

# CIENCIA Y PODER AÉREO

Revista Científica de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana

ISSN 1909-7050 / E-ISSN 2389-94688



VOL. 13 N.º 2 | JULIO-DICIEMBRE 2018 | Pp. 1-156



Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana  
Institución Universitaria • Resolución 1906 MEN, Agosto de 2002



Fuerza Aérea Colombiana



Escuela de Postgrados FAC

# CIENCIA Y PODER AÉREO

Revista Científica de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-9468



VOL. 13 n.º 2 | JULIO-DIC. 2018 | Pp 1-156



## Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana

Colombian Air Force Postgraduate School  
Escola de Pós-graduação da Força Aérea Colombiana

### Director

CR. Javier Neira Peraza

### Subdirector General

CR. Miguel Enrique Restrepo Cabrera

### Comandante Escuadrón Grupo Académico

CR. Martín Fernando Zorrilla Rodríguez

### Comandante Escuadrón de Educación Superior

TC. Juan Carlos Hernández Deckers

### Comandante Escuadrón de Investigación

TC. Wilson Augusto Jaramillo García

### Comandante Escuadrón de Extensión e Internacionalización

TC. Hedin Fernando Vargas Hernández

## REVISTA CIENCIA Y PODER AÉREO

Journal Science and Air Power  
Revista Ciência e Poder Aéreo

### Director / Director / Diretor

TC. Wilson Augusto Jaramillo García

### Editor / Editor / Editor

Mg. Erika Juliana Estrada Villa

### Coordinación editorial / Editorial coordination / Coordenação editorial

María Carolina Suárez Sandoval

### Traducción / Translator / Tradutor

Marco Giraldo B., Nayibe Lara

### Revisión de textos / Text / Revisão de textos

Juan Carlos Velásquez Sánchez

### Fotografías / Photographs / Fotografias

Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana

### Diseño de cubierta y páginas interiores /

Desing / Desenho

Patricia Montaña D.

### Versión digital y OJS / Digital version and OJS

/ Versão digital e OJS

Biteca Ltda.

## VOL. 13 n.º 2 | JULIO-DICIEMBRE 2018 Pp 1-154

Periodicidad semestral

### Comité editorial / Editorial Board / Comitê editorial

#### CR. Lina María Sánchez Rubio, Ph.D.

Universidad Nacional de Colombia.  
Centro de Medicina Aeroespacial Fuerza Aérea Colombiana (Colombia)

#### Eduardo Pastrana Buelvas, Ph.D.

Universität Leipzig, Alemania.  
Facultad de Ciencias Políticas y Relaciones Internacionales, Pontificia Universidad Javeriana (Colombia)

#### Hernán Dario Cerón-Muñoz, Post Ph.D.

Cranfield University, Inglaterra.  
Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos (Brasil)

#### Juan Vicente Balbaste Tejedor, Ph.D.

Departamento de Comunicaciones  
Universidad Politécnica de Valencia (España)

#### Sergio Tobón Tobón, Ph.D.

Universidad Complutense de Madrid, España.  
Centro Universitario CIFE (México)

### Comité científico / Scientific Board / Comitê científico /

#### Juan Pablo Casas Rodríguez, Ph.D.

Loughborough University, Inglaterra.  
Universidad de Los Andes (Colombia)

#### Yolanda M. Guerra, Post Ph.D.

University of Wisconsin-Madison, United States.  
Universidad Santo Tomás, Colombia.  
Universidad Militar Nueva Granada (Colombia)

#### Álvaro Joffre Uribe Quevedo, Ph.D.

Universidad Estatal de Campinas, Brasil.  
Universidad Militar Nueva Granada (Colombia)

#### Rafael Ignacio Pérez Uribe, Ph.D.

Universidad Antonio de Nebrija, España.  
Escuela de Administración de Negocios EAN (Colombia).

#### Leonardo Juan Ramírez López, Ph.D.

Universidade Mogi das Cruzes, Brasil.  
Universidad Militar Nueva Granada (Colombia)

## Pares académicos / Academic Peers / Pares acadêmicos

#### Andrés De Castro García, Ph.D.

Universidad Técnica del Norte UTN. Ibarra, Ecuador

#### Fredy Omar Gamboa Jaimes, Ph.D.

Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia

#### Zamira Díaz López G., Ph.D.

Universidad del Cauca. Popayán, Colombia

#### Fabio Martínez Carrillo, Ph.D.

Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

#### Dora María Ballesteros, Ph.D.

Universidad Militar Nueva Granada.  
Bogotá, Colombia

#### Julián Sierra Pérez, Ph.D.

Universidad Pontificia Bolivariana.  
Medellín, Colombia

#### Luis Guillermo Vásquez Z., Ph.D.

Universidad Internacional del Ecuador. Quito, Ecuador

#### Jhonathan Orlando Murcia Pineros, Dr.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos, Brasil

#### Oscar Javier Gutiérrez Junco, Dr.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.  
Bogotá, Colombia

#### Didier Arnulfo Santiago Franco, Mg.

Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia

#### Carmen Aura Arias Castilla, Mg.

Corporación Universitaria Iberoamericana.  
Bogotá, Colombia

#### Andrea Matiz C., MSc

Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia

#### Rubén Darío Salazar Buitrago, Mg.

Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia

#### Fabio Alejandro Merchán Rincón, MSc. (c)

Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia

#### William Daniel Moscoso Barrera, MSc.

Universidad Central. Bogotá, Colombia

#### Mario Luis Perossa, Mg.

Universidad Maimónides. Buenos Aires, Argentina

### Para suscripciones o canjes, diríjase a:

Ciencia y Poder Aéreo / Science and Air Power / Ciência e Poder Aéreo  
cienciaypoderareo@gmail.com (057-1) 637 8927 – 6206518 Ext. 1719, 1722.  
Biblioteca Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana. biblioteca@epfac.edu.co

### Para mayores informes:

Dirección postal / Mailing Address / Endereço postal  
Cra. 11 No. 102-50 Edificio ESDEGUE, Departamento de Investigación. Oficina 411. A.A.110111. Bogotá D.C., Colombia. Teléfonos (057-1) 637 8927 – 6206518. Ext. 1700, 1719, 1722. www.publicacionesfac.com

# CIENCIA Y PODER AÉREO

Revista científica de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana  
ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-2468

La revista científica Ciencia y Poder Aéreo es una publicación anual de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana. Su objetivo es contribuir a la difusión de los resultados de investigación y demás producción intelectual con especial énfasis en Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica, Gestión y Estrategia, Tecnología e Innovación, Educación y TIC; que busca contribuir al desarrollo tecnológico y científico, generando nuevo conocimiento y propiciando espacios de discusión y reflexión.

## Misión

La revista Ciencia y Poder Aéreo está concebida como el órgano de divulgación científica que incluye artículos: científico original, de reflexión, revisión, artículos cortos y reportes de caso; inéditos, con alta calidad académica y rigurosidad científica, relacionados con temas de Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica, Gestión y Estrategia, Tecnología e Innovación, Educación y TIC; estos artículos son presentados ante la comunidad científica, nacional e internacional con el propósito de dar a conocer y divulgar los nuevos avances y aplicaciones del sector aeroespacial, así como aportes significativos al campo de las ciencias sociales y exactas.

## Visión

La revista Ciencia y Poder Aéreo se concibe como uno de los principales medios de divulgación de conocimiento para el sector aeroespacial en el campo de la ingeniería, la administración, como en las ciencias sociales y humanas, con artículos originales e inéditos basados en resultados de actividades académicas, investigativas y profesionales que den cuenta de su impacto para la ciencia, tecnología e innovación. Asimismo, desea ser altamente consultada y reconocida en el medio académico, científico y empresarial a nivel nacional e internacional del sector aeroespacial, siendo parte de las bases de datos e índices más relevantes del mundo, ratificando así la calidad de la publicación y el interés por la difusión del conocimiento.

## Público

La revista Ciencia y Poder Aéreo está dirigida a la comunidad científica nacional e internacional, estudiantes, profesores, investigadores; miembros de las Fuerzas Militares y de la Policía Nacional; sector aeroespacial.

## Política Editorial

Dentro de la política editorial de la revista Ciencia y Poder Aéreo se incluye un aparte dirigido a la ética frente a las responsabilidades del autor, del árbitro y el proceso de evaluación, así como del proceso editorial.

## Ética de la Revista

Los artículos presentados a la revista deben ser originales e inéditos y estos no deben estar simultáneamente en proceso de evaluación ni tener compromisos editoriales con ninguna otra publicación. Si el manuscrito es aceptado, el Editor espera que su aparición anteceda a cualquier otra publicación total o parcial del artículo. Cuando la revista tiene interés de publicar un artículo que ya ha sido previamente publicado, el autor deberá solicitar la autorización correspondiente a la editorial que realizó la primera publicación y dirigirla al Editor.

## Reserva de Derechos

Está permitida la reproducción total o parcial de los artículos para uso personal o con fines académicos e investigativos, siempre y cuando se haga la respectiva cita y referencia al artículo, autor(es), y a la revista científica Ciencia y Poder Aéreo de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.



# SCIENCE AND AIR POWER

Scientific Journal of the Colombian Air Force Postgraduate School

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-2468

The scientific journal Science and Air Power is an annual publication of the Colombian Air Force Postgraduate School. Its goal is to contribute with the dissemination of research results and other types of intellectual production with special emphasis on Operational Safety and Aviation Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation, Education and ICT, with the aim to enrich the technological and scientific development, through new knowledge generation and promoting space for discussion and reflection.

## Mission

The scientific journal Science and Air Power is conceived as a scientific spreading media that includes original scientific articles, reflection articles, reviews articles, short articles and case reports; unpublished, with high academic quality and scientific rigor, related with topics on Operational Safety and Aviation Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation, Education and ICT; these papers are introduced before the scientific community, national and international, with the goal to share and spread new progress and applications in the aerospace field, as well as significant contributions in the social and exact sciences.

## Vision

The Science and Air Power journal is conceived as one of the main knowledge diffusion media for the aerospace sector in the field of engineering, management, as well as in the social and human sciences, with original and unpublished papers based in results of academic, research, and professional activities, that generate impact for science, technology and innovation. In the same way, it is expected to be highly consulted and recognized among the academic, scientific, and business community, on the national and international level of the aerospace field, being part of the most relevant data bases and indexes of the world, confirming the quality of the publication and the interest for knowledge spreading.

## Audience

Science and Air Power scientific journal is addressed to the national and international scientific community, students, professors, researchers; members of the Military Forces and National Police; aerospace field.

## Editorial Policy

Within the editorial policy of the Science and Air Power Journal it is included a component addressed to the ethics with respect to the responsibilities of the author, referee, evaluation process, as well as the editorial process.

## Ethics Journal

Papers published on the journal must be original and unpublished and should not be simultaneously working towards publication with other publisher, neither should have editorial commitments with other publication. If the abstract is accepted, the editor expects that its publication will precede any other total or partial publication of the paper. When the journal is interested in publishing a previously published paper, the author should request authorization from the correspondent publisher on which the first publication was made and address it to the Editor.

## Copyright

Total or partial reproduction of papers is allowed for personal use or for academic or research purposes, as long as the correspondent citation and reference are done to the paper, author(s), and to the Science and Air Power scientific journal of the Colombian Air Force Postgraduate School

# CIÊNCIA E PODER AÉREO

Revista científica da Escola de Pós-Graduação da Força Aérea Colombiana

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-2468

A revista Ciência e poder aéreo é uma publicação anual da Escola de Pós-Graduação da Força Aérea Colombiana. Tem como objetivo contribuir à divulgação dos resultados de investigação e demais produção intelectual com especial ênfase na Segurança operacional e a Logística aeronáutica, Gestão e Estratégia, Tecnologia e Inovação, Educação e; TIC, que busca contribuir com o desenvolvimento tecnológico e científico, gerando novos conhecimentos e promovendo espaços de discussão e de reflexão.

## Missão

A revista Ciência e poder aéreo está concebida como um órgão de divulgação científica que inclui artigos: científico original, de reflexão, de revisão, artigos curtos e relatos de caso; inéditos, com alta qualidade acadêmica e rigor científico, relacionados com questões de Segurança Operacional e Logística Aeronáutica, Gestão e Estratégia, Tecnologia e Inovação, Educação e; TIC, estes artigos são apresentados à comunidade científica, nacional e internacional, a fim de dar a conhecer novos desenvolvimentos e aplicações na indústria aeroespacial, assim como contribuições significativas no campo das ciências sociais e exatas.

## Visão

A revista Ciência e poder aéreo se concebe como um dos principais meios de disseminação de conhecimento no setor aeroespacial no campo da engenharia, a gestão e as ciências sociais e humanas, com artigos originais e inéditos baseados em resultados de atividades acadêmicas, investigativas e profissionais que dão conta dos impactos no campo da ciência, a tecnologia e a inovação. Da mesma forma, quer ser altamente consultada e reconhecida no meio acadêmico, científico e empresarial nacional e internacionalmente no campo aeroespacial, sendo parte das bases de dados e índices mais relevantes do mundo, confirmando assim a qualidade da publicação e o interesse pela disseminação do conhecimento.

## Público

A revista Ciência e Poder Aéreo está dirigida à comunidade científica nacional e internacional, estudantes, professores, pesquisadores; membros das Forças Armadas da Polícia Nacional; sector e do sector aeroespacial.

## Política Editorial

Dentro da política editorial da revista Ciência e Poder Aéreo, se inclui um apartado dirigido à ética face às responsabilidades do autor, o árbitro e o processo de avaliação, assim como o processo editorial.

## Ética da Revista

Os artigos submetidos para publicação devem ser originais e inéditos e não devem estar simultaneamente em fase de avaliação ou ter compromissos de publicação com qualquer outro. Se o manuscrito for aceito, o Editor espera que sua aparição preceda qualquer outra publicação total ou parcial do artigo. Quando a revista tem interesse na publicação de um artigo que já foi publicado anteriormente, o autor deverá solicitar a autorização da editorial com que fez a primeira publicação e dirigi-la ao Editor.

## Reserva de Direitos

É permitida a reprodução total ou parcial dos artigos para uso pessoal ou para fins acadêmicos e investigativos, desde que se faça a respectiva citação e referência ao artigo, ao autor e à revista Ciência e Poder Aéreo da Escola de Pós-Graduação da Força Aérea Colombiana.



