibles de mejora mediante el análisis de información estadística del sistema de información operacional SIIOC (horas de vuelo IFR/VFR por equipo y año), la revisión de reportes operacionales asociados al

factor humano y la aplicación de encuestas estructuradas tipo Likert a los tripulantes. Estos insumos permitieron consolidar matrices estadísticas, identificar patrones conductuales y establecer un diagnóstico de las competencias críticas a fortalecer.

Se identificaron como competencias críticas para los tripulantes del CACOM-7: aplicación de conocimientos, aplicación de procedimientos, comunicación, conciencia situacional, gestión de la trayectoria de vuelo automática y manual, capacidad para el combate, gestión del volumen de trabajo, liderazgo y trabajo en equipo, así como resolución de problemas y toma de decisiones.

Los resultados de la encuesta tipo Likert, aplicada a una muestra de 27 tripulantes del CACOM-7 y validada bajo los criterios del autor del inventario de competencias clave para los pilotos de la FAC, evidenciaron que el personal se autopercibe con un desempeño sólido en todas las competencias evaluadas. Los puntajes obtenidos oscilaron en una escala de 0 a 5 (donde 0 corresponde a un nivel bajo y 5 a un nivel muy alto), con promedios entre 4.16 y 4.83, lo que refleja un nivel global de competencia medio–alto. No obstante, al analizar los sucesos operacionales registrados entre 2019 y 2025, se identificó una presencia recurrente de factores humanos, evidenciando brechas en el desempeño de dichas competencias, las cuales no se manifestaron de manera óptima en contextos operacionales reales.

Para concluir, la implementación de un entrenamiento basado en competencias mediante el simulador REDBIRD MCX resulta pertinente y eficiente para el fortalecimiento del desempeño operacional de los tripulantes del CACOM-7. Los entornos de simulación favorecen el desarrollo de habilidades técnicas y no técnicas en contextos controlados, permitiendo la práctica de escenarios complejos y de alto riesgo sin comprometer la seguridad real, además de facilitar la repetición, retroalimentación y mejora continua del desempeño (Rizvi, 2025) . Asimismo, destaca que los enfoques de entrenamiento por competencias, apoyados en simulación y tecnologías digitales, contribuyen al desarrollo de competencias críticas como la toma de decisiones, la conciencia situacional y la adaptabilidad, fundamentales en entornos aeronáuticos de alta exigencia (Ramanjaneyulu, 2026).

De igual manera, el análisis de factores humanos en los sucesos operacionales del CACOM-7 evidencia que el error humano continúa siendo una de las principales causas de incidentes y accidentes, lo que refuerza la necesidad de estrategias de entrenamiento que integren dimensiones cognitivas, organizacionales y conductuales para mejorar la seguridad operacional (Okine, 2025). En este contexto, el uso de simuladores bajo un enfoque estructurado no solo fortalece competencias individuales, sino que también contribuye a la resiliencia de los sistemas sociotécnicos, al permitir una mejor preparación frente a situaciones imprevistas y favorecer la adaptación del desempeño en escenarios complejos (Quadros, 2026). En consecuencia, el entrenamiento en competencias mediante el simulador REDBIRD se consolida como una herramienta estratégica para la mitigación del riesgo operacional y el fortalecimiento integral de la seguridad aérea.

**Palabras clave:** Factores Humanos, Entornos simulados, Entrenamiento basado en competencias, Dispositivo Avanzado de Entrenamiento de Aviación (AATD).

## **Strengthening Critical Competencies for Operational Safety Using the REDBIRD Simulator at CACOM-7**

### **Abstract**

Air Combat Command No. 7 (CACOM-7) conducts air operations in the departments of Valle del Cauca, Cauca, Nariño, Quindío, and Risaralda, as well as in the municipalities of Litoral del San Juan and Sipí, in the department of Chocó (FAC, 2015). These areas present a high level of operational criticality due to various factors, among which public order conditions, complex topography, and meteorological variability stand out—elements that increase the level of risk in the execution of air operations. In this context, it becomes necessary to strengthen the fundamental technical and non-technical competencies for the development of constitutional missions at CACOM-7.

Rodríguez and Ramírez (2023) state:

Human performance in aviation requires a comprehensive approach, understanding that its "technical" components do not achieve results in isolation from "non-technical" components and vice versa. Due to this, the competency-based approach gains pertinence and relevance, as it articulates knowledge, skills, and attitudes within a framework of correct behavior, characteristic of the institutional principle of integrality (p. 69).