## Contenido Volumen 13 N°.2 Julio - Diciembre 2018

Ciencia y Poder Aéreo se encuentra disponible únicamente en formato electrónico y Open Access en las siguientes plataformas:

Sitio web:  
www.publicacionesfac.com

Sistemas de Información:

Bases de Datos  
Ebsco Hots  
Fuente Académica Plus Collections  
International Security & Counter-Terrorism Reference  
Center  
Dialnet  
Red de Bibliotecas Universitarias (REBIUN)

Directorios  
Latindex  
DOAJ

### Presentación

- 7 *Presentation / Apresentação*  
Coronel Javier Neira Peraza y Subteniente Abraham Ortiz Miranda

### Editorial

- 12 *Editorial / Editorial*  
Teniente Coronel Wilson Augusto Jaramillo García  
Mg. Erika Juliana Estrada Villa

### Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica

*Operational Safety and Aviation Logistics / Segurança Operacional e Logística Aeronáutica*

#### Bruxismo una enfermedad de altura

- 18 *Bruxism a disease of height*  
*Bruxismo uma doença de altura*  
Rocio del Pilar Marulanda Corredor, Juan Fernando Varela Orduz

#### Evaluación estructural alar de aeronave categoría VLA para certificación en Colombia

- 28 *Wing's structural assessment of a VLA aircraft for certification purposes in Colombia*  
*Avaliação estrutural da asa de uma aeronave categoria VLA para certificação na Colômbia*  
Andrés Palomino

#### Diseño de un modelo de transferencia de la metodología de referencia de operaciones para cadena de suministro (SCOR) para la Fuerza Aérea Colombiana

- 46 *Design of a transfer model of the supply chain operations reference (SCOR) model to the Colombian Air Force*  
*Projeto de um modelo de transferência da metodologia de referência de operações para cadeia de suprimento (SCOR) para a Força Aérea Colombiana*  
Elvin Perea Lemos, Pedro José Sánchez Caimán

### Gestión y Estrategia

*Management and Strategy / Gestão e Estratégia*

#### Asedio a Güepí: Fuerza Aérea Colombiana, mirada a una operación trascendental

- 68 *Siege of Güepí: Colombian Air Force, look at a transcendental operation*  
*Cerco a Güepí: Força Aérea Colombiana, olhar para uma operação de transcendental*  
Subteniente Abraham Ortiz Miranda

### Tecnología e Innovación

*Technology and Innovation / Tecnologia e Inovação*

#### Estudio comparativo de Aplicaciones Móviles (APP), en el error de medición con Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA)

- 78 *Comparative study of Mobile Applications (APP), in the measurement error with Remotely Piloted Aircraft (RPA)<sup>2</sup>*  
*Estudo comparativo de Aplicações Móveis (APP), no erro de medição com Aeronave Pilotada Remota (RPA)<sup>3</sup>*  
Julián Andrés Rodríguez Cárdenas, Jorge Mario Paternina, Juan Francisco Guzmán Zabala

#### Revisión de sistemas de control en red como base para sistemas satelitales de pequeña escala

- 90 *Review of network control systems as a basis for small-scale satellite systems<sup>2</sup>*  
*Revisão de sistemas de controle de rede como base para sistemas de satélite de pequena escala<sup>3</sup>*  
Germán Wedge Rodríguez Pirateque, Jorge Sofrony Esmeral

#### Influência da porcentagem da fração fina proveniente do agregado graúdo no desempenho de concreto permeável

- 126 *Influencia del porcentaje de la fracción fina del agregado grueso en el desempeño del concreto permeable*  
*Influence of the percentage of the fine fraction coming from the coarse aggregate on the performance of pervious concrete*  
Gersson Fernando Barreto Sandoval, Nicole Schwantes-Cezario, Geovana Souza Nogueira y Berenice Martins Toralles

**Docencia y Educación**

*Teaching and Education / Ensino e Educação*

**Simuladores de vuelo: una revisión**

138 *Flight simulators: a review*

*Simuladores de voo: uma revisão*

Luis Carlos Villamil Rico·Edna Joydeth Avella Rodríguez·Jorge Antonio Tenorio Melo

**Instrucciones para Autores**

150



Coronel Javier Neira Peraza  
Director Escuela de Postgrados FAC

## Presentación Arqueología del Conocimiento

¿Por qué el humano realiza intrincados procesos de conocimiento? ¿A quién o a qué rinde cuentas el conocimiento humano? ¿Cuál es el propósito de este conocimiento? Múltiples preguntas, como las aquí consignadas, son las que han embargado históricamente a los pensadores y científicos en el desarrollo de la filosofía de la ciencia, la epistemología y gnoseología. En el trasegar de la existencia humana, las reflexiones sobre la delimitación, naturaleza y origen del conocimiento se han visto sometidas al crisol del continuo devenir de las circunstancias históricas, dificultando tan ardua labor la constante e intrincada naturaleza nuestra, *finiti autem imperfectus*<sup>1</sup>.

Sin embargo, el desarrollo de conocimiento tiene un fin en el humano, presenta objetivos claros y responde a situaciones específicas de espacio-tiempo en las que cualquier persona se puede ver inmerso. No obstante, su gestación y duración se han llegado a cuestionar desde una perspectiva de lo infravalorado al considerarlo en el plano de lo banal de la existencia. A pesar de lo anterior, nos dedicamos a los gajes del pensamiento debido al menester de facto que tenemos del mismo.

La naturaleza humana se ve imbuida en la realidad nativa de la constante satisfacción de necesidades, insuficiencias estas que deben ser observadas y solventadas para que la vida tenga cabida. En el entorno que nos desenvolvemos, la Historia *per se* ha demostrado que todo aquello que existe está sujeto a constantes cambios, no importando su duración. Sin embargo, a parte de sus procesos neuronales, el humano ha sido la única especie en la tierra que no se le dotó de instrumentos corpóreos que le permitan la consecución de sus fines, los cuales propenden por brindarle bienestar, plenitud y felicidad al individuo. No le fueron otorgados extremidades, dones e instrumentos tales como garras, velocidad, colmillos, fuerza superior o capacidades de vuelo que le permitan conseguir alimentos por sus propios medios físicos, solo por poner un ejemplo. Es así, que desde el primer día en que el hombre es concebido, se ha valido de su inteligencia para desarrollar estrategias, caminos, instrumentos, desarrollos y demás, lo que le ha permitido que a su paso por este plano terrenal este lo más libre posible de obstáculos y dificultades.

Con el objeto de promover el desarrollo del conocimiento, el Comité Editorial de la Revista *Ciencia y Poder Aéreo* exhibe al público el presente número. Para lo cual, la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana, por medio del contemplado volumen, pretende poner al alcance de la sociedad las investigaciones en materia aeronáutica sabiendo que,



Subteniente Abraham Ortiz Miranda  
Investigador Escuela de Postgrados FAC

1 Traduce del latin finito e imperfecto

en sus limitaciones, permite a nuestros lectores encontrar en la aviación y en todo lo que ésta abarca, respuestas claves para la satisfacción de necesidades, sobre todo para los territorios más distantes de la geografía nacional.

**Subteniente Abraham Ortiz Miranda<sup>2</sup> &  
Coronel Javier Neira Peraza<sup>3</sup>**  
*Director Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea  
Colombiana*

---

<sup>2</sup> Profesional en Historia de la Universidad Nacional – Oficial Historiador Fuerza Aérea Colombiana. Correo electrónico: [abraham.ortiz@epfac.edu.co](mailto:abraham.ortiz@epfac.edu.co) y [aortizmiranda@gmail.com](mailto:aortizmiranda@gmail.com)

<sup>3</sup> Oficial de Especialidad Defensa Aérea de la Fuerza Aérea Colombiana - Administrador Aeronáutico de la EMAVI y Administrador de Empresas de la Universidad Militar Nueva Granada y Especialista en Logística Aeronáutica de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana. Correo electrónico: [jneirap@gmail.com](mailto:jneirap@gmail.com)





## **Presentation: Archaeology of knowledge**

Why does the human make complicated processes of knowledge? Whom or what does human knowledge serves? What is the purpose of such knowledge? Multiple questions like those included herein have historically worried to thinkers and scientists throughout the development of the philosophy of science, epistemology, and gnosiology. Along the history of human existence, the reflections on the limit, nature, and origin of knowledge have been subdued to the crucible of continuous evolution of historic circumstances, which makes difficult the understanding of our nature: finite autem imperfectus.

The development of knowledge has an objective for the human, sets clear goals, and responds to specific space-time situations in which any person might get involved; nonetheless, its gestation and duration have been questioned from the perspective of what has been underestimated when considering it at the level of the unimportance of existence. Despite it, we dedicate our lives to the issues of the thought due to the importance fact that we claim for it.

Human nature becomes embedded in the native reality of a constant satisfaction of needs; such insufficiencies must be observed and solved in order for life to become possible. In the context in which we live, History *per se* have demonstrated that all that exists is subject to constant changes, no matter how long it last. Despite their neural processes, Humans have been the only species on Earth that were not given bodily instruments that help them achieve their objectives. They were not given limbs, gifts, or instruments such as claws, speed, fangs, superior strength or the ability to fly that allow them to obtain food by their own means, just to exemplify. From the first day humans were conceived they have relied on their intelligence to develop strategies, roads, instruments, developments, among others, which helped their path on the Earthly dimension to be free of obstacles and difficulties.

Having as a purpose the development of knowledge, the Editorial Committee of *Ciencia y Poder Aéreo* offers this number to the public. The postgraduate School of the Colombian Air Force, by means of this issue, intends to offers to the society research on aeronautic issues while knowing that, though limited, it allows our readers to find in aviation and everything else it comprises key answers for the satisfaction of needs, especially for the most distant territories of Colombian geography.

**Second Lieutenant Abraham Ortiz Miranda<sup>1</sup> &  
Colonel Javier Neira Peraza<sup>2</sup>**

***Director Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana***

---

1 Professional in History - Universidad Nacional – Official Historian of Colombian Air Force. Email: abraham.ortiz@epfac.edu.co y aortizmiranda@gmail.com

2 Colombian Air Force Air Defense Specialist Officer – Aeronautic Administrator from EMAVI. Business Administrator from Universidad Militar Nueva Granada and Specialist in Aeronautic Logistics from the Colombian Air Force Postgraduate School. Email: jneirap@gmail.com



## Apresentação Arqueologia do Conhecimento

Por que o humano faz processos intrincados de conhecimento? A quem ou a que rende contas o conhecimento humano? Qual é o propósito desse conhecimento? Múltiplas questões, como as listadas aqui, são aquelas que historicamente têm embargado a os pensadores e cientistas no desenvolvimento da filosofia, da ciência, a epistemologia e gnoseologia. Na passagem da existência humana, as reflexões sobre a delimitação, natureza e a origem do conhecimento foram submetidas ao crisol do contínuo devir das circunstâncias históricas, dificultando tão grande trabalho a constante e intrincada natureza nossa, de modo que *finiti autem imperfectus*<sup>1</sup>

No entanto, o desenvolvimento do conhecimento tem um fim no humano, apresenta objetivos claros e responde a situações específicas de espaço-tempo nas que qualquer pessoa pode ficar imersa. Entretanto, sua gestação e duração têm sido questionadas a partir de uma perspectiva do subestimado quando considerado no plano do banal da existência. Apesar do exposto, nos dedicamos às vantagens do pensamento devido à necessidade de fato que temos dele.

A natureza humana vê-se imbuída na realidade nativa da constante satisfação de necessidades, insuficiências que devem ser observadas e resolvidas para que a vida tenha um lugar. No ambiente em que temos desenvolvido, a História *per se* se demonstrou que tudo o que existe está sujeito a constantes mudanças, independentemente de sua duração. No entanto, para além de seus processos neuronais, o ser humano tem sido a única espécie do planeta que não foi dotado de instrumentos corporais que permitam-lhe a realização dos seus objetivos, os quais tendem por proporcionar-lhes bem-estar, satisfação e felicidade para o indivíduo. Não lhes foram outorgadas extremidades, capacidades e instrumentos como garras, velocidade, presas, força superior ou capacidades de voo que lhe permitissem obter comida por seus próprios meios físicos, apenas para dar um exemplo. Assim, desde o primeiro dia em que o homem é concebido, tem-se valido de sua inteligência para desenvolver estratégias, estradas, instrumentos, desenvolvimentos e outros, o que lhe permitiu que seu passar por este plano terrestre o mais livre possível de obstáculos e dificuldades.

A fim de promover o desenvolvimento do conhecimento, o Comitê Editorial da Revista *Ciência e Poder Aéreo* mostra ao público o presente número. Para tanto, a Escola de Pós-Graduação da Força Aérea da Colômbia, através deste volume, pretende disponibilizar a pesquisa aeronáutica à sociedade, sabendo que, em suas limitações, permite aos

<sup>1</sup> Traduz do latim finito e imperfeito





nossos leitores encontrar na aviação e em tudo o que ela abrange, principais respostas para a satisfação de necessidades, especialmente para os territórios mais distantes da geografia nacional.

**Segundo Tenente Abraham Ortiz Miranda<sup>2</sup> &  
Coronel Javier Neira Peraza<sup>3</sup>**

*Diretor da Escola de Pós-Graduação da Força Aérea da Colômbia*



Fokker F-28  
Foto de TC. Juan Carlos  
Hernandez Deckers

---

2 Profissional em História da Universidade Nacional - Oficial Historiador da Força Aérea Colombiana. E-mail: [abraham.ortiz@epfac.edu.co](mailto:abraham.ortiz@epfac.edu.co) y [aortizmiranda@gmail.com](mailto:aortizmiranda@gmail.com)

3 Oficial de Especialidade em Defesa Aérea da Força Aérea Colombiana - Administradora Aeronáutica da EMAVI e Administradora de Empresas da Universidade Militar de Nueva Granada e Especialista em Logística Aeronáutica da Escola de Pós-Graduação da Força Aérea Colombiana. E-mail: [Jneirap@gmail.com](mailto:Jneirap@gmail.com)

## Editorial

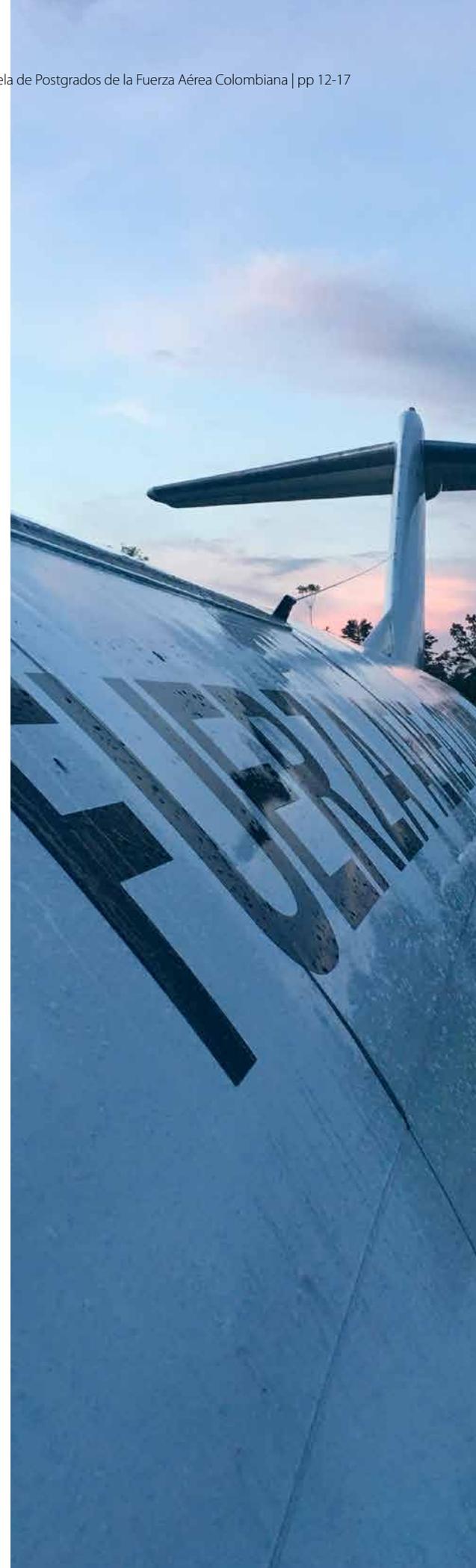
En esta oportunidad queremos compartir con nuestros lectores la adición del botón **Crossmark** en algunos artículos y la actualización del Open Journal System a su versión tres, por tal motivo podemos ofrecer a nuestros autores mejores condiciones de indexación por metadatos, así como la posibilidad de ampliar la visibilidad por artículo; situación que favorece el posicionamiento en los sistemas de indexación y resumen.

Esta plataforma, además de llevar un mejor control del proceso editorial, gestionar comunicaciones y guardar archivos, permite la normalización editorial y el mejoramiento en la visibilidad de los artículos. Por tanto invitamos a nuestra apreciada comunidad académica a visitar, interactuar y citar las publicaciones disponibles en [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com); estos avances en la producción y desarrollo de la Revista Ciencia y Poder Aéreo son importantes y dan pasos hacia una mejor condición científica y editorial, en consecuencia, mejora la visibilidad de la producción de nuestros autores.

En este número, el Vol. 13 N.º 2 de la Revista *Ciencia y Poder Aéreo*, correspondiente al segundo semestre del año en curso, se publican ocho artículos científicos originales que describen de manera sistemática resultados derivados de proyectos de investigación distribuidos en las cuatro secciones que se relacionan a continuación:

En la primera sección **Seguridad Operacional y Logística Aero-náutica** se incluyen tres artículos, en el primero de ellos *Bruxismo una enfermedad de altura*, sus autores, Rocío del Pilar Marulanda Corredor y Juan Fernando Varela Orduz presentan un estudio para determinar la prevalencia de bruxismo en pilotos de la Fuerza Aérea Colombiana. Posteriormente, el autor Andrés Palomino expone, en su artículo titulado *Evaluación estructural alar de aeronave categoría VLA para certificación en Colombia*, un reporte de caso donde se describe el trabajo y los resultados de la evaluación estructural del ala, llevado a cabo sobre la aeronave de diseño y fabricación colombiana WA500-AG. En el tercer artículo, *Diseño de un modelo de transferencia de la metodología de referencia de operaciones para cadena de suministro (SCOR) para la Fuerza Aérea Colombiana*, los autores Elvin Perea Lemos y Pedro José Sánchez Caimán plantean una propuesta de mejoramiento para el desempeño de la cadena de suministro, como un factor determinante para el alistamiento de las aeronaves, mediante el Diseño de un Modelo de Transferencia de la Metodología de Referencia de Operaciones para Cadena de Suministro (SCOR).