On the other hand, the International Civil Aviation Organization (ICAO) defines competencies as the "combination of knowledge, skills, and attitudes (KSAs) required to perform a task to a prescribed standard under a certain condition" (ICAO, 2013). From this perspective, competency-based training constitutes a key tool for improving the operational performance of CACOM-7 crews and contributing to the mitigation of risks associated with air operations in complex environments.

The present study aims to propose the implementation of competency-based training using the REDBIRD MCX simulator as a strategy to integrate technological and organizational learning barriers within the Safety Management System. This approach allows for the strengthening of crews operational competencies in a controlled environment, facilitating risk management prior to their materialization in

flight. In this regard, the REDBIRD MCX simulator (2026) is presented as the ideal tool for this AADT-type purpose, since its technical versatility allows for scalable training ranging from the student stage to the level of professional crews.

Likewise, it has recently been highlighted that the use of simulators, combined with structured feedback and debriefing processes, enhances the development of technical, cognitive, and digital competencies, which are essential for operations in modern aeronautical systems (Ramanjaneyulu, 2026). Therefore, technological tools are not sufficient on their own to provide complete training. Consequently, structured training is necessary to integrate these simulation technologies (REDBIRD MCX) with decision-making, teamwork, and the ability to adapt to a critical operational context. Although all these approaches are promising, their use in aviation faces many institutional, instructor, learning, and regulatory barriers (Rizvi et al., 2025).

The research was oriented toward the design of competency-based training using the REDBIRD simulator, aimed at the crew members of Air Combat Command No. 7 (CACOM-7), under a qualitative approach and deductive reasoning. This process started from the institutional guidelines of the Colombian Aerospace Force and the concept of competency defined by ICAO as the integration of knowledge, skills, and attitudes. Methodologically, the study adopted a descriptive, correlational, and explanatory method (Hernández, 2023), seeking not only to characterize competencies but also to analyze their relationship with operational variables such as flight hours and events associated with human factors in the 2019–2025 period.

The development of the research was centered on understanding human performance within the operational context of CACOM-7. In this sense, it was aimed at identifying competencies susceptible to improvement through the analysis of statistical information from the operational information system SIIOC (IFR/VFR flight hours by equipment and year), the review of operational reports associated with human factors, and the application of structured Likert-type surveys to crew members. These inputs made it possible to consolidate statistical matrices, identify behavioral patterns, and establish a diagnosis of the critical competencies to be strengthened.

The following were identified as critical competencies for CACOM-7 crew members: application of knowledge, application of procedures, communication, situational awareness, management of automatic and manual flight paths, combat capability, workload management, leadership and teamwork, as well as problem-solving and decision-making.

The results of the Likert-type survey, applied to a sample of 27 CACOM-7 crew members and validated under the criteria of the author of the key competency inventory for FAC pilots, showed that the personnel self-perceive a solid performance in all the evaluated competencies. The scores obtained ranged on a scale of 0 to 5 (where 0 corresponds to a low level and 5 to a very high level), with averages between 4.16 and 4.83, reflecting an overall medium-high level of competency. However, when analyzing the operational events recorded between 2019 and 2025, a recurrent presence of human factors was identified, evidencing gaps in the performance of these competencies, which did not manifest optimally in real operational contexts.

To conclude, the implementation of competency-based training using the REDBIRD MCX simulator is pertinent and efficient for strengthening the operational performance of CACOM-7 crew members. Simulation environments favor the development of technical and non-technical skills in controlled contexts, allowing the practice of complex and high-risk scenarios without compromising real safety, in addition to facilitating repetition, feedback, and continuous performance improvement (Rizvi, 2025). Likewise, it highlights that competency-based training approaches, supported by simulation and digital technologies, contribute to the development of critical competencies such as decision-making, situational awareness, and adaptability, which are fundamental in highly demanding aeronautical environments (Ramanjaneyulu, 2026).

Similarly, the analysis of human factors in the operational events of CACOM-7 shows that human error continues to be one of the main causes of incidents and accidents, reinforcing the need for training strategies that integrate cognitive, organizational, and behavioral dimensions to improve operational safety (Okine, 2025). In this context, the use of simulators under a structured approach not only

strengthens individual competencies but also contributes to the resilience of sociotechnical systems by allowing better preparation for unforeseen situations and favoring the adaptation of performance in complex scenarios (Quadros, 2026). Consequently, competency-based training using the REDBIRD simulator is consolidated as a strategic tool for mitigating operational risk and comprehensively strengthening aviation safety.

**Keywords:** Human Factors, Simulated Environments, Competency-Based Training, Advanced Aviation Training Device (AATD).

## Referencias

- Cáceres, H. (2017). Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas. Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.
- Ceken, S. (2024). Non-technical skills proficiency in aviation pilots: A systematic review. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 11(3). <https://doi.org/10.58940/2374-6793.1933>
- Fuerza Aeroespacial Colombiana [FAC] (2020). Centro de Excelencia Operacional, un camino de aprendizaje, tecnología e innovación. [Fotografía]. <https://www.fac.mil.co/es/noticias/centro-de-excelencia-operacional-un-camino-de-aprendizaje-tecnologia-e-innovacion>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2023). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (7.ª ed.). McGraw-Hill.
- International Air Transport Association. (2014). Data report for evidence-based training. <https://cutt.ly/e4a4xdC>
- Okine, E. A., Zarei, E., Roggow, B. J., & Dehghan, N. (2026). Evolution of human factors research in aviation safety: A systematic review and bibliometric analysis of the intellectual structure. *Journal of Safety Science and Resilience*, 7, 100249. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2025.100249>
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2013). Documento 9995 AN/497: Manual de instrucción basada en datos comprobados. <https://cutt.ly/54ssDrh>
- Quadros, B. C., Saurin, T. A., & Terra, S. X. (2026). Improving system design to support resilience through self-organisation: The case of a network of labour inspectors for accident investigations. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2026.107147>
- Ramanjaneyulu, S., Jalandharachari, A. S., Bindhani, S., Kasodhan, P., Harish, D., & Radhakrishna Murthy, B. (2026). Integrating digital competency into aviation training: An auditable inputs–processes–outcomes framework. *Journal of the Air Transport Research Society*. <https://doi.org/10.1016/j.jatrs.2026.100104>
- Rodríguez Suárez, C., & Ramírez Segura, B. F. (2023). Inventario de competencias clave para los pilotos de la FAC. Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.

Rizvi, S. A. Q., Rehman, U., Cao, S., & Moncion, B. (2025). Exploring technology acceptance of flight simulation training devices and augmented reality in general aviation pilot training. *Scientific Reports*, 15, 2302.

<https://doi.org/10.1038/s41598-025-85448-7>

## Factores de Riesgo Asociados a la Fatiga en Controladores de Tránsito Aéreo de la Fuerza Aeroespacial Colombiana



Fuente: Controladores de Tránsito Aéreo de la FAC. Fuerza Aeroespacial Colombiana (2023).

**TE. Mayorga Mendieta Miguel Ángel**  
[miguel.mayorga@fac.mil.co](mailto:miguel.mayorga@fac.mil.co)

**Información del autor:** Oficial piloto de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, Ingeniero Informático y Profesional en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez, con experiencia en prevención operacional a partir de la operacional, seguimiento a la implementación de programas de prevención de accidentes y análisis de datos de vuelo en el Comando Aéreo de Combate No. 2 y el Comando Aéreo de Combate No. 3. Actualmente, comandante de la Escuadrilla Entrenamiento y Estadística del Escuadrón de Combate 312.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-2721-1267>

Cvlac: <https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/EnRecursoHumano/inicio.do>

**Línea de investigación:** Factores Humanos.

## Resumen

La fatiga es un estado fisiológico que se caracteriza por la reducción de la capacidad de desempeño mental o físico de una persona (OACI, 2020). Esta condición disminuye el estado de alerta y produce somnolencia (Wingelaar-Jagt et al., 2021), constituyendo así una afectación negativa del desempeño cognitivo. De acuerdo con recomendaciones de la Autoridad Aeronáutica de Aviación de Estado (2022), la fatiga es un factor de riesgo que debe ser mitigado para garantizar operaciones confiables y prevenir incidentes de aviación.

El desempeño de los controladores de tránsito aéreo impacta directamente en las operaciones aéreas, contribuyendo a que se desarrollen de manera eficiente y segura o, de lo contrario, afectando la seguridad de esas operaciones (Bongo & Seva, 2021). Por ejemplo, errores derivados de la degradación cognitiva asociada a la fatiga pueden comprometer el correcto aseguramiento de la separación entre las aeronaves en una región de vuelo e inducir a un acercamiento peligroso entre aeronaves o, incluso, colisiones en vuelo.