En la segunda Sección **Gestión y Estrategia**, se encuentra el artículo *Asedio a Güepí: Fuerza Aérea Colombiana, mirada a una operación trascendental* de Abraham Ortiz Miranda, en el cual se hace una revisión histórica del fenómeno ocurrido en el marco del conflicto colombo-peruano, dilucidando la transformación que esto implicó en la relevancia del poder aéreo, dentro de las Fuerzas Militares colombianas.





En la tercera sección **Tecnología e Innovación**, los autores Julián Andrés Rodríguez Cárdenas, Jorge Mario Paternina y Juan Francisco Guzmán Zabala, presentan un *Estudio comparativo de Aplicaciones Móviles (APP), en el error de medición con Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA)*, donde se reportan las cinco principales APP usadas en el mercado de fotogrametría, con el objetivo principal de evaluar el error de medición asociado a cada una de ellas, a través de la construcción de ortomosaicos con la cámara ZENMUSE X3 (FC350) de resolución de 12 Mp del dron DJI. Posteriormente, El artículo *Revisión de sistemas de control en red como base para sistemas satelitales de pequeña escala*, donde Germán Wedge Rodríguez Pirateque y Jorge Sofrony Esmeral, presenta diferentes enfoques de trabajos desarrollados en torno a los aportes de sistemas de control en red, como fundamento al desarrollo de nuevas tecnologías en la operación de sistemas satelitales y de servicios aeroespaciales, los cuales se han convertido en un desafío permanente para diferentes disciplinas y países en vía de desarrollo alrededor del mundo. El artículo que cierra la sección, hace referencia a *Influência da porcentagem da fração fina proveniente do agregado graúdo no desempenho de concreto permeável* de los autores Gersson Fernando Barreto Sandoval, Nicole Schwantes-Cezario, Geovana Souza Nogueira y Berenice Martins Toralles, el cual presenta un estudio donde se analiza la influencia del porcentaje de fracción fina proveniente del agregado gracioso en las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto permeable (CoPe), fabricado con britas de 19 mm (B1), 9,5 mm (B0) y una mezcla 50/50 (50B0 / 50B1).

Para cerrar este número y en la cuarta sección **Docencia y Educación**, se presenta un artículo sobre el *Simuladores de vuelo: una revisión* de los autores Luis Carlos Villamil Rico, Edna Joydeth Avella Rodríguez y Jorge Antonio Tenorio Melo, en el que se presenta el desarrollo de un estado del arte del proyecto titulado: Desarrollo y construcción de un entrenador de vuelo de la aeronave Cessna T-41 para la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez.

En consecuencia, consideramos que los artículos que integran la presente edición de la revista *Ciencia y Poder Aéreo vol.13-2*, constituyen un valioso insumo para el campo de conocimiento del sector aeronáutico y aeroespacial. Sea entonces este el momento para agradecer a nuestros colaboradores, que con sus aportes consolidan día a día la propuesta editorial de la Rev. Ciencia y Poder Aéreo.

Teniente Coronel Wilson Augusto Jaramillo García  
Director Revista Ciencia y Poder Aéreo

OD18 Erika Juliana Estrada Villa  
Editora

## Editorial

For this opportunity, we would like to share with our readers the addition of the Crossmark button in some of our articles and the update of our Open Journal System to the version 3.0; that is why we are able to offer to our authors better metadata indexing conditions, as well as the possibility to widen the visibility per article, which favors their position in indexing and abstract systems.

Besides performing a better control of the publishing process, manage communications, and save files, this platform allows editorial normalization and the improvement of articles visibility. In consequence, we invite to our appreciated academic community to visit, interact with, and cite the publications available at [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com); these advances in the production and development of *Ciencia y Poder Aéreo* journal are important and lead to a better scientific and editorial state, which in turn improves the visibility of our authors' production.

This issue, Vol. 13., N. 2 of *Ciencia y Poder Aéreo* journal -corresponding to the second semester of the current year- includes eight original scientific articles that systematically describes results derived from research projects, and which are distributed in the four sections described below:

The first section, Operational Security and Aeronautic Logistics, includes three articles: for the first one, Bruxism: an illness of altitude, authors Rocío del Pilar Corredor and Juan Fernando Varela Orduz present a study to determine the prevalence of bruxism in Colombian Air Force pilots. Up next, author Andrés Palomino, in his article Wing structural evaluation of category VLA aircraft for certification in Colombia, reports a case in which describes the work and results of wing structural evaluation, performed on the Colombian designed and manufactured WA500-AG aircraft. In the third article, Transfer model design of operation reference methodology for supply chain for the Colombian Air Force, authors Elvin Perea Lemos and Pedro José Sánchez Caimán state an improvement proposal for the performance of the supply chain as a determining factor for aircraft warmup by means of a transfer model design of operation reference methodology for supply chain.

The second section, Management and Strategy, introduces the article Siege to Güepi: Colombian Air Force. An Outlook to a transcendental operation, by Abraham Ortiz Miranda, in which a historic revision of the phenomenon occurred during the Colombian-Peruvian conflict is made, demonstrating the transformation that it implied in the relevance of aerial power within Colombian military forces.

In the third section, Technology and Innovation, authors Julián Andrés Rodríguez Cárdenas, Jorge Mario Paternina, and Juan Francisco Guzmán Zabala present a Comparative study of mobile applications in the measurement error with remotely piloted aircrafts (RPA), in which





the top five apps used in the photogrammetry market are reported with the intention of evaluating the measurement error associated to each of them through the construction of orthomosaics with the ZENMUSE X3 (FC350) camera, with 12 mp resolution, of drone DJI. Next, authors Germán Wedge Rodríguez Pirateque and Jorge Sofrony Esmeral present the article Revision of network control systems as a base for small scales satellite systems, in which they introduce different work approaches developed around the contributions of network control systems, as a basis for the development of new technologies in the operation of satellite systems and aerospace services, which have become a permanent challenge for diverse disciplines and developing countries around the globe. The article that closes the section, *Influência da porcentagem da fração fina proveniente do agregado graúdo no desempenho de concreto permeável*, by authors Gersson Fernando Barreto Sandoval, Nicole Schwantes-Cezario, Geovana Souza Nogueira y Berenice Martins Toralles, presents a study in which it is analyzed the influence of percentage of fine fraction from the coarse aggregate on the mechanical and hydraulic properties of PC manufactured with 19 mm (B1), 9.5 mm (B0) and 50/50 (50B0/50B1) of the two mentioned.

To close this issue, and for our fourth section, Teaching and education, the article *Flight simulators: a revision* by authors Luis Carlos Villamil Rico, Edna Joydeth Avella Rodríguez and Jorge Antonio Tenorio Melo presents the development of a state of art of the project *Development and construction of a flight trainer for aircraft Cessna T-41 for Escuela Militar de Aviación Marco Fide Suárez*.

We consider that the articles comprising this issue of Ciencia y Poder Aéreo vol. 13-2 are a valuable input for the aeronautic and aerospace areas of knowledge. May this moment be appropriate to thank our collaborators, who day after day strengthen the editorial proposal of this journal with their work.

**Lieutenant colonel Wilson Augusto Jaramillo García**  
*Director - Ciencia y Poder Aéreo journal*

**OD18 Erika Juliana Estrada Villa**  
*Editor*

## Editorial

Nesta oportunidade, queremos compartilhar com os nossos leitores a adição do botão **Crossmark** em alguns artigos e a atualização do Open Journal System para sua versão três, por isso memsmo podemos oferecer aos nossos autores melhores condições de indexação de metadados, bem como a possibilidade de estender o visibilidade por artigo; situação que favorece o posicionamento em sistemas de indexação e resumo.

Essa plataforma, além de ter um melhor controle do processo editorial, gerenciando comunicações e salvando arquivos, permite a normalização editorial e a melhoria na visibilidade dos artigos. Por isso, convidamos a nossa conceituada comunidade acadêmica a visitar, interagir e citar as publicações disponíveis em [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com) esses avanços na produção e desenvolvimento da Revista Ciência e Poder Aéreo são importantes e dão passos para uma melhor condição científica e editorial, conseqüentemente, melhora a visibilidade da produção de nossos autores.

Neste Número, o Vol. 13 N.º 2 da Revista *Ciência e Poder Aéreo*, correspondente ao segundo semestre do corrente ano; são publicados oito artigos científicos originais que descrevem sistematicamente os resultados derivados de projetos de pesquisa distribuídos nas quatro seções relacionadas a seguir:

Na primeira seção **Segurança Operacional e Logística Aero-náutica** são incluídos três artigos, no primeiro deles *Bruxismo uma doença de altura*, seus autores, Rocío del Pilar Marulanda Corredor e Juan Fernando Varela Orduz apresentam um estudo para determinar a prevalência de bruxismo em pilotos da Força Aérea Colombiana. Posteriormente, o autor Andrés Palomino expõe em seu artigo intitulado *Avaliação estrutural alar de aeronaves categoria VLA para a certificação na Colômbia*, um relato de caso onde se descreve o trabalho e os resultados da avaliação estrutural da asa, realizado sob a aeronave de design e fabricação colombiana WA500-AG. No terceiro artigo, *Design de um modelo de transferência da metodologia de referência de operações para cadeia de abastecimento (SCOR) para a Força Aérea Colombiana*, os autores Elvin Perea Lemos e Pedro José Sánchez Cayman, apresentam uma proposta de melhoramento para o desempenho da cadeia de suprimentos, como fator determinante para a prontidão das aeronaves, através do Projeto de um Modelo de Transferência da Metodologia de Referência de Operações para Cadeia de Suprimentos (SCOR).

Na segunda Seção, **Gestão e Estratégia**, encontra-se o artigo *Asedio a Güepí: Força Aérea Colombiana, olhar a uma operação transcendental* de Abraham Ortiz Miranda, no qual se faz uma revisão histórica do fenômeno ocorrido no marco do conflito colombiano-peruano, analisando a transformação que isso implicou na relevância do poder aéreo, dentro das Forças Militares colombianas.





Na terceira seção **Tecnologia e Inovação**, dos autores Julian Andres Rodriguez Cardenas, Jorge Mario Paternina e Juan Francisco Guzmán Zabala, apresentam um *Estudo comparativo de Aplicações Móveis (APP)* no erro de medição com aeronaves pilotadas a distância (RPA), onde se reportam as cinco principais APP usadas no mercado de fotogrametria, com o objetivo principal de avaliar o erro de medição associado a cada uma delas, através da construção de ortomosaicos com a câmera ZENMUSE X3 (FC350) com resolução de 12 Mp do drone DJI. Posteriormente, o artigo *Revisão de sistemas de controle em rede como base de sistemas de satélites de pequena escala*, onde Germán Wedge Rodríguez Pirateque e Jorge Sofrony Esmeral, apresentam diferentes abordagens de trabalhos desenvolvidos em torno a os aportes de sistemas de controle em rede, como fundação para o desenvolvimento de novas tecnologias na operação de sistemas de satélite e de serviços aeroespaciais, que tem-se tornado num desafio permanente para diferentes disciplinas e países em via de desenvolvimento em todo o mundo. O artigo que fecha a seção faz referência a *Influência da porcentagem da fração fina proveniente do agregado graúdo no desempenho de concreto permeável* dos autores Gersson Fernando Barreto Sandoval, Nicole Schwantes-Cezario, Geovana Souza Nogueira e Berenice Martins Toralles, o qual apresenta um estudo onde se analisa a influência da porcentagem de fração fina que provem do agregado macio nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável (CoPe), fabricado com gravas de 19 mm (B1), 9,5 mm (B0) e uma mistura 50/50 (50B0/50B1).

Para encerrar esta edição e na quarta seção **Ensino e Educação**, é apresentado um artigo sobre os *Simuladores de Voo: uma revisão* dos autores Luis Carlos Villamil Rico, Edna Joydeth Avella Rodríguez e Jorge Antonio Tenório Melo, no qual apresenta-se o desenvolvimento de um estado da arte do projeto intitulado: Desenvolvimento e construção de um treinador de voo para a aeronave Cessna T-41 para a Escola Militar de Aviação Marco Fidel Suárez.

Consequentemente, consideramos que os artigos que compõem a atual edição da revista *Ciência e Poder Aéreo vol.13-2*, constituem um insumo valioso para o campo do conhecimento do setor aeronáutico e aeroespacial. Seja então, este o momento de agradecer aos nossos colaboradores, que com suas contribuições consolidam dia a dia a proposta editorial da Revista Ciência e Poder Aéreo.

Tenente-Coronel Wilson Augusto Jaramillo García  
*Diretor da Revista Ciência e Poder Aéreo*

OD18 Erika Juliana Estrada Villa  
*Editora*



## BRUXISMO UNA ENFERMEDAD DE ALTURA<sup>1</sup>

BRUXISM A DISEASE OF HEIGHT<sup>2</sup>

BRUXISMO UMA DOENÇA DE ALTURA<sup>3</sup>

Juan Fernando Varela Orduz<sup>4</sup>

Rocío del Pilar Marulanda Corredor<sup>5</sup>

Centro de Medicina Aeroespacial CEMAE. Bogotá, Colombia

---

### CIENCIA Y PODER AÉREO

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-9468 / Volumen 13 / Número 2 / julio-diciembre de 2018 / Colombia /pp. 18-27

Recibido: 15/02/2018

Aprobado por evaluador: 26/04/2018

Doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.599



**Para citar este artículo:**

Varela, J. F. y Marulanda, R. P. (2018). (2018). Bruxismo una enfermedad de altura. *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(2), pp 18-27. doi: 10.18667/cienciapoderaereo.599

<sup>1</sup> Artículos original asociad al Centro de Medicina Aeroespacial de la Fuerza Aérea Colombiana.

<sup>2</sup> Original articles associated with the Aerospace Medicine Center of the Colombian Air Force.

<sup>3</sup> Artigos originais associados ao Centro de Medicina Aeroespacial da Força Aérea Colombiana.

<sup>4</sup> Odontólogo ortodoncista, Centro de Medicina Aeroespacial. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: juanvarela@hotmail.com

<sup>5</sup> Odontóloga, Centro de Medicina Aeroespacial. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: rociomarulanda@hotmail.com

**Resumen:** El bruxismo es una parafunción oral caracterizada por el apretamiento y/o rechinar de los dientes durante el sueño o vigilia. Se le considera un factor etiológico de las alteraciones funcionales y dolorosas de la unidad cráneo-cérvico-mandibular, así como de la destrucción progresiva de la estructura dental y periodontal.

El apretamiento dental o bruxomanía es uno de los más prevalentes, complejos y destructivos desordenes orofaciales, puesto que solo un bajo porcentaje de los pacientes son conscientes de que están apretando los dientes, generalmente lo que llama la atención son sus efectos destructivos e irreversibles que posteriormente son complejos y costosos de rehabilitar. El estrés laboral se asocia a menudo como un factor que contribuye al bruxismo, y la profesión de piloto militar supone un manejo de estrés de alta complejidad, por lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar la prevalencia de bruxismo en pilotos de la Fuerza Aérea Colombiana.

Se realizó un estudio descriptivo en el Centro de Medicina Aeroespacial de la Fuerza Aérea Colombiana, en el cual se calculó la incidencia de bruxismo en 284 pilotos militares que asistieron a sus exámenes médicos de control anual de aptitud psicofísica, entre el 1 de octubre de 2012 y el 30 de junio de 2013. Esto debido a que no se cuenta con datos estadísticos en Colombia acerca del porcentaje de pilotos que presentan esta patología.

Como resultado se evidenció, que la prevalencia de bruxismo en pilotos fue del 41.24 %. El 42.47 % reportó niveles altos de estrés en su profesión como piloto militar, y el 50.44 % reportó niveles de estrés medio. El 61.76 % de los pilotos de grado de Teniente Coronel dieron positivo para bruxismo. No se encontró diferencia significativa de acuerdo al tipo de aeronave que vuelan, ya sea ala rotatoria o ala fija helicóptero o avión. El 20.35 % de los pilotos tienen alguna sintomatología dolorosa relacionada con el bruxismo y el 38.05 % reportaron ser conscientes de que aprietan los dientes durante el sueño, un 13.27 % reportó que durante su rutina de vuelo aprietan los dientes. El 27.43 % están recibiendo algún tratamiento para el bruxismo.

En conclusión, los resultados demostraron una prevalencia de bruxismo en el personal de pilotos de la Fuerza Aérea Colombiana del 41.24 %, solo el 27.43 % de los pilotos que fueron diagnosticados como bruxomanos reciben algún tratamiento para esta patología, y el 38.05 % de los pilotos son conscientes de que están apretando los dientes, lo cual obliga a la realización de programas de promoción, prevención y establecimiento de protocolos de atención para el manejo de esta patología.

**Palabras clave:** bruxismo, Fuerza Aérea Colombiana, pilotos.

**Abstract:** Bruxism is an oral parafunction characterized by clenching and / or grinding of teeth during sleep or wakefulness. It is considered an etiological factor of the functional and painful alterations of the cranio-cervico-mandibular unit, as well as of the progressive destruction of the dental and periodontal structure.

Dental tightening or bruxomania is one of the most prevalent, complex and destructive orofacial disorders, since only a low percentage of patients are aware that they are clenching their teeth, generally what draws attention are its destructive and irreversible effects that are subsequently complex and expensive to rehabilitate. Work-related stress is often associated as a contributing factor to bruxism, and the profession of military pilot involves highly complex stress management; therefore, the objective of this study was to determine the prevalence of bruxism in Colombian Air Force pilots.

A descriptive study was conducted at the Aerospace Medicine Center of the Colombian Air Force, in which the incidence of bruxism was calculated in 284 military pilots who attended their annual medical examinations of psychophysical fitness between October 1, 2012 and June 30, 2013. Owing to the fact that there is no statistical data in Colombia about the percentage of pilots who have this pathology.

As a result, the prevalence of bruxism in pilots was 41.24%. 42.47% reported high levels of stress in their profession as a military pilot, and 50.44% reported medium levels of stress. 61.76% of Lieutenant Colonel grade pilots tested positive for bruxism. No significant difference was found according to the type of aircraft they fly, either rotary wing or fixed wing helicopter or airplane. The 20.35% of pilots have some painful symptoms related to bruxism and 38.05% reported being aware that they clench their teeth during sleep, 13.27% reported that during their flight routine they clench their teeth. 27.43% are receiving some treatment for bruxism.

In conclusion, the results showed a prevalence of bruxism in the personnel of pilots of the Colombian Air Force of 41.24%, only 27.43% of pilots who were diagnosed as bruxomanos receive any treatment for this pathology, and 38.05% of pilots are aware that they are clenching their teeth, which requires the implementation of promotion programs, prevention and establishment of care protocols for the management of this pathology.

**Keywords:** bruxism, Colombian Air Force, pilots.

**Resumo:** O bruxismo é uma parafunção bucal caracterizada por espremer e / ou ranger os dentes durante o sono ou a vigília. É considerado um fator etiológico das alterações funcionais e dolorosas da unidade crânio-cérvico-mandibular, bem como a destruição progressiva da estrutura dentária e periodontal.

Apertamento dos dentes ou bruxomania é um dos distúrbios orofaciais mais prevalentes, complexas e destrutivas, uma vez que apenas uma pequena porcentagem de pacientes que estão conscientes de que estão rangendo os dentes, geralmente tão marcantes são seus efeitos destrutivos e irreversíveis depois eles são complexos e caros para reabilitar. estresse no trabalho é muitas vezes associado como um fator que contribui para o bruxismo e carreira de piloto militar é um gerenciamento de estresse altamente complexa, por isso, o objetivo deste estudo foi determinar a prevalência de bruxismo em pilotos da Força Ar colombiano.

Um estudo descritivo foi realizado no Centro de Medicina Aeroespacial da Força Aérea Colombiana, em que a incidência de bruxismo em 284 pilotos militares que participaram exames médicos monitoramento anual de aptidão médica, entre 1 de Outubro de 2012 foi calculado e 30 de junho de 2013. Isso ocorre porque não há dados estatísticos na Colômbia sobre a porcentagem de pilotos que têm essa patologia.

Como resultado, evidenciou-se que a prevalência de bruxismo em pilotos foi de 41,24%. 42,47% relataram altos níveis de estresse em sua profissão como piloto militar e 50,44% relataram níveis médios de estresse. 61,76% dos pilotos do Tenente Coronel testaram positivo para bruxismo. Nenhuma diferença significativa foi encontrada de acordo com o tipo de aeronave que voa, seja asa rotativa ou asa fixa de helicóptero ou avião. Os 20,35% dos pilotos apresentam algum sintoma doloroso relacionado ao bruxismo e 38,05% relataram estar cientes de que trincam os dentes durante o sono, 13,27% relataram que durante a rotina de vôo apertam os dentes. 27,43% estão recebendo algum tratamento para o bruxismo.

Em conclusão, os resultados mostraram uma prevalência de bruxismo em pilotos de pessoal da Força Aérea Colombiana 41,24%, apenas 27,43% dos pilotos que foram diagnosticados como bruxers recebem qualquer tratamento para essa condição, e 38,05% dos pilotos eles estão cientes de que estão cerrando os dentes, o que requer a implementação de promoção, prevenção e estabelecimento de protocolos para o manejo dessa patologia.

**Palavras-chave:** bruxismo, Força Aérea Colombiana, pilotos.

## Introducción

Bruxismo deriva de la palabra griega *brygmós*, que significa crujir de dientes. Se ha definido como el acto de “apretar, rechinar y desgastar los dientes produciendo daño en sus piezas dentarias. Esta condición puede afectar tanto a niños como adultos, algunas personas con bruxismo aprietan sus dientes durante el día, a menudo cuando se sienten ansiosos o tensos” (Benavidez, 2009, p. 22), otros lo hacen durante el sueño y no son conscientes de esta condición, por lo que no son diagnosticados sino hasta que ocurren complicaciones o daños irreversibles.

En el Antiguo Testamento se encuentran referencias al bruxismo cuando se habla del “crujir y rechinar de los dientes” (Mateo 8:12) en relación con los castigos eternos. Ramfjord en 1961 definió al bruxismo como un hábito parafuncional motor mandibular en el que se aprieta, rechina, castaña, golpea y se mastica sin realizar ninguna función fisiológica.

La Asociación Americana de Desordenes del Sueño (ASDA) da una definición muy sencilla del bruxismo del sueño: movimiento estereotipado caracterizado por el rechinar o apretado de los dientes durante el sueño (1990).

La Academia Americana del Dolor Orofacial (AAOP), define el bruxismo como: “actividad parafuncional diurna o nocturna que incluye apretar, juntar, golpear o rechinar los dientes (2008).

El bruxismo se encuentra en la lista de los desórdenes del sueño, *International Classification of Sleep Disorders (ICSD)*, está en la tercera posición después de hablar dormido y roncar, es uno de los más prevalentes, complejos y destructivos desordenes orofaciales.

El bruxismo es considerado como una patología común que se observa en todas las edades y con incidencia semejante en ambos sexos. Varios estudios demuestran que el bruxismo es uno de los desórdenes funcionales orales de mayor prevalencia, complejos tanto en su diagnóstico como en su tratamiento y destructores del sistema estomatognático (Pavone, 1985). No existe predilección por ningún sexo, y uno de cada cinco pacientes con bruxismo, tiene síntomas de dolor orofacial (Lavigne et al., 1999).

## Significado operacional

El bruxismo es una patología oral altamente destructiva que puede llegar a afectar las operaciones aéreas, esto debido a que el piloto en vuelo puede llegar a presentar como consecuencia del apretamiento o rechinar dental, dolor dental, dolor muscular, dolor de cabeza, dolor cervical, que podría alterar la concentración necesaria para cumplir con la misión.

De igual manera, los efectos devastadores del bruxismo pueden llegar a generar incapacidades médico-odontológicas de vuelo a las tripulaciones, esto debido a tratamientos de gran complejidad que pueden incluir: extracciones dentales, tratamientos de conductos, etc.

Según Gunepin (2011) afirma sobre el bruxismo que entre las tripulaciones militares francesas, durante los vuelos, las tripulaciones deben hacer frente a las limitaciones medioambientales. Una respuesta inadecuada a estas demandas, llamada estrés, puede implicar un impacto perjudicial en la salud, especialmente en los dientes con bruxismo. También deduce que:

Los movimientos deben ser repetitivos, involuntarios e inconscientes, sin ningún objetivo funcional. Este fenómeno está asociado con el desgaste anormal de los dientes y la incomodidad o dolor en los músculos de la mandíbula. 20 % a 30 % de



la población civil en general sufre de bruxismo diurno. (p. 196)

Aunque la literatura reconoce la relación entre el bruxismo y los factores psicológicos, incluyendo el estrés emocional, no hay consenso sobre hasta qué punto estos factores pueden estar asociados. Pocos estudios evaluaron la relación entre bruxismo y estrés emocional en un grupo específico (policías militares), supuestamente más expuestos al estrés emocional que la población en general (Aroucha et al., 2008).

### Actualidad del bruxismo

El sistema estomatognático es una unidad morfofuncional constituida por una serie de estructuras que forman parte del macizo craneofacial. Esto participa en el desempeño de funciones vitales para la vida, tales como: masticación, deglución, fonación y respiración.

Es así, sin olvidar a los demás que, aunque no tan vitales como la supervivencia, la comunicación, el afecto, la expulsión, la risa, la tos, la succión y la expresión emocional, permiten el desarrollo del individuo como sujeto social. La complejidad de esta operación, facilita la ocurrencia de incoordinaciones con facilidad, con la subsiguiente ruptura de toda su armonía fisiológica e integridad anatómica (Díaz, 2017).

Es importante tener en cuenta que más del 30 % de la gente bruxa en todo momento, el 100 % puede hacerlo en algún instante de su vida, de 6 % a 20 % de las personas son conscientes de que sufre de bruxismo, en los niños puede ocurrir solo brotando los dientes y en los adultos después de haber perdido todos ellos. En el Programa Nacional de Asistencia Estomatológica Integral, se afirma que es necesaria la integración de diferentes disciplinas estomatológicas e incluso médicas en la atención terciaria para el análisis de los síntomas y signos clínicos.

Aunque es cierto que existe una estructura destinada a encausar pacientes de cuidados con la oclusión deficiente, no es suficiente para alcanzar un diagnóstico precoz, eliminar la mutilación dental recurrente y rehabilitar funcional y estéticamente. Los servicios de estomatología en la atención secundaria y terciaria, recibían regularmente pacientes con síntomas avanzados y signos de bruxismo y disfunción de la articulación temporomandibular y oportunidades con estructuras dentales finales dañadas (Díaz, 2017).

### Prevalencia y epidemiología

Es considerado dentro de las alteraciones parafuncionales el más prevalente, complejo y destructivo de los desórdenes orofaciales, problema médico que a escala mundial, Barboza (2012), afirman que “de acuerdo con los datos de

la Organización del Bruxismo en Estados Unidos, ese hábito afecta al 10.8 % de la población y ocurre tanto en niños como en adultos” (p. 7).

Al respecto, Montero et al. (2011) citado en Hernández et al. (2017a), enfatiza

que esta condición afecta de un 15 % al 23 % de la población adulta y que la edad es un factor sustancial a ser considerado. Se presenta en el 14 % de la población infantil, con respecto al 8 % de los adultos y en el 3 % de los pacientes con más de 60 años de edad según los datos de Díaz *et al.*, s.f., citados en Hernández *et al.*, 2017<sup>a</sup>. (p. 918)

Por otro lado, González et al. (2011) citados en Hernández *et al.* (2017a), “observa que el bruxismo puede afectar entre el 5 % y el 20 % de los adultos, y aumenta en estudios clínicos para valores que varían entre 50 % y 90 %” (p. 918). Por su parte, Díaz et al. (2009) citados en Hernández *et al.* (2017a), relata que “10 % a 20 % de la población mundial tienen ese hábito, y el 100 % puede bruxar en algún momento de sus vidas” (p. 918).

### Etiología

El bruxismo puede ser considerado multifactorial. Se han descrito distintas teorías para explicar la génesis de este trastorno.

Algunos estudios sugieren que puede haber una predisposición genética al bruxismo, se ha visto que entre el 20 % y 64 % de los pacientes con bruxismo del sueño pueden tener un miembro de su familia que refiera rechinar dentario (Okeson, 2008). A pesar de las controversias que todavía existen sobre el bruxismo, existe consenso sobre la naturaleza multifactorial de su etiología. Factores periféricos (morfológicos), centrales (fisiopatológicos y psicológicos), están involucrados; parece ser que el bruxismo está modulado por varios neurotransmisores del Sistema Nervioso Central (SNC). Más concretamente, se han relacionado alteraciones del sistema dopaminérgico central con el bruxismo. De ahí que factores como el cigarrillo, alcohol, drogas, enfermedades y traumas del SNC se vean involucrados en la etiología del bruxismo (Okeson, 2008).

Mientras que el bruxismo de la vigilia es una actividad voluntaria o semivoluntaria, el bruxismo del sueño es completamente involuntario, y está considerado como una parasomnia (López, 2006), es decir, una alteración de la conducta durante el sueño en la que el paciente se mueve, habla o realiza actos de contenido e intensidad variable sin conservar recuerdo alguno, que ocurre previo a la fase REM y en el paso de sueño ligero a vigilia.

En diversos estudios los bruxistas presentan tasas superiores de estrés a los grupos control, relacionando el bruxismo de la vigilia y del sueño en muchos casos con acontecimientos o situaciones de estrés. Este activa el sistema dopaminérgico, mesolímbico y mesocortical (Chrousos, 1992).

En un estudio realizado en la Fuerza Aérea de Israel con 57 oficiales de los cuales 35 eran pilotos y 22 de tierra, se encontró que el 70 % de los pilotos fueron diagnosticados como bruxomanos y se relacionó este diagnóstico con el nivel de estrés que les genera su trabajo como pilotos militares, y solamente el 27 % de los oficiales no pilotos fueron diagnosticados con bruxismo (Lurie, 2007). De acuerdo a Alcolea et al. (2014), quienes afirman que “el vínculo laboral como elemento generador de estrés y la necesidad de rehabilitación protésica son los factores causales que más influyeron en la morbilidad por bruxismo. El bruxismo produce efectos perjudiciales sobre la Articulación Temporomandibular (ATM)” (p. 200).

### Clínica

La aparición de sintomatología clínica en bruxistas depende de la frecuencia, duración e intensidad de las fuerzas ejercidas sobre el sistema masticatorio, así como la capacidad de este para la adaptación. Encontramos al bruxismo como origen de patologías dentales y periodontales, y relacionado con desordenes temporomandibulares (DTM), ya sean artropatías o miopatías (Magnusson, 2005). En este contexto, Santos et al. (2016) afirman que:

Las personas con bruxismo grave presentan síntomas más intensos. Se presenta mayor dolor muscular, cambios en la calidad del sueño y la salud bucal, ansiedad y depresión que las personas con bruxismo moderado. Sin embargo, ambos muestran similitud en el estrés. (p. 428)

Se pueden distinguir 4 niveles donde se pueden hallar lesiones derivadas del bruxismo:

Tabla 1.  
Lesiones derivadas del bruxismo

DENTAL	PERIODONTAL	MUSCULAR	ARTICULACIÓN TEMPOROMANDIBULAR (ATM)
- Atriciones			
- Abfracciones			
- Erosiones	- Pérdida ósea		- Luxaciones disco-condilares
- Cervicales	- Recesión gingival	- Hipertrofia de músculos maseteros y/o temporales	- Sinovitis
- Desgaste dental	- Movilidad dental	- Dolor muscular	- Capsulitis
- Fracturas dentales	- Aceleramiento de enfermedad periodontal ya establecida	- Espasmos musculares	- Retrodisquitis
- Fracturas de las obturaciones (resinas, amalgamas)		- Mialgias	- Dolor en ATM
- Sensibilidad dental			- Limitación en apertura bucal

Fuente: elaboración propia

Así mismo, se pueden presentar otros síntomas de gran importancia que incluso pueden llegar a generar incapacidad médica de vuelo, como son:

- Rechinar los dientes con ruido característico que incluso el compañero de habitación lo puede sentir o escuchar, puede llegar a ser de tal intensidad que lo despierta.
- Dolor de cabeza.
- Dolor de oído.
- Mareos.
- Dolor de cuello.

- Tinnitus (sensación de escuchar ruidos en los oídos).
- Somnolencia.