En el caso específico de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (2025), si bien establece lineamientos generales para la gestión del riesgo, no se evidencian estrategias específicas orientadas a la mitigación de la fatiga en los controladores de tránsito aéreo de la institución. Además, Fernández de la Rosa (2021) identificó en su estudio la presencia de fatiga leve y moderada en controladores de tránsito aéreo de la FAC, recomendando la implementación de un sistema de gestión de los riesgos de fatiga.

En este sentido, el objetivo de la presente investigación es identificar los factores de riesgo asociados a la fatiga en controladores de tránsito aéreo de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, con el fin de orientar la estructuración de estrategias de gestión del riesgo de fatiga en dicho personal.

Tomando como referencia la guía para la supervisión de la fatiga propuesta por OACI (2020), se efectuó una investigación con enfoque mixto y diseño secuencial exploratorio (Creswell y Creswell, 2023), estableciendo como punto de partida la identificación de factores asociados a la fatiga a nivel general y en controladores de

tránsito aéreo, por medio de una revisión de literatura. Tomando como referencia la metodología PRISMA (Page et al., 2021), se seleccionaron 26 artículos y 4 tesis, obtenidos de bases de datos como ProQuest, ScienceDirect, IEEE Xplore, Google Scholar, SciELO, Taylor & Francis y el repositorio de la Escuela de Postgrados de la FAC. Estos documentos permitieron identificar un total de 20 factores asociados a la fatiga, categorizados en factores fisiológicos, carga de trabajo, condiciones del entorno, condiciones psicosociales y gestión de personal.

Posteriormente, en busca de fortalecer la identificación de factores influyentes, mediante una matriz de análisis se efectuó la revisión de los reportes de seguridad operacional, registrados dentro de la FAC entre los años 2019 y 2024, identificando un total de 7 reportes relacionados directamente con fatiga en controladores de tránsito aéreo, donde se evidencian factores categorizados como condiciones del entorno, carga de trabajo, factores fisiológicos y gestión de personal.

Por último, como parte de la investigación, se aplicó un cuestionario con preguntas cerradas y preguntas abiertas, diligenciado por 95 controladores de tránsito aéreo de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), los cuales constituyeron la muestra sobre una población de 194 controladores activos en la Fuerza, con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 7,3%, con base en el cálculo de muestra para población finita expuesto por Aguilar-Barojas (2005). De esta manera, se logró identificar el nivel de influencia de los factores previamente identificados según la percepción de la muestra. Cabe aclarar que las preguntas abiertas se analizaron cualitativamente por medio del software ATLAS.ti (CAQDAS, 2025), permitiendo detectar factores de riesgo emergentes relacionados con ejercicio físico, categorizado como factor fisiológico, y la criticidad de funciones, categorizada como carga de trabajo.

A partir de lo anterior, fue posible la identificación de 29 factores influyentes en la fatiga, algunos que la afectan negativamente y otros que ayudan a mitigarla, que a su vez fueron categorizados en factores fisiológicos, carga de trabajo, condiciones del entorno, condiciones psicosociales, gestión de personal y gestión institucional. Esta información permite la formulación de la estrategia general de gestión de fatiga, mediante mecanismos de prevención que abarquen múltiples factores. Sin embargo,

dado el número de factores identificados, se hace necesaria la aplicación de un análisis de componentes principales (Jolliffe, 2002), tomando la opinión de expertos en el área de conocimiento para definir los factores que, al ser mitigados por medio de mecanismos de prevención, asegurarán la gestión efectiva de la fatiga en los controladores de tránsito aéreo.

En conclusión, la investigación aquí relacionada permite direccionar y estructurar de manera adecuada los procesos de gestión de los riesgos asociados a la fatiga en controladores de tránsito aéreo, siendo un componente principal del sistema de gestión de la seguridad operacional en la FAC. De esta manera, se contribuye a la prevención de sucesos operacionales a través del aseguramiento del rendimiento cognitivo adecuado en los controladores de tránsito aéreo de la FAC, y, por ende, se contribuye a la preservación del talento humano y los recursos del Estado.

**Palabras clave:** controladores de tránsito aéreo, factores humanos, fatiga, gestión de riesgos, sueño.

## **Fatigue-Related Risk Factors in Air Traffic Controllers of the Colombian Aerospace Force**

### **Abstract**

Fatigue is a physiological state characterized by a reduction in an individual's mental or physical performance capacity (ICAO, 2020). This condition decreases alertness and induces sleepiness (Wingelaar-Jagt et al., 2021), thereby constituting a negative effect on cognitive performance. According to the AAAES (2022), fatigue is a risk factor that must be mitigated to ensure reliable operations and prevent aviation incidents.