El desgaste dentario fisiológico se ha calculado en aproximadamente de 30 a 65 micras año (Christensen, 2000). Cuando la pérdida de tejido dental supera estos márgenes, generalmente se relaciona con el bruxismo. La atrición dentaria puede afectar a un solo par de dientes de distinta arcada o a la totalidad de estos. Estas atriciones se dan en individuos con bruxismo fásico. Cuando desaparece el esmalte y queda la dentina expuesta se acelera la pérdida de tejido, ya que esta es más blanda que el esmalte y más vulnerable a ambientes ácidos (Bermejo, 1998). La



atrición a través del tiempo puede producir pérdida de dimensión vertical, pérdida de la anatomía del diente y de su eficacia masticatoria (Perel, 1994).

## Causas de riesgo de bruxismo en pacientes adultos

El diagnóstico de bruxismo fue determinado por la presencia de aspectos no funcionales en dientes anteriores y posteriores; además, los pacientes tenían al menos uno de los siguientes criterios: sonidos audibles referidos, fracturas de dientes y restauraciones, hipertrofia masticatoria muscular masetero y temporal, exostosis, dolor muscular, dolor en la movilidad articular diatoria temporomandibular en las primeras horas de la mañana (Hernández et al., 2017b).

### Hipótesis fisiopatológicas

Según Nápoles et al. (2014), las hipótesis fisiopatológicas son diversas. Se argumenta que no hay un solo factor responsable por el bruxismo, pero entre los múltiples factores que lo originan incluyen:

- **Estrés:** en circunstancias normales, hay una respuesta fisiológica al estrés, que nada más es que la reacción adaptativa del organismo a las condiciones siempre cambiantes del ambiente externo e interno.
- **Hiperfunción dopaminérgica central:** el sistema dopaminérgico central consiste en fibras que vienen de grupos celulares que usan agentes neurotransmisores excitatorios o inhibidores y que funcionan de manera semejante a las hormonas; estos tres agentes son: noradrenalina, dopamina y serotonina. Muchos autores hipotetizaron que la dopamina es el neurotransmisor de los sistemas de recompensa.
- **Trastornos del sueño:** el rechinar dental es más común durante el sueño, comúnmente en vigilia. El bruxismo de la vigilia es una actividad voluntaria o semivoluntaria, pero la del sueño es completamente involuntaria, caracterizada por contracciones físicas faciales y tónicas de los músculos elevadores de la mandíbula.
- **Factores genéticos:** en ese sentido, no hay estudios generacionales y de identificación cromosómica suficientes que expliquen su participación, aunque algunos estudios sugieren que puede haber una predisposición genética al bruxismo.
- **Oclusión:** esta ha sido la teoría clásica y divulgada acerca de la causa del bruxismo, lo que explica que algún tipo de interferencia oclusal puede originarlo. En algunos estudios conducidos a este

respecto, se concluye que las maloclusiones no aumentan la probabilidad de bruxismo; en otros, se han asociado interferencias oclusales y estrés y se considera que la supraoclusión asociado con este último hace aumentar la posibilidad de desencadenar, por ejemplo, la mordida cruzada posterior que interviene en la actividad muscular del sistema estomatognático.

- **Déficit de sustancias nutricionales como el calcio y el magnesio:** los bajos niveles de calcio, además de causar contracciones anormales de la musculatura, generan bruxismo debido a la pérdida complementaria de iones de magnesio por razones de equilibrio electrolítico. El magnesio es un elemento químico esencial para los seres humanos, que desempeña papeles importantes en la actividad de muchas coenzimas.

### Diagnóstico

Es muy difícil identificar el bruxismo en las etapas iniciales, porque los pacientes desconocen su significado y efecto. El diagnóstico se basa en la información proporcionada por el paciente o la familia sobre ruidos o rechine de los dientes, la evaluación clínica, la prueba de electromiografías y el uso de dispositivos intraorales como el *Bite Strip* y *BruXchecker*. Esto explica, de acuerdo a Montero et al. (2011) citados en Hernández et al. (2017a), la variabilidad de informes de prevalencia de los síntomas asociados en la población general, debido a diferentes metodologías de investigación, las definiciones operativas, los criterios clínicos y las muestras seleccionadas.

Al respecto, el uso de polisomnografía en laboratorios del sueño actualmente es considerado el método más preciso para el diagnóstico de bruxismo. No obstante, es un método de alto costo y que no puede ser hecho en consultorios odontológicos o en la residencia del paciente, exigiendo el desplazamiento del paciente. El uso de criterios clínicos para diagnosticar el bruxismo fue comprobado por Lavigne et al. (s.f.) citados en Aroucha et al. (2008).

### Tratamiento

Existe en la actualidad gran controversia respecto del tratamiento más adecuado para el bruxismo, el cual debe ser abordado desde una visión y manejo multidisciplinario.

Por ser el bruxismo de etiología multifactorial y aún sin determinar, su tratamiento aborda parámetros distintos. El objetivo principal es conseguir que los dientes no entren en contacto con sus antagonistas más de 17 a 20 minutos al día, la mayoría de los tratamientos propuestos hasta ahora solo logran una reducción parcial de la sintomatología. Aunque se sabe que hay parámetros sobre

los cuales no se puede actuar como es la genética, **sí** se pueden tratar factores etiopatogénicos como el estrés, mejorar la oclusión, en definitiva, alternativas en dirección dental, farmacológica y conductual (Bader, 2000). Así, el tratamiento y prevención del bruxismo se puede basar en:

- **Manejo del estrés:** cualquier estrategia que promueva la relajación será de gran utilidad, ya sea leer, hacer ejercicio, escuchar música, etc. Si el estrés es muy fuerte o de difícil manejo, es conveniente buscar ayuda profesional para lograr un mejor manejo de estos problemas.
- **Placas oclusales:** son placas acrílicas que cubren las superficies oclusales de los dientes (las que muerden), para evitar que entren en contacto entre sí mientras se aprieta y de esta manera se evita el desgaste del tejido dentario. Además de evitar la destrucción dental permiten que los músculos de la cara descansen y no se generen espasmos de los mismos, generalmente estas placas se utilizan en la noche para dormir, pero en algunos casos más severos o cuando hay dolor está indicado utilizarlo durante el día o durante la actividad de vuelo.
- **Calor local:** aplicación de calor húmedo local, este tratamiento es muy útil para los músculos cuando hay dolor o espasmos, el calor local promueve flujo sanguíneo hacia el musculo y a la vez, ayuda a sanar y relajar los músculos.
- **Medicamentos:** en general los medicamentos se utilizan como terapia sintomática, se pueden recetar analgésicos, relajantes musculares o bien ambos combinados. Se debe tener presente que estos últimos pueden generar somnolencia, relajación de musculatura no afectada, disminución de reflejos, etc., los cuales estarían contraindicados para los pilotos y tripulantes de vuelo.
- **Botox:** la aplicación de toxina botulínica tipo A o Botox en los músculos masticadores ha probado ser una excelente herramienta para ayudar a combatir las secuelas del bruxismo. Esta droga es un potente e inocuo relajante muscular local que actúa por un largo plazo de tiempo (3 a 6 meses). Relajando solo los músculos masticadores afectados, sin producir los indeseables efectos secundarios de los relajantes musculares sistémicos.
- **Autocuidado:** limitar o eliminar por completo el consumo de alcohol, cigarrillo y cafeína, ya que estas sustancias pueden empeorar el bruxismo.

La Fuerza Aérea Colombiana no es ajena a esta patología, y en la actualidad no se cuenta con un perfil de bruxismo del personal de pilotos; motivo por el cual se llevó a cabo el presente estudio, para establecer su prevalencia y generar protocolos de manejo para esta patología.

## Materiales y métodos

Posterior a la aprobación por el comité de Ética del Hospital Militar Central, se realizó un estudio descriptivo de corte transversal, 284 pilotos que asistieron a sus exámenes médicos de control anual de aptitud psicofísica entre el 1 de octubre de 2012 y el 30 de junio de 2013, en el Centro de Medicina Aeroespacial de la Fuerza Aérea Colombiana. Se incluyeron los pilotos que cumplieron los criterios de inclusión del presente estudio, de ambos sexos, pilotos de avión y de helicóptero, con edades que oscilaron entre los 22 y 46 años, quienes participaron voluntariamente en el estudio; así mismo, se excluyeron de la muestra 10 pilotos quienes no autorizaron su inclusión, para una muestra final de 274 pilotos.

## Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el SPSS v20 IBM®. Se realizó un análisis descriptivo de las variables. Para determinar diferencias significativas entre los grados se aplicó ANOVA ( $p < 0.05$ ) y la prueba de T de Student para diferencias ( $p < 0.05$ ) entre los grupos según tipo de aeronave.

## Criterios de bruxismo

Una vez finalizado el examen clínico odontológico, se dispuso de los datos suficientes para emitir un diagnóstico clínico de bruxismo. Los datos obtenidos fueron consolidados en una base de datos de Excel, la cual fue analizada mediante el programa estadístico SPSS v20 IBM®.

Se realizó un análisis descriptivo de los datos y posteriormente se aplicó un ANOVA de una vía entre los diferentes grados en busca de diferencias significativas. Así mismo se aplicó una prueba T de student para determinar diferencias significativas según el tipo de aeronave.

## Resultados

El tamaño total de la muestra fue de 274 pilotos, con una edad promedio de (30 años  $\pm$  7). Del total de la muestra 4 % fueron mujeres y 96 % hombres. La distribución según el tipo de aeronave fue un 35 % pilotos de helicóptero y 65 % pilotos de ala fija. Así mismo, el 30 % de la muestra corresponden al grado de subtenientes, el 19 % tenientes, el 17 % capitanes; el 20 % mayores; el 12 % teniente coronel y el 1 % coronel.

En términos de bruxismo el 41 % del total de la muestra fue diagnosticado positivo, lo que equivale a 113 pa-

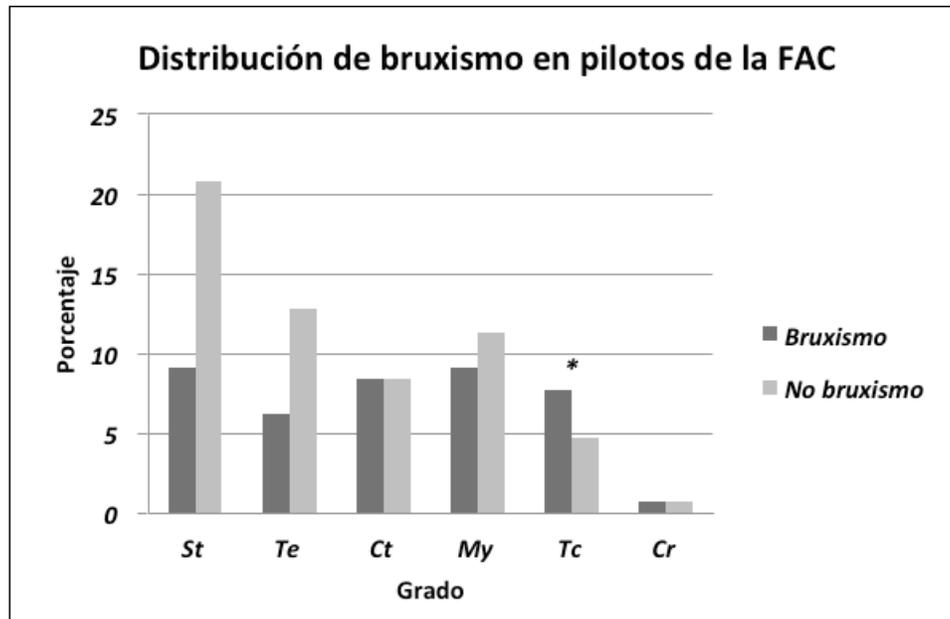


Figura 1. Distribución de bruxismo en pilotos de la FAC. \*Diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) st: tc  
Fuente: elaboración propia

cientes, de los cuales fueron 2 mujeres (2 %) y 111 hombres (98 %). De las 11 mujeres que se incluyeron en el estudio el 19 % dio positivo y el 82 % negativo para bruxismo; y de los 263 hombres el 42 % dio positivo y el 58 % negativo para bruxismo.

De acuerdo al grado militar, de los 82 subtenientes incluidos en la muestra, el 30 % dio positivo y el 70 % negativo para bruxismo. En el grado de teniente fueron 52 pilotos, el 33 % positivo y el 67 % negativo para bruxismo. En el grado de capitán fueron 46 pacientes, el 50 % dio positivo y el 50 % negativo para bruxismo. En el grado de mayor fueron 56 pilotos de los cuales el 45 % dio positivo y el 55 % negativo para bruxismo. En el grado de teniente coronel fueron 34 pacientes, el 62 % dio positivo y el 38 % negativo para bruxismo. En el grado de coronel fueron 4 pilotos, el 50 % dio positivo y el 50 % negativo para bruxismo.

Al aplicar el ANOVA entre el grupo que presenta bruxismo, se encontró que los subtenientes presentan una prevalencia significativamente mayor ( $P=0.022$ ) que los tenientes coroneles. No se encontraron otras diferencias significativas entre los grupos.

De los 96 pilotos de helicóptero, el 39 % dio positivo y el 61 % negativo para bruxismo. De los 178 pilotos de avión, el 43 % dio positivo y el 57 % negativo para bruxismo. No se encontraron diferencias significativas entre los pilotos de ala rotatoria y ala fija ( $p > 0.05$ ).

El 38 % de los pilotos diagnosticados como bruxomanos respondieron afirmativamente a la pregunta: ¿Sabe de alguien en su familia que apriete, rechine o desgaste los dientes? El 20 % reportó presentar algún grado de dolor en el cuello, en los músculos de la cara o en la articulación temporomandibular. El 13 % refirió que durante su rutina de vuelo aprietan o rechinan los dientes. Solo el 38 % de los pilotos diagnosticados con bruxismo es consciente que está apretando o rechinando sus dientes mientras duerme. El 28 % reportó tener el hábito de morderse las uñas.

En cuanto al nivel de estrés que manejan los pilotos diagnosticados con bruxismo en su rutina de vuelo, el 42 % reportó un nivel alto, el 50 % medio y el 8 % bajo. Y el nivel de estrés que manejan en su vida familiar, en el nivel alto está el 11 %, en el nivel medio el 54 % y en el nivel bajo el 35 %.

El 59 % de los pacientes diagnosticados con bruxismo presentan algún grado de hipertrofia a nivel de los músculos maseteros o temporales. El 75 % presentó algún grado de recesión gingival o de abfracciones. El 36 % presentó torus o exostosis mandibular o maxilar. Y el 27 % de los pilotos diagnosticados con bruxismo están o han recibido tratamiento para esta patología.

## Discusión

El bruxismo es considerado como una patología común que se observa en todas las edades y con incidencia

semejante en ambos sexos. Varios estudios demuestran que el bruxismo es uno de los desórdenes funcionales orales de mayor prevalencia, complejos tanto en su diagnóstico como en su tratamiento y destructores del sistema estomatognático (Pavone, 1985). No existe predilección por ningún sexo, uno de cada cinco pacientes con bruxismo tiene síntomas de dolor orofacial (Lavigne et al., 1999).

Para Seraidarian (2001) el bruxismo está fuertemente relacionado con alteraciones emocionales y situaciones de estrés, la profesión de piloto militar supone manejo de altos niveles de estrés, por lo que esta población tiene una mayor predisposición a presentar episodios de bruxismo.

Goldhust (1995) citado en Marín (2018), estima que entre el 60 % y el 70 % de los pilotos militares en el mundo en la era de la posguerra han sufrido de bruxismo. Lurie (2007) en un estudio realizado en la Fuerza Aérea de Israel encontró que la prevalencia del bruxismo en pilotos fue del 69 %, mientras que en el grupo de no pilotos fue del 27 %. Nascimento (2009) citado en Marín (2018), concluyó en su estudio que hay una mayor prevalencia de bruxismo en militares de la Marina del Brasil cuando los comparó con la población civil. En el presente estudio encontramos una prevalencia del 41 %, lo que equivale a 113 pilotos, número bastante importante si consideramos que las consecuencias destructoras del bruxismo pueden acarrear patologías dentales severas e incapacitantes en nuestras tripulaciones, que pueden afectar su salud en general y la actividad operacional de la Fuerza Aérea Colombiana.

De los 113 pilotos reportados como bruxomanos solo 31 (equivalente al 27 %) están recibiendo algún tratamiento para esta patología, y solo 43 son conscientes que están bruxando, de ahí la importancia del presente trabajo de investigación para generar guías de promoción, prevención y protocolos de atención para que esta patología sea controlada, y de esta forma asegurar que nuestras tripulaciones estén en condiciones óptimas para desarrollar sus actividades operacionales.

## Conclusiones

La prevalencia de bruxismo en pilotos de la Fuerza Aérea Colombiana fue del 41 %, porcentaje bastante alto si consideramos que esta patología tiene unas consecuencias destructoras orofaciales devastadoras, que puede llegar a afectar la salud de los pilotos que la padecen y por ende la seguridad y la actividad operacional de la Fuerza Aérea Colombiana.

## Recomendaciones

Se sugiere seguir con esta línea de investigación para conocer más acerca del bruxismo y así poder generar progra-

mas de promoción y prevención, estableciendo protocolos y guías de atención más contundentes a la hora de tratar a nuestros pilotos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la señora capitán médico Alejandra Corzo, por su asesoría y por el procesamiento estadístico de los datos del estudio.

## Referencias

- Academia Americana del Dolor Orofacial (AAOP). (2008). Orofacial Pain. Guidelines for assessment, diagnosis and Management. 4ª ed. In T. A. Pain (Ed.). Hanover Park, Illinois, EE.UU.
- Alcolea, J. R., Herrero, P., Ramón, M., Trinidad, E., Pérez, M. y Garcés, D. (2014). Asociación del bruxismo con factores biosociales. *CCM*, 18(2), 190-202. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/ccm/v18n2/ccm03214.pdf>
- Aroucha, S. A., Almeida de Carvalho, A. L., Carneiro de Lucena, S., De Siqueira Coelho, J. P. & Brandão de Araújo, T. P. (2008). Associação entre bruxismo e estresse em policiais militares. 125-129. *Rev. odonto ciênc.* 23(2), 125-129. Recuperado de <http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/fo/article/viewFile/2436/3025>
- Asociación Americana de Desordenes del Sueño (ASDA). (1990). *Diagnosis classification steering committee. Classification of sleep disorders: diagnostic and coding Manual*. In A. S. Association, & A. Press (Edits.). New York, Rochester, EE. UU.
- Bader, G. (2000). Sleep bruxism; an overview of an oromandibular sleep movement disorder. *Review article*, 4(1), 27-43. doi: 10.1053/smr.1999.0070.
- Benavides Garay, A. R. (2009). *Relación de la frecuencia de bruxismo con el tipo de perfil de afrontamiento del estrés en estudiantes del 1er y 2do ciclo comparado con los estudiantes del 9no y 10mo ciclo de la Facultad de Estomatología de la Universidad Inca Garcilaso de la Vega en el semestre 2009- II* (Tesis). Universidad Inca Garcilaso de la Vega. Recuperado de <http://www.cop.org.pe/bib/tesis/ANAROSABENAVIDESGARAY.pdf>
- Barbosa Hernández, J. Z. (2012). Prevalencia de bruxismo en alumnos del décimo semestre de la Facultad de Medicina Campus Posa Rica – Tuxpan. (Tesis). Universidad Veracruzana. Recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/view/16282032/prevalencia-de-bruxismo-en-alumnos-del-decimo-semestre-de-la>
- Bermejo, A. (1998). *Medicina Bucal*, 1(2). España: Síntesis.
- Christensen, G. (2000). Treating bruxism and clenching. *MEDLINE Medline*. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10680392>
- Chrousos, G. G. (1992). *The concepts of stress and stress system disorders. Overview of physical and behavioral homeostasis*. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1538563>



- Díaz, S. (2017). Algoritmo de trabajo para el paciente con bruxismo. *Arch Med Camagüey*, 21(4), 487-497. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/amc/v21n4/amc070417.pdf>
- Gunepin, M. (2011). Techniques for potential improvement intervention for the prevention of bruxism among french military aircrews. *ResearchGate*, 157(2), 196-197. doi: <http://dx.doi.org/10.1136/jramc-157-02-18>
- Hernández, B. D., Díaz Gómez, S. M., Hidalgo Hidalgo, S., Lazo, R. (2017a). Bruxismo: panorámica actual. *Arch Med Camagüey*, 21(1), 913-930. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/amc/v21n1/amc150117.pdf>
- Hernández, B. D., Díaz Gómez, S. M., Hidalgo Hidalgo, S., López, S., García, L. & Noy, J. E. (2017b). Factores de riesgo de bruxismo en pacientes adultos. *Arch Med Camagüey*, 21(3), 311-320. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/amc/v21n3/amc020317.pdf>
- Lavigne, G. J., Goulet, J. P., Zuconni, M., Morisson, F & Lobbezoo, F. (1999). Sleep disorders and the dental patient. *Oral Surg O*, 88(3), 257-272. doi: 10.1016/s1079-2104(99)70025-9.
- López, M. F. (2006). *El registro polisomnográfico*. En F. Alcalá (Ed.). Alcalá la Real.
- Magnusson, T. E. (2005). A prospective investigation over two decades on signs and symptoms of temporomandibular disorders and associated variables. A final summary. *Acta Odontologica Scandinavica*, 63, 99-109. Recuperado de <https://sci-hub.tw/10.1080/00016350510019739>
- Marín, M. (2018). *Nivel de estrés laboral asociado a bruxismo en la tripulación aérea de la Fuerza Aérea del Perú durante el año 2017*. (Tesis de grado). Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.upsjb.edu.pe/bitstream/handle/upsjb/1687/T-TPCD-Mayra%20Carolei%20Marin%20Chavez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nápoles, D. G., García Cabrera, L., Rodríguez Reyes, O. y Nápoles Méndez C. D. (2014). Tendencias contemporáneas de las bases fisiopatológicas del bruxismo. *Medisan*, 18(8), 1-9. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/san/v18n8/san17188.pdf>
- Okeson, J. (2008). *Oclusión y afecciones temporomandibulares* (5.ª ed.). Madrid, España: Mosby.
- Pavone, B. W. (1985). Bruxism and its effect on the natural teeth. *J Prosthet Dent*, 53(5), 692-696.
- Perel, M. (1994). *Parafuncional habits, nightguards, and Root Form Implants*, pp. 261-263. doi: 10.1097/00008505-199412000-00011.
- Santos, C. F., Fioranelli, G., Osses, E. F., Costa, J. R., Puliti, E. & Pascual A. P. (2016). Los síntomas de diferentes niveles de gravedad del bruxismo: estudio transversal. *Fisioterapia e Pesquisa*, 23(4), 423-430. doi: 10.1590/1809-2950/15988723042016. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/fp/v23n4/2316-9117-fp-23-04-00423.pdf>
- Ramfjord, S. P. (1961). Bruxism: A clinical and electromyographic study. *Jamer Dent Assoc*, 62, 21-44.
- Seraidarian, P. V. (2001). Bruxismo: uma atualização dos conceitos, etiologia, prevalência e gerenciamento. *JBA, Curitiba*, 1(4), 290-295. Recuperado de <https://www.dtscience.com/wp-content/uploads/2015/10/Bruxismo-Uma-Atualiza%C3%A7%C3%A3o-dos-Conceitos-Etiologia-Preval%C3%Aancia-e-Gerenciamento.pdf>



## EVALUACIÓN ESTRUCTURAL ALAR DE AERONAVE CATEGORÍA VLA PARA CERTIFICACIÓN EN COLOMBIA<sup>1</sup>

WING'S STRUCTURAL ASSESSMENT OF A VLA AIRCRAFT FOR CERTIFICATION IN COLOMBIA<sup>2</sup>

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DA ASA DE UMA AERONAVE CATEGORIA VLA PARA CERTIFICAÇÃO NA COLÔMBIA<sup>3</sup>

Andrés Palomino<sup>4</sup>

World Aircraft Company South America - WACSA S.A.S. Cali, Colombia

---

### CIENCIA Y PODER AÉREO

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-9468 / Volumen 13 / Número 2 / julio-diciembre de 2018/ Colombia /pp. 28-45

Recibido: 13/08/2018

Aprobado por evaluador: 29/08/2018

Doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.600

**Para citar este artículo:**

Palomino, A. (2018). Evaluación estructural alar de aeronave categoría VLA para certificación en Colombia. *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(2), 28-45. doi: 10.18667/cienciaypoderareo.600

---

<sup>1</sup> Reporte de caso asociado al proyecto de Certificación Bajo Norma Cs-Vla De Aeronave Colombiana.

<sup>2</sup> Report of case associated to the project of Certification Under Norm Cs-Vla of Colombian Aircraft.

<sup>3</sup> Relato de caso asociado ao Projeto de Certificação sob o Padrão de Aeronaves Colombianas Cs-Vla.

<sup>4</sup> Ingeniero aeronáutico e ingeniero mecánico egresado de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín (UPB). Actualmente trabaja en la obtención de certificado de aeronavegabilidad especial para la aeronave colombiana WA500-AG de la empresa World Aircraft Company, South America (WACSA) S. A. S. Cali, Colombia. ORCID: 0000-0002-0518-3833. Correo electrónico: andrepalcar@hotmail.com

**Resumen:** El presente reporte de caso muestra el trabajo y los resultados de la evaluación estructural del ala llevado a cabo sobre la aeronave de diseño y fabricación colombiana WA500-AG. El proceso consistió en la apropiación de una norma de diseño, el cálculo de las cargas estructurales, la identificación de los casos de carga más críticos, la construcción de un banco y un espécimen de pruebas, el sometimiento de la estructura a las cargas calculadas y la identificación y corrección de aspectos de diseño. Como resultado, se obtiene un ala que demuestra ser capaz de soportar los requerimientos estructurales, dando así cumplimiento a la normativa vigente. Todo este trabajo, está enmarcado en lo que sería la primera certificación de una aeronave nacional categoría VLA ante la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil.

**Palabras clave:** aeronave VLA, análisis estructural, certificación aeronáutica, pruebas estructurales de ala.

**Abstract:** This case report shows the work and results of wing's structural assessment carried out on the Colombian design and manufacturing aircraft WA500-AG. The process consisted of the appropriation of a design standard, the calculation of structural loads, the identification of the most critical load cases, the construction of a bench and a test specimen, subjecting the structure to the calculated loads and the identification and adjustments of design aspects. As a result, it is obtained a wing able to support the structural requirements thus complying with current regulations. All this work is framed in what would be the first certification of a national aircraft category VLA before the Colombian Civil Aviation Authority.

**Keywords:** VLA aircraft, structural analysis, aircraft certification, wing structural tests.

**Resumo:** O presente artigo apresenta os trabalhos e resultados da avaliação estrutural efetuada sobre a asa da aeronave WA500-AG, um aparelho de concepção e fabricação colombiana. O processo consistiu na apropriação de uma norma de projeto, o computo das cargas estruturais, a identificação dos casos de carga mais críticos, a construção de um banco e amostra de ensaio, o teste da estrutura às cargas calculadas e a identificação e correção de aspectos de design. Como resultado, uma asa que prova suportar os requerimentos estruturais é obtida, dando assim cumprimento à regulamentação vigente. Tudo o referido trabalho, enquadrado em o que seria a primeira certificação de uma aeronave categoria VLA feita pela Agência de Aviação Civil da Colômbia.

**Palavras-chave:** aeronave VLA, análise estrutural, certificação aeronáutica, ensaios estruturais de asas.

## Introducción

La fabricación, comercialización y operación de aeronaves ligeras se hacía con relativa facilidad, hasta hace un poco más de una década, ya que no existían normas internacionales que regularan esta categoría de aeronaves. Las regulaciones de la OACI en relación a los requerimientos de aeronavegabilidad, establece en la parte V del anexo 8 los requisitos de diseño que deben cumplir aeronaves “pequeñas”, definiendo estas como aquellas con pesos máximo de despegue entre 750 kg y 5700 kg, permitiendo y responsabilizando entonces a cada Estado de definir los requisitos de aeronavegabilidad para aeronaves con pesos inferiores (OACI, 2010).

Ante la creciente demanda de aeronaves ligeras para recreación privada y actividades especiales como aspersión agrícola, la Administración Federal de Aviación Americana (FAA), así como la Agencia Europea de Seguridad de Aviación (EASA), hacen efectivas entre 2003 y 2004 nuevas regulaciones que acogen al tipo de aeronaves denominadas Light Sport Aircraft (LSA) o Very Light Aircraft (VLA).

Por otra parte en Colombia, la Aeronáutica Civil establece que mientras se adopta un código de aeronavegabilidad propio de aeronaves ligeras, para efectos de certificación, los fabricantes colombianos que se acojan al estándar de aeronavegabilidad europeo EASA *Certification Specifications for Very Light Aeroplanes* (CS-VLA) podrán obtener un certificado de aeronavegabilidad especial respecto a dicho diseño (Aerocivil, 2012).

En dicha resolución se definen las características que debe cumplir una aeronave para ser considerada de categoría VLA:

- Poseer un peso máximo de despegue no superior a 750 kg, sin importar el tipo de estructura (tubular, monocoque, etc.), alas en tela, lámina o material compuesto.
- Velocidad de pérdida no superior a 83.34 km/h (45 kts) en configuración de aterrizaje.
- Un solo motor certificado, ya sea del tipo recíproco, turbina, a reacción o eléctrico.
- Una capacidad máxima de 2 asientos, incluyendo el piloto.
- Una hélice de paso fijo o variable.
- Cabina cerrada no presurizada.
- Certificado bajo reglas de vuelo visual diurno (VFR).

World Aircraft Company South America es una empresa colombiana derivada de Agrocopteros Ltda., que cuenta con más de 30 años de experiencia diseñando, fabricando y comercializando aeronaves cuyas características las encuadran en la categoría VLA.

Por lo tanto, el presente reporte de caso exhibe parte del proceso de certificación, consistente en la aplicación de los requerimientos estructurales de la norma CS-VLA, el cálculo de las cargas en el ala, la identificación de los casos de carga más críticos, la construcción de un banco y espécimen de pruebas, el sometimiento de la estructura a las fuerzas calculadas, los ajustes de diseño y la presentación de la evidencia de cumplimiento ante la Aeronáutica Civil Colombiana. Todo este proceso hecho sobre la aeronave WA500-AG, un aparato concebido por el ingeniero colombiano Maximo Tedesco y que actualmente se encuentra en la fase de pruebas de vuelo (figura 1 y 2).



Figura 1. WA500-AG en los hangares de la Escuela Militar de Aviación (EMAVI) de la Base Aérea Marco Fidel Suarez de Cali, Colombia

Fuente: WACSA S. A. S (2015).



Figura 2. WA500-AG en vuelo

Fuente: WACSA S. A. S (2015).



En la tabla 1 se presentan algunas especificaciones de diseño de la aeronave WA500-A

**Tabla 1.**  
Especificaciones de diseño

Envergadura	10 [m]
Cuerda Alar	1.25 [m]
Área Alar	12.5 [m <sup>2</sup> ]
Longitud	6.5 [m]
Altura	2.45 [m]
Peso vacío	330 [kg]
Peso bruto máximo de operación	690 [kg]
Motor	Rotax 912 S2 de 100 [hp] (Certificado)
Hélice	MT Propeller bipala 68" (Certificada)

*Fuente:* elaboración propia.

Con relación al desempeño, en la tabla 2 se exponen algunas características importantes.

**Tabla 2.**  
Características de desempeño

Distancia para el despegue	70 [m]
Distancia para aterrizaje	100 [m]
Velocidad crucero al 75 %	105 [mph]
Velocidad máxima	125 [mph]
Velocidad de pérdida con flaps	30 [mph]
Velocidad de pérdida sin flaps	35 [mph]
Techo de servicio	14000 [ft] (4270 [m])
Alcance	460 [mi]
Autonomía	4.4 [h]

*Fuente:* elaboración propia.

## Estimación de cargas

Las cargas tomadas en consideración para el presente proyecto son básicamente dos: cargas aerodinámicas y cargas inerciales. Las primeras están relacionadas a las velocidades y características geométricas propias de la aeronave, por lo que para el cálculo de estas, se parte de resultados aerodinámicos previos (WACSA S. A. S, 2015), mientras que las inerciales son aquellas debido a la masa y el cómputo de estas, simplemente se hace multiplicando el peso por factores de carga o fuerzas G dados por norma.

La normativa relacionada a los requisitos estructurales está definida dentro del CS-VLA Subpart C - Structures (EASA, 2009). Por lo tanto, esta es la parte de la norma en la que se enfoca el presente reporte.

## Envolvente de vuelo

Ambos diagramas V-n, el de maniobra y de ráfagas son construidos de acuerdo a los lineamientos dados en los numerales CS-VLA 333 al CS-VLA 341.