The performance of air traffic controllers directly impacts air operations, contributing to their safe and efficient execution or, otherwise, affecting their safety (Bongo & Seva, 2021). For example, errors resulting from fatigue-related cognitive degradation may compromise the proper assurance of aircraft separation within a given airspace and lead to hazardous proximity between aircraft or even mid-air collisions.

In the case of the Colombian Aerospace Force (2025), although general risk management guidelines are established, no specific strategies aimed at mitigating fatigue in air traffic controllers within the institution are identified. Furthermore, Fernández de la Rosa (2021) identified the presence of mild and moderate fatigue among air traffic controllers of the Colombian Aerospace Force, recommending the implementation of a fatigue risk management system.

In this context, the objective of this research is to identify risk factors associated with fatigue in air traffic controllers of the Colombian Aerospace Force, in order to guide the development of fatigue risk management strategies for this personnel.

Taking as reference the fatigue management guidance proposed by ICAO (2020), a study with a mixed-methods approach and a sequential exploratory design (Creswell & Creswell, 2023) was conducted, establishing as a starting point the identification of fatigue-related factors at both a general level and in air traffic controllers through a literature review. Following the PRISMA methodology (Page et al., 2021), 26 articles and 4 theses were selected from databases such as ProQuest, ScienceDirect, IEEE Xplore, Google Scholar, SciELO, Taylor & Francis, and the

Colombian Aerospace Force Postgraduate School repository. These documents allowed the identification of a total of 20 fatigue-related factors, categorized into physiological factors, workload, environmental conditions, psychosocial conditions, and personnel management.

Subsequently, in order to strengthen the identification of influencing factors, a review of operational safety reports recorded within the Colombian Aerospace Force between 2019 and 2024 was conducted using an analysis matrix, identifying a total of 7 reports directly related to fatigue in air traffic controllers, in which factors categorized as environmental conditions, workload, physiological factors, and personnel management were identified.

Finally, as part of the research, a questionnaire consisting of closed-ended and open-ended questions was administered to 95 air traffic controllers of the Colombian Aerospace Force (FAC), who constituted the sample from a population of 194 active controllers in the Force, with a 95% confidence level and a 7.3% margin of error, based on the finite population sample size calculation proposed by Aguilar-Barojas (2005). In this way, the level of influence of the previously identified factors was determined based on the perception of the sample. It should be noted that open-ended questions were analyzed qualitatively using ATLAS.ti software (CAQDAS, 2025), allowing the identification of emerging risk factors related to physical exercise, categorized as a physiological factor, and task criticality, categorized as workload.

Based on the above, a total of 29 factors influencing fatigue were identified, some negatively affecting it and others contributing to its mitigation, which were categorized into physiological factors, workload, environmental conditions, psychosocial conditions, personnel management, and institutional management. This information allows the formulation of a general fatigue management strategy through preventive mechanisms that address multiple factors. However, given the number of identified factors, the application of principal component analysis (Jolliffe, 2002) becomes necessary, incorporating expert judgment to define the factors that, when mitigated through preventive mechanisms, will ensure effective fatigue management in air traffic controllers.

In conclusion, the research presented enables the proper direction and structuring of fatigue risk management processes in air traffic controllers, constituting a main component of the operational safety management system within the Colombian Aerospace Force. In this way, it contributes to the prevention of operational occurrences by ensuring adequate cognitive performance in air traffic controllers, thereby supporting the preservation of human resources and state assets.