Las principales velocidades de diseño se calculan de acuerdo a la definición dada en CS-VLA 335:

$$V_c = 2.4 * \sqrt{\frac{M * g}{S}} [m/s] \quad (1)$$

$$V_d = 1.25 * V_c \quad (2)$$

$$V_a = V_s * \sqrt{n} \quad (3)$$

Siendo:

- $M$  = Masa de la aeronave [kg]
- $g$  = Aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]
- $S$  = Área alar [m<sup>2</sup>]
- $V_s$  = Velocidad de pérdida [m/s]
- $n$  = Factor de carga

Los resultados obtenidos son:

$$V_c = 46.08 [m/s]$$

$$V_d = 57.60 [m/s]$$

$$V_a = 42.88 [m/s]$$

Por normativa, los factores de carga límites están definidos en CS-VLA 337 como:

$$n (+) = 3.8$$

$$n (-) = -1.5$$

Y la curva de pérdida de la envolvente de vuelo se construye con ayuda de la siguiente expresión:

$$n = \frac{\frac{1}{2} * \rho * S * C_{L_{MAX}} * V^2}{M * g} \quad (4)$$

El diagrama V-n de maniobras resultante está representado en la figura 3.

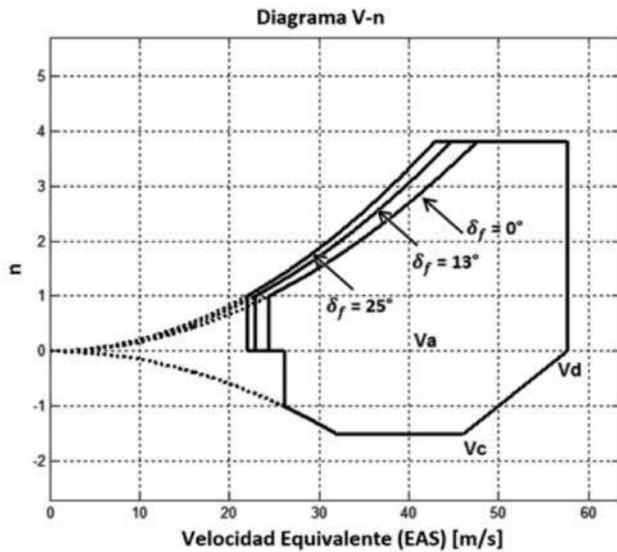


Figura 3. Diagrama V-n de maniobras para peso máximo y diferentes posiciones de flap

Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

Por su parte, el factor de carga debido a ráfagas está definido en CS-VLA 341 como:

$$n = 1 + \frac{\frac{1}{2} * \rho_o * V * a * K_g * U_{de}}{M * g/S} \quad (5)$$

Siendo:

$$K_g = \frac{0.88 * \mu_g}{5.3 + \mu_g}$$

$$\mu_g = \frac{2 * \left(\frac{M}{S}\right)}{\rho * \bar{c} * a}$$

- M = Masa de la aeronave [kg]
- $\rho_o$  = Densidad del aire al nivel del mar [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho$  = Densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]
- c = Cuerda media aerodinámica [m]
- S = Área alar [m<sup>2</sup>]
- g = Aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]
- V = Velocidad [m/s]
- a = Pendiente de la curva de sustentación [Rad<sup>-1</sup>]
- $U_{de}$  = Velocidades de ráfaga derivadas, definidas en CS-VLA 333 (1)(i) y (1)(ii)

Los factores de carga de ráfagas son calculados tanto para una condición de peso máximo como de peso mínimo (ver tabla 3):

Tabla 3. Resultados para el diagrama V-n de ráfagas

M [kg]	432	432	693	693
V [m/s]	46.08	57.60	46.08	57.60
$\mu_g$	14.11	14.11	22.64	22.64
$K_g$	0.639	0.639	0.713	0.713
$U_{de}$	15.24	7.62	15.24	7.62
n (+)	4.1	2.94	3.74	2.71
n (-)	-2.11	-0.94	-1.73	-0.71

Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto el diagrama V-n de ráfagas construido es de la forma que se presenta en la figura 4.:

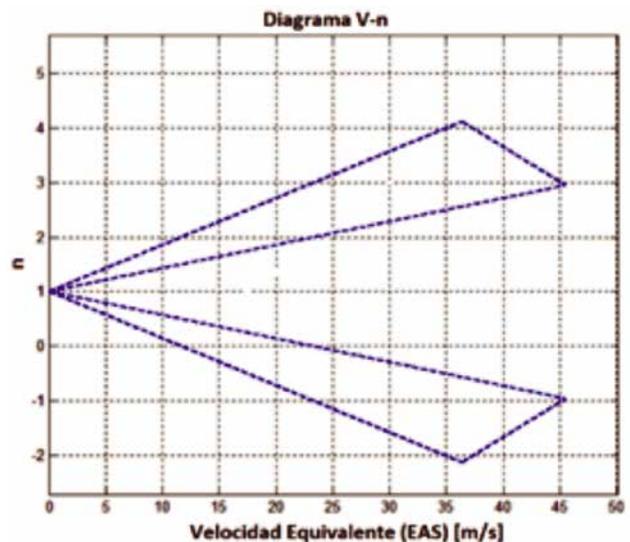


Figura 4. Diagrama V-n de ráfagas

Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

La combinación de los diagramas de maniobras y de ráfagas definen la envolvente de vuelo, como se puede apreciar en la figura 5:

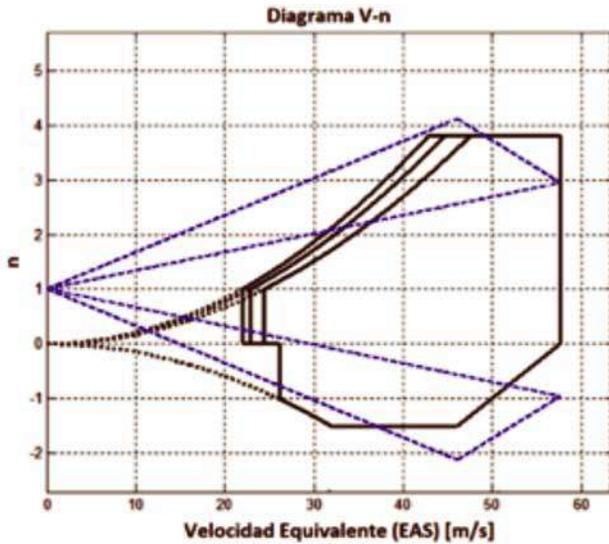


Figura 5. Envolvente de vuelo combinada  
Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

Con la información de la envolvente de vuelo final se identifican los puntos de condición más críticos, de acuerdo con CS-VLA 333 (d), como se aprecia en la figura 6:

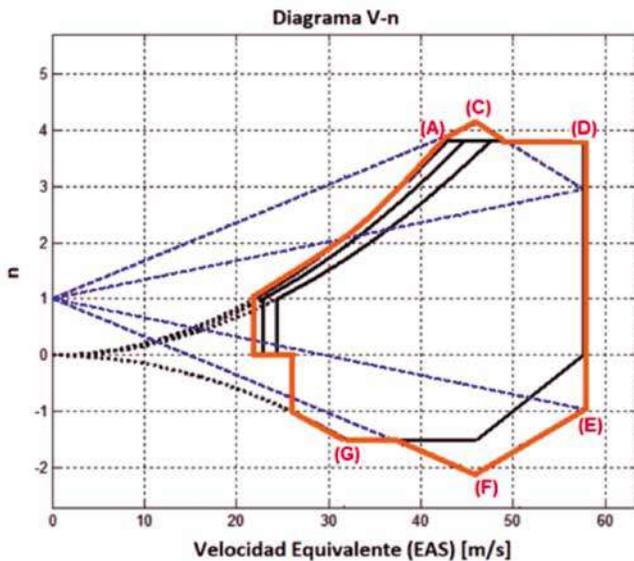


Figura 6. Puntos críticos del diagrama V-n  
Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

Por lo tanto, en la tabla 4 se registran las condiciones que se tienen en consideración para el cálculo de cargas como para las pruebas estructurales.

Tabla 4.

Características de los puntos críticos del diagrama V-n

Condición de vuelo	Factor de carga	Velocidad [m/s]	Peso [kg]
(A)	3.8	42.88	693
(C)	4.1	46.08	432
(D)	3.8	57.60	693
(E)	-0.94	57.60	432
(F)	-2.11	46.08	432
(G)	-1.5	32.04	693

Fuente: elaboración propia.

### Determinación de cargas en vuelo

Las cargas en vuelo actuantes en el ala y empenaje son estimadas balanceando las fuerzas aerodinámicas con las fuerzas inerciales, como se observa en la figura 7.

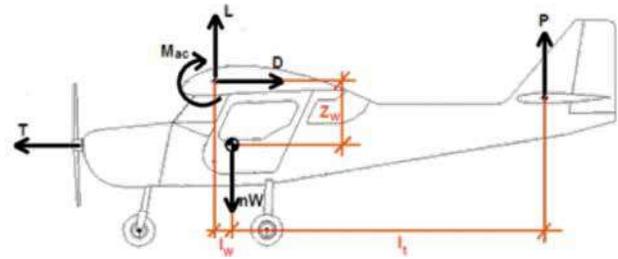


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre WA500-AG  
Fuente: elaboración propia.

Donde:

- $L$  = Sustentación del ala
- $D$  = Arrastre del ala
- $P$  = Carga aerodinámica empenaje
- $T = 0$  = Empuje (igual a 0 de acuerdo con CS-VLA 345(d))
- $W = M * g$  = Peso
- $M_{ac}$  = Momento respecto al centro aerodinámico (CA)
- $I_w$  = Distancia horizontal del CA del ala al CG
- $Z_w$  = Distancia vertical del CA del ala al CG
- $I_t$  = Distancia horizontal del CA de la cola al CG

Como se observa, el equilibrio vertical implica que:

$$L + P - n * W = 0 \tag{6}$$

Y el equilibrio de momentos respecto al CG de la aeronave:

$$M_{ac} + L * I_w + D * Z_w - P * I_t = 0 \tag{7}$$

Para un dado peso, factor de carga y velocidad, las ecuaciones (6) y (7) se pueden resolver para calcular los valores desconocidos de  $L$  y  $P$ . Sin embargo, otros parámetros como el arrastre  $D$  dependen del coeficiente de sustentación  $C_L$ , que a su vez es función de  $L$ ; por lo que en la práctica, se aplica un método de sucesivas aproximaciones (Megson, 2007), en donde se supone inicialmente que la carga en el empenaje es despreciable ( $P = 0$ ) y se itera hasta que los valores no cambien más allá de un error establecido.

Es importante resaltar que los valores de  $L$  y  $P$  obtenidos por el anterior método son transformados a fuerzas normales y transversales al ala, de acuerdo con el ángulo de ataque de la condición de vuelo estudiada (figura 8).

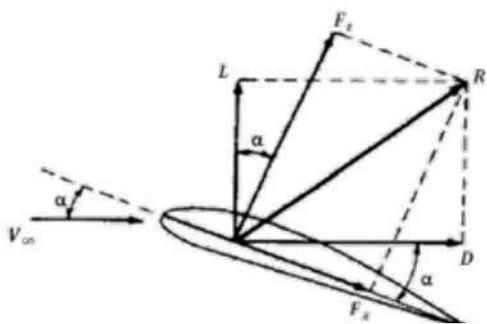


Figura 8. Descomposición de  $L$  y  $P$  en fuerza normal y transversal  
Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

De la figura 8 se deduce que las ecuaciones de descomposición están dadas por:

$$F_z = L * \cos(\alpha) + D * \sin(\alpha) \tag{8}$$

$$F_x = D * \cos(\alpha) - L * \sin(\alpha) \tag{9}$$

Los datos necesarios para computar las cargas son clasificados en 3 tipos: datos dependientes del peso (tabla 5), datos dependientes de la posición del flap (tabla 6) y datos independientes (tabla 7).

Tabla 5.  
Datos dependientes del peso

Datos dependientes del peso		
	GW = 432 [kg]	GW = 693 [kg]
$I_w$ [m]	0.0648	0.1748
$I_w$ [m]	3.476	3.366

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.  
Datos dependientes de la posición del flap

Datos dependientes de la posición del flap		
	$\delta_f = 0^\circ$	$\delta_f = 25^\circ$
$CM_{ac}$	-0.1022	-0.241
Ecuación polar de arrastre	$C_D = 0.0076363 + 0.044226 * C_L^2$	$C_D = 0.0247153 + 0.044226 * C_L^2$
Ecuación de la pendiente de sustentación ( $\alpha$ en [deg])	$C_L = 0.08813 * \alpha + 0.45827$	$C_L = 0.08813 * \alpha + 1.1545$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.  
Datos independientes

Datos independientes	
$Z_w$ [m]	0.590
$\bar{C}$ [m]	1.261
$S$ [m <sup>2</sup> ]	12.01
[kg/m <sup>3</sup> ]	1.225

Fuente: elaboración propia.

Un programa que implementa el método de sucesivas aproximaciones se escribe en Matlab®, los resultados para cada combinación de peso, factor de carga, velocidad y posición del flap del diagrama V-n son presentados en la tabla 8:



Tabla 8.  
Resultados determinación de cargas en vuelo

CONDICIÓN DE VUELO			(A)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
<b>Peso</b>	<b>W</b>	<b>[kg]</b>	693	432	693	432	432	693
<b>Posición del CG</b>		<b>[%MAC]</b>	0.34	0.30	0.34	0.30	0.34	0.34
<b>Velocidad</b>	<b>V</b>	<b>[m/s]</b>	42.88	46.08	57.60	57.60	46.08	32.04
		<b>[mph]</b>	95.9	103.1	128.8	128.8	103.1	71.7
<b>Deflexión del flap</b>	<b><math>\delta_f</math></b>	<b>[deg]</b>	25°	0°	0°	0°	0°	0°
<b>Factor de carga</b>	<b>n</b>		3.8	4.1	3.8	-0.94	-2.11	-1.5
<b>RESULTADOS</b>								
<b>Ángulo de ataque</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>[deg]</b>	8.14°	7.48°	6.52°	-6.62°	-11.2°	-19.5°
<b>Sustentación ala</b>	<b>L</b>	<b>[kg]</b>	2580.5	1780	2571.2	-311.5	-842.2	-970.2
<b>Arrastre ala</b>	<b>D</b>	<b>[kg]</b>	247.7	100.17	136.5	20.7	31.9	59.9
<b>Momento ala</b>	<b><math>M_{ac}</math></b>	<b>[kg.m]</b>	-419	-205.2	-320.6	-320.6	-205.2	-99.2
<b>Carga empenaje</b>	<b>P</b>	<b>[kg]</b>	52.9	-8.84	62.2	-94.5	-69.3	-69.3
<b>Fuerza normal al ala</b>	<b><math>F_z</math></b>	<b>[kg]</b>	2589.5	1777.9	2570.1	-311.9	-832.3	-934.5
<b>Fuerza transversal al ala</b>	<b><math>F_x</math></b>	<b>[kg]</b>	-120	-132.6	-156.6	-15.3	-132.4	-267.3
<b>Fuerza normal al empenaje</b>	<b><math>F_z</math></b>	<b>[kg]</b>	52.4	-8.77	61.8	-93.9	-68	-65.3

Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

## Distribución de carga a lo largo de la envergadura

### Cargas simétricas

Puesto que se trata de un avión subsónico de bajas velocidades, una aproximación razonable es asumir que la combinación ala-fuselaje genera esencialmente la misma sustentación que el ala sola, en otras palabras, la sustentación es generada también por aquella parte del ala embebida en el fuselaje (Anderson, 1999) (ver figura 9).

La distribución de la sustentación es obtenida por medio de un programa escrito en Matlab®, que implementa la conocida Teoría de la Línea de Sustentación (*Lifting Line Theory*), para este caso, el método convencional fue modificado para tener en cuenta la presencia del flap. Una vez obtenida la sustentación, esta se transforma en fuerza normal por medio de la ecuación (8). Los resultados para las dos condiciones más críticas son presentados en las figuras 10 y 11:

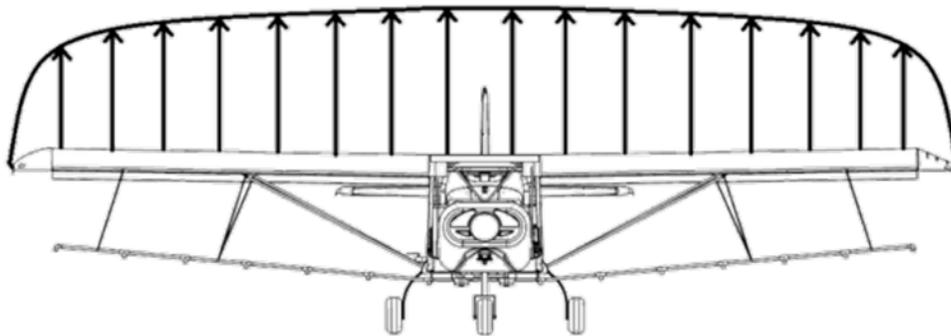


Figura 9. Distribución de la sustentación a lo largo del fuselaje

Fuente: elaboración propia.