**Keywords:** air traffic controllers, human factors, fatigue, risk management, sleep.

## Referencias

- Aguilar-Barojas, S. (2005). *Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud*. Salud en Tabasco, 11(1–2), 333–338.
- Autoridad Aeronáutica de Aviación de Estado. (2022). *RACAE 211 Gestión de Tránsito Aéreo*.
- Bongo, M., & Seva, R. (2021). *Effect of fatigue in air traffic controllers' workload, situation awareness, and control strategy*. The International Journal of Aerospace Psychology, 32(1–2), 1–23. <https://doi.org/10.1080/24721840.2021.1896951>
- Creswell, J. W. y Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (6th ed.)*. SAGE Publications.
- Computer-assisted qualitative data analysis software (CAQDAS) (2025). *Software ATLAS.ti inc (25 bajo licencia L-10B-1CB)[Computer Software]*. [https://atlasti.com/?\\_gl=1\\*sphcbw\\*\\_up\\*MQ..\\*\\_gs\\*MQ..&gclid=Cj0KQCQiAk6rNBhCxARIsAN5mQLuy3mDvW1bZLXVIU7Gc0V\\_LWPF2lh2J-SwblB3f17ME04fOYj1nT6waAvzvEALw\\_wcB&gbraid=0AAAAApc8-YDQXvCQdXFO4\\_YAesvg5fzJi](https://atlasti.com/?_gl=1*sphcbw*_up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=Cj0KQCQiAk6rNBhCxARIsAN5mQLuy3mDvW1bZLXVIU7Gc0V_LWPF2lh2J-SwblB3f17ME04fOYj1nT6waAvzvEALw_wcB&gbraid=0AAAAApc8-YDQXvCQdXFO4_YAesvg5fzJi)
- Fernández de la Rosa, F. (2021). *Caracterización de la Frecuencia de Fatiga en el Personal de Controladores de Tránsito Aéreo de los Comandos Aéreos de Combate No. 3, 4 y 5 y de los Grupos Aéreos del Amazonas y del Caribe en la Fuerza Aérea Colombiana durante el mes de marzo de 2021*.
- Fuerza Aeroespacial Colombiana. (2023, agosto 16). Controladores aéreos: una labor vital para la seguridad operacional. <https://www.fac.mil.co/es/noticias/controladores-aereos-una-labor-vital-para-la-seguridad-operacional>
- Fuerza Aeroespacial Colombiana. (2025). *Manual de Gestión de la Seguridad Operacional – MAGSO (3ª ed.)*. IGEFA Ed.
- Jolliffe, I.T. (2002). *Principal Component Analysis, Series: Springer Series in Statistics*. 2nd Edition, Springer, XXIX, 487 pp. 28.
- OACI. (2020). Documento 9966: *Manual para la supervisión de los enfoques de gestión de la fatiga (2ª ed.)*.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville,

J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española De Cardiología*, 74(9), 790–799. 10.1016/j.recesp.2021.06.016

Wingelaar-Jagt, Y. Q., Wingelaar, T. T., Riedel, W. J., y Ramaekers, J. G. (2021). Fatigue in aviation: Safety risks, preventive strategies and pharmacological interventions. *Frontiers in Physiology*, 12, Article 712628. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.712628>

## Diseño Taxonómico y Seguridad Operacional: Un Pilar para la Gestión Efectiva de Sucesos en la FAC



Fuente. Fotografía Hércules C-130 de la FAC. (Fuerza Aérea Colombiana, 2021).

### **TS. Jaime Augusto Vega Martínez**

[jaime.vega@epfac.edu.co](mailto:jaime.vega@epfac.edu.co)

**Información del autor:** Técnico Especialista en Investigación de Accidentes Aéreos de la FAC, Ingeniero Industrial y maestrante de la Escuela de Posgrados “José Edmundo Sandoval”, 8 años de experiencia en seguridad operacional, investigación de accidentes y 24 años en mantenimiento aeronáutico

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-7857-7536>

Cvlac:

[https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0002458986](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0002458986)

### **TS. Arbey Gonzalo Pinto Arévalo**

[gonzalo.pinto@fac.mil.co](mailto:gonzalo.pinto@fac.mil.co)

**Información del autor:** Técnico Especialista en Investigación de Incidentes Aéreos de la FAC, Ingeniero Industrial y maestrante de la Escuela de Posgrados “José Edmundo Sandoval”, 14 años de experiencia en seguridad operacional e investigación de accidentes.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-1290-0885>

Cvlac:

[https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0002245270](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0002245270)

**Línea de investigación:** Investigación de Accidentes Aéreos

## **Resumen**

En el contexto de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, la investigación de los sucesos de seguridad operacional se rige por estándares internacionales como el Anexo 13 de la Organización de Aviación Civil Internacional (International Civil Aviation Organization [ICAO], 2020) y el Reglamento Aeronáutico de Aviación de Estado 114 (Autoridad Aeronáutica de Aviación de Estado [AAAES], 2025), los cuales exigen la identificación y clasificación de los factores causales de incidentes y accidentes, con resultados válidos y comparables en el marco de la aviación nacional e internacional (ICAO, 2016), con el fin de fortalecer la seguridad y los programas de prevención de seguridad operacional de la FAC (Fuerza Aeroespacial Colombiana [FAC], 2025). La problemática de esta investigación se encuentra asociada con errores en la clasificación de los factores causales de los sucesos de seguridad operacional en la FAC, fenómeno que podría ser atribuido a tres aspectos principales como son deficiencias en el diseño de las taxonomías utilizadas por los investigadores de la FAC, el uso simultáneo de múltiples sistemas de clasificación o una selección inadecuada de factores causales (Vega & Pinto, 2025).

Considerando que la formulación de un problema de investigación debe basarse en una brecha evidenciada mediante una revisión sistemática, siguiendo una metodología con enfoque cualitativo y fundamentando el proceso en la exploración profunda (Creswell & Creswell, 2023), mediante el uso de varios instrumentos como revisión documental, cuestionarios, entrevistas y una matriz comparativa de taxonomías existentes a nivel mundial, se buscó obtener datos e información que facilitara el diseño de una taxonomía de causalidad para la FAC.

Mediante el análisis exhaustivo de informes finales de investigación, fue posible evaluar la clasificación de los factores causales de los sucesos de seguridad operacional de la FAC ocurridos entre 2019 y 2024 (FAC, 2019–2024), identificando falencias de las taxonomías de clasificación y errores por parte del personal de investigadores al momento de clasificar las causas de los sucesos. En algunos casos, la falta de especificidad en las categorías actuales obliga a los investigadores a recurrir a criterios de proximidad o al uso recurrente de la subcategoría “otros”

(FAC, 2019–2024), comprometiendo la exactitud y fidelidad de la información recolectada.

De igual manera, a través de un cuestionario (Creswell & Creswell, 2023) realizado a expertos en seguridad operacional, fueron identificados factores sistémicos que obstaculizan la precisión en la categorización de los factores causales dentro de investigación de sucesos de seguridad operacional; entre estos se identifican la limitada aplicabilidad de las taxonomías vigentes a la misión y operaciones de la FAC (Lund & Ornager, 2016) y la coexistencia de múltiples sistemas de clasificación, lo cual genera ambigüedad de factores causales (Häge & Rehse, 2025). Por otra parte, a través de una matriz comparativa de taxonomías fue posible identificar cambios y procesos de evolución en el diseño, aspectos importantes para el nuevo diseño taxonómico (Kundisch et ál., 2021).

Los datos obtenidos por medio de los diferentes instrumentos de investigación fueron un gran aporte para el diseño de una nueva taxonomía de causalidad, siendo un avance significativo para el fortalecimiento del proceso de investigación, que según Rodríguez de Prada (2012), se ve potenciada cuando los datos recogidos se complementan con otros datos relevantes, para formar la base del análisis estadístico de los datos (Creswell & Creswell, 2023). La propuesta de una nueva taxonomía genera un beneficio estratégico para la Dirección de Seguridad Operacional de la FAC, facilitando la claridad y exactitud en la clasificación de factores causales de los sucesos de seguridad operacional (ICAO, 2018; Reason, 1997), mejorar la consistencia, trazabilidad de la información registrada, la calidad de los datos obtenidos (Redman, 2013), el análisis estadístico y la identificación de tendencias.

La confiabilidad de datos permite identificar tendencias y errores sistémicos (Reason, 1997), brindando a la FAC una claridad en la toma de decisiones (Federal Aviation Administration [FAA], 2023), así como, la implementación de acciones preventivas que permitan guiar la formulación de recomendaciones efectivas y estrategias de mitigación sostenibles (Hawkins, 2017). En consecuencia, se optimiza y fortalece el proceso de toma de decisiones dentro del Sistema de Gestión de

Seguridad Operacional, contribuyendo de manera directa y efectiva a la prevención de accidentes y fortalecimiento de la seguridad operacional institucional (FAA, 2023).

**Palabras clave:** Taxonomía, investigación de accidentes, factores causales, clasificación de datos, Gestión de la Seguridad Operacional.

## **Developing a Causality Taxonomy for Operational Safety Investigations: A Case Study of the Colombian Aerospace Force**

### **Abstract**

Within the context of the Colombian Aerospace Force (FAC), the investigation of operational safety events is governed by international standards, such as Annex 13 of the International Civil Aviation Organization (ICAO, 2020), and the State Aviation Aeronautical Regulation 114 (State Aviation Aeronautical Authority [AAAES], 2025). These frameworks mandate the identification and classification of incident and accident causal factors to yield valid, comparable results within the national and international aviation frameworks (ICAO, 2016). Ultimately, this process aims to strengthen the FAC's operational safety and prevention programs (Colombian Aerospace Force [FAC], 2025). The core problem addressed in this research concerns errors in classifying the causal factors of FAC operational safety events. This phenomenon can be attributed to three primary aspects: deficiencies in the design of the taxonomies used by FAC investigators, the simultaneous use of multiple classification systems, and the inadequate selection of causal factors (Vega & Pinto, 2025).

Recognizing that the formulation of a research problem must stem from a gap identified through systematic review, this study adopted a qualitative methodology grounded in in-depth exploration (Creswell & Creswell, 2023). Through instruments such as document review, questionnaires, interviews, and a comparative matrix of global taxonomies, data was gathered to facilitate the design of a specialized causality taxonomy for the FAC.

A comprehensive analysis of final investigation reports enabled the evaluation of causal factor classifications for FAC operational safety events occurring between 2019 and 2024 (FAC, 2019–2024). This review revealed flaws in the classification taxonomies and errors made by investigators when categorizing event causes. In some instances, the lack of specificity in current categories forces investigators to rely on proximity criteria or to over-utilize the "other" subcategory (FAC, 2019–2024), thereby compromising the accuracy and fidelity of the collected data.

Similarly, a questionnaire (Creswell & Creswell, 2023) administered to operational safety experts identified systemic factors that hinder accurate categorization during investigations. Notable obstacles include the limited applicability of current taxonomies to the FAC's specific mission and operations (Lund & Ornager, 2016), as well as the coexistence of multiple classification systems, which generates causal factor ambiguity (Häge & Rehse, 2025). Furthermore, a comparative matrix of taxonomies highlighted evolutionary design processes, providing crucial insights for the new taxonomic architecture (Kundisch et al., 2021).

The data obtained through these research instruments significantly informed the design of a new causality taxonomy, representing a major advancement in strengthening the investigation process. As noted by Rodríguez de Prada (2012), this process is enhanced when collected data is supplemented with other relevant information to form a solid foundation for statistical analysis (Creswell & Creswell, 2023). Proposing a new taxonomy offers a strategic benefit to the FAC Directorate of Operational Safety by facilitating clarity and accuracy in classifying causal factors (ICAO, 2018; Reason, 1997). This improves consistency, information traceability, data quality (Redman, 2013), statistical analysis, and trend identification.

Reliable data allows for the identification of trends and systemic errors (Reason, 1997), providing the FAC with clarity for decision-making (Federal Aviation Administration [FAA], 2023). It also guides the implementation of preventive actions, effective recommendations, and sustainable mitigation strategies (Hawkins, 2017). Consequently, the decision-making process within the Safety Management System is optimized, directly and effectively contributing to accident prevention and the strengthening of institutional operational safety (FAA, 2023).

**Keywords:** Taxonomy, accident investigation, causal factors, data classification, Safety Management.

## Referencias

- Autoridad Aeronáutica de Aviación de Estado. (2025). RACAE 114: Investigación de accidentes e incidentes de aviación de Estado. Autoridad Aeronáutica de Aviación de Estado.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications.
- FAC. (2025). *Manual de gestión de la seguridad operacional – MAGSO* (3.<sup>a</sup> ed.). IGEFA, Departamento Estratégico Doctrina Aérea y Espacial.
- Federal Aviation Administration. (2023). FAA Order 8040.4C: Safety risk management policy. U.S. Department of Transportation.
- Häge, M.-C., & Rehse, J.-R. (2025). Conformance checking visualizations: development, evaluation, and demonstration of a taxonomy. *Process Science*, 2(18). <https://doi.org/10.1007/s44311-025-00025-5>
- Hawkins, F. H. (2017). *Human factors in flight* (H. W. Orlady, Ed.; 2.<sup>a</sup> ed.). Routledge.
- International Civil Aviation Organization. (2016). *Manual of aircraft accident and incident investigation* (Doc 9756). ICAO.
- International Civil Aviation Organization. (2020). *Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation: Aircraft accident and incident investigation* (12th ed.). ICAO.
- Lund, H., & Ørnager, S. (2016). Company Taxonomy development: The case of an international emergency response organization. *Aslib Journal of Information Management*, 68(2), 193–211. <https://doi.org/10.1108/AJIM-09-2015-0140>
- Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Ashgate.
- Redman, T. C. (2013). *Data driven: Profiting from your most important business asset*. Harvard Business Review Press.
- Rodríguez de Prada, A. (2012). *Investigación de accidentes por el método del árbol de causas* (2.<sup>a</sup> ed.). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

## Registro Fotográfico