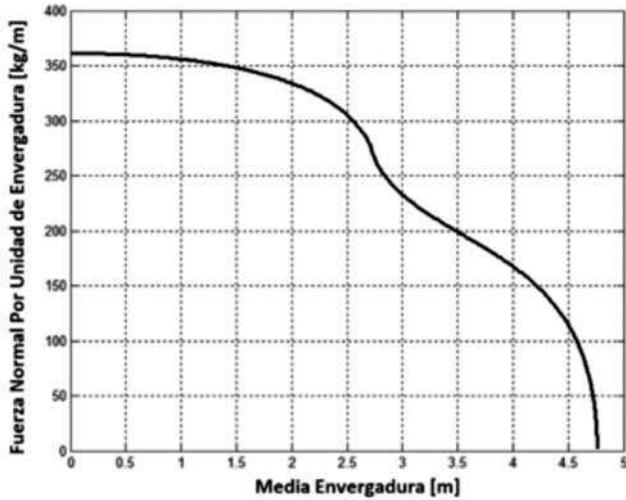


Figura 10. Distribución de fuerzas para la condición (A). ( $V = 95.9$  [mph],  $\alpha = 8.14^\circ$ ,  $\delta_f = 25^\circ$ )

Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

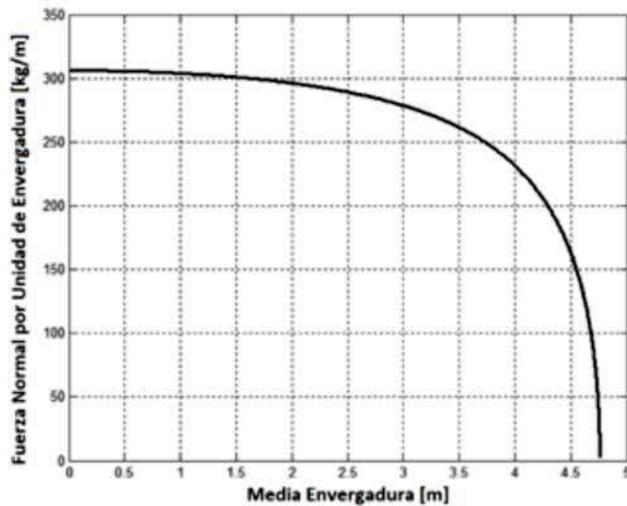


Figura 11. Distribución de fuerzas para la condición (D). ( $V = 128.8$  [mph],  $\alpha = 6.52^\circ$ ,  $\delta_f = 0^\circ$ )

Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

### Condición especial para sustentación y factor de carga negativo (*Rear Lift Truss*)

La velocidad de cálculo a la cual se debe evaluar el flujo de aire reverso que causaría un factor de carga negativo está definido en CS-VLA 369 como:

$$V = 0.65 * \sqrt{\frac{M * g}{S}} + 4.47 \quad (10)$$

Para un peso máximo de 693 kg.

$$V = 19.9 \text{ [m/s]}$$

La distribución de esta sustentación negativa se obtiene empleando el mismo código que para la distribución positiva, introduciendo como dato de entrada la velocidad calculada y probando diferentes ángulos de ataque hasta obtener el  $C_L$  negativo máximo de -0.8, de acuerdo con lo requerido en CS-VLA 369 (b).

Como se evidencia en la tabla 8, la condición más crítica para factores de carga negativo es el punto (G) del diagrama V-n, donde el ala estaría sujeta a una fuerza normal hacia abajo de 934.5 kg.

Según lo establecido en la *Advisory Circular AC 23-19A* (FAA, 2007) los struts que sostienen el ala generalmente trabajan a tensión, excepto durante maniobras con fuerzas G negativas, como vuelos invertidos o ráfagas de viento descendentes, en estos casos, los struts trabajan a compresión y pueden estar sujetos al fenómeno de columna de Euler; razón por la cual, pese a que en ningún momento el WA500-AG le es permitido vuelo invertido, es importante considerar esta condición (ver figura 12).

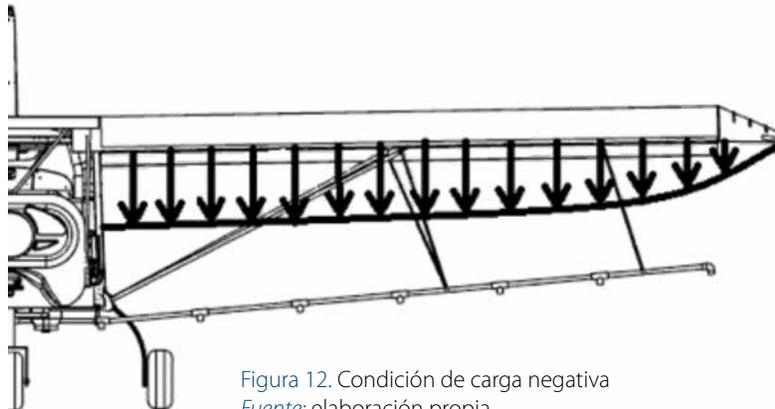


Figura 12. Condición de carga negativa  
Fuente: elaboración propia.



La distribución de carga negativa se grafica tanto para la condición (G) como para condición la especial de Rear Lift Truss, con el objetivo de compararlas e identificar el caso más crítico (figura 13):

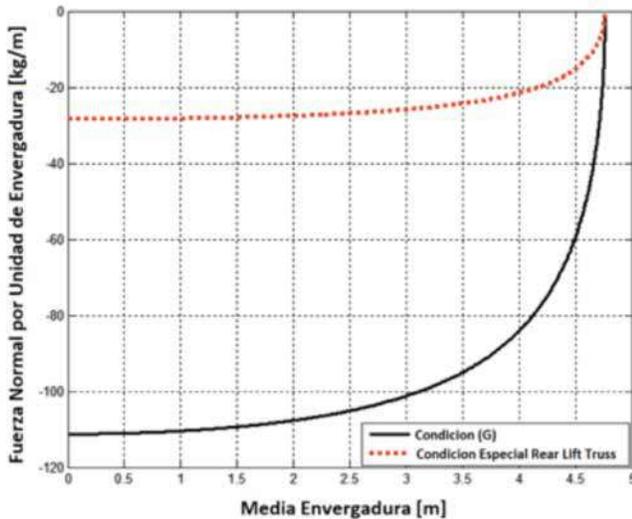


Figura 13. Distribución de cargas negativas a lo largo de la envergadura

Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

Como se observa, la condición más crítica para carga negativa sería la condición (G) del diagrama V-n.

### Cargas asimétricas

Los requerimientos de cargas asimétricas son evaluados de acuerdo con lo establecido en la norma: numerales CS-VLA 347, 349 y 455. El ala en sí, solo es afectada asimétricamente en los movimientos de alabeo (roll) que resultan de aplicar alerones.

Aquellas condiciones de alabeo que se deben considerar para el estudio, según lo requerido son:

Dos tercios del máximo factor de carga positivo en combinación con:

- Deflexión máxima de alerón a velocidad  $V_a$ .
- Deflexión suficiente de alerón a  $V_c$ , tal que se alcance una tasa de alabeo igual a la obtenida en (a).
- Deflexión suficiente de alerón a  $V_d$ , tal que se alcance una tasa de alabeo no menor a 1/3 de la obtenida en (a).

Las condiciones de la aeronave volando a velocidad  $V_a$  se encuentran en la tabla 8, y la tasa de alabeo estable

se determina por medio de la siguiente expresión (Gudmundsson, 2011):

$$\frac{p * b}{2 * V} = - \frac{C_{l_{\delta a}}}{C_{l_p}} * \delta_a \quad (11)$$

Siendo:

- $p$  = Tasa de alabeo [deg/s]
- $b$  = Envergadura [m]
- $V$  = Velocidad [m/s]
- $C_{l_{\delta a}}$  = Coeficiente de amortiguación de alabeo
- $C_{l_p}$  = Coeficiente de poder de alabeo
- $\delta_a$  = Deflexión del alerón [deg]

Los coeficientes de amortiguación y de poder de alabeo se calculan para un ala rectangular por medio de:

$$C_{l_{\delta a}} = \frac{c_{l_{\delta a}} * (b_2^2 - b_1^2)}{b^2} \quad (12)$$

$$C_{l_p} = - \frac{c_{l_\alpha} + c_{d_\alpha}}{6} \quad (13)$$

Donde los correspondientes términos de cada ecuación son (WACSA S.A.S, 2015):

- $c_{l_{\delta a}}$  = Coeficiente de incremento de sustentación debido a la deflexión del alerón = 3.45 [Rad<sup>-1</sup>].
- $c_{l_\alpha}$  = Pendiente curva de sustentación de la sección = 6.646 [Rad<sup>-1</sup>].
- $c_{d_\alpha}$  = Coeficiente de arrastre a cero sustentación = 0.00725.
- $b_1^2$  = Posición del borde interno del alerón desde la raíz del ala = 2.74 [m].
- $b_2^2$  = Posición del borde externo del alerón desde la raíz del ala = 4.38 [m].

Con lo cual, volando a  $V_a$  (42.88 m/s) y aplicando full alerón ( $\delta = 15^\circ$ ), la tasa de alabeo de la aeronave sería aproximadamente:

$$p = 54.1 \left[ \frac{deg}{s} \right]$$

Manteniendo este valor para  $p$ , se resuelve la ecuación (11) para la deflexión de alerón necesaria en cada una de las condiciones faltantes (tabla 9):

Tabla 9.  
Condiciones de carga asimétrica

CONDICIÓN	Velocidad [m/s]	Deflexión de alerón [deg]	Tasa de alabeo [deg/s]
Full deflexión a $V_a$	42.88	15°	54.1
Alabeo a $V_c$	46.08	13.9°	54.1
Alabeo a $V_d$	57.6	11.2°	18

Fuente: elaboración propia.

Las distribuciones de fuerza a lo largo de la envergadura para las condiciones asimétricas son graficadas y contrastadas con las condiciones más críticas del diagrama V-n (figura 10 y figura 11). Se observa que ninguna de las condiciones de carga asimétricas es más crítica que las de la envolvente de vuelo, luego, para propósitos de prueba estructural estática, la condición simulada para maniobra positiva es la (A) (figura 14):

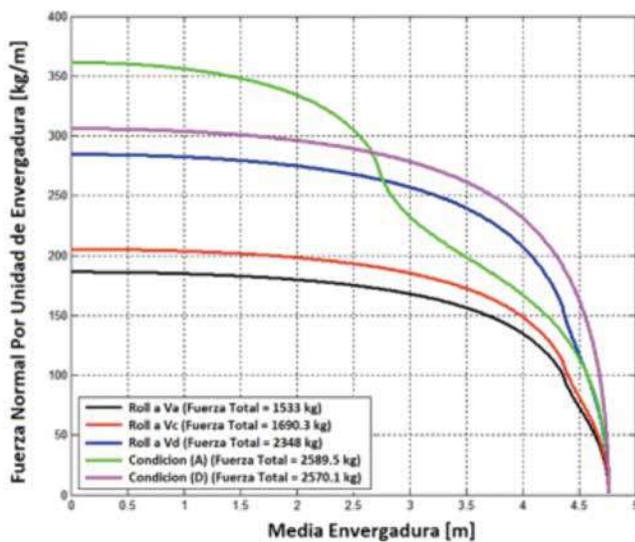
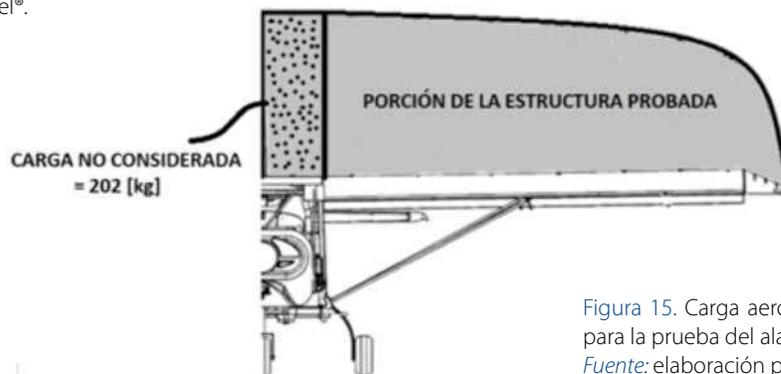


Figura 14. Comparación de las diferentes condiciones de alabeo con los puntos más críticos del diagrama V-n

Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.



## Pruebas estructurales

### Requerimientos

Todos los anteriores valores corresponden a cargas límites, es decir, aquellas cargas máximas a las que estaría sometida la aeronave en condiciones normales de operación. En aeronáutica se define además la carga última, la cual es la límite multiplicada por un factor de seguridad, que para el caso de la norma CS-VLA está establecido en un valor igual a 1.5.

La normativa en su numeral CS-VLA 305 requiere que:

- La estructura debe ser capaz de soportar las cargas límites sin presentar detrimento ni deformaciones permanentes.
- La estructura deber ser capaz de soportar sin fallas las cargas últimas por al menos tres segundos.

El espécimen de prueba (ala) es sometido a las dos condiciones más críticas identificadas para cargas positiva y negativa de la envolvente de vuelo, que son, respectivamente: punto (A) y punto (G), como se aprecia en la tabla 10.

Tabla 10.  
Valores de carga preliminares para prueba estructural

Condición	Carga total [kg]	Carga por ala (límite) [kg]	Factor de seguridad	Carga última [kg]
(A)	2589.5	1294.7	1.5	1942
(G)	-934.5	467.2	1.5	700.1

Fuente: elaboración propia.

### Cargas no consideradas

Por la forma constructiva del montaje, existe una fracción de la fuerza que no se toma en cuenta al momento de cargar la estructura.

Por un lado, la porción de la sustentación generada por el fuselaje, que para la condición (A) equivale aproximadamente a 202 kg y 62 kg para la condición (G) (figura 15).

Figura 15. Carga aerodinámica sobre el fuselaje no considerada para la prueba del ala

Fuente: elaboración propia.



Por otra parte, la estructura del ala pesa aproximadamente 20 kg; ya que la misma se prueba en posición invertida (figura 18 a), este valor debe sustraerse a la carga total, pues el peso es una fuerza contraria a la sustentación. La misma consideración se tiene con el peso de las placas de madera utilizadas como apoyo para las bolsas de arena (31 kg). Con todo lo anterior, la carga total empleada en la prueba es la que se presenta en la tabla 11.

Tabla 11.  
Valores de carga finales para prueba estructural

Condición	Carga límite [kg]	Carga última [kg]
(A)	1042	1563
(G)	405	607.5

Fuente: elaboración propia.

### Distribución de pesos a lo largo de la envergadura

Las curvas de distribución de sustentación de la figura 10 y 13 son aproximadas a secciones rectangulares, que en el espécimen de prueba representa siete secciones en las cuales está dividida el ala, como se muestra en el figura 16 y 17:

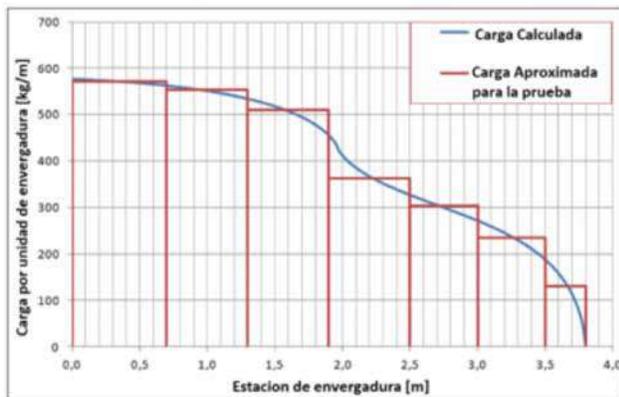


Figura 16. Distribución de carga última para maniobra positiva  
Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

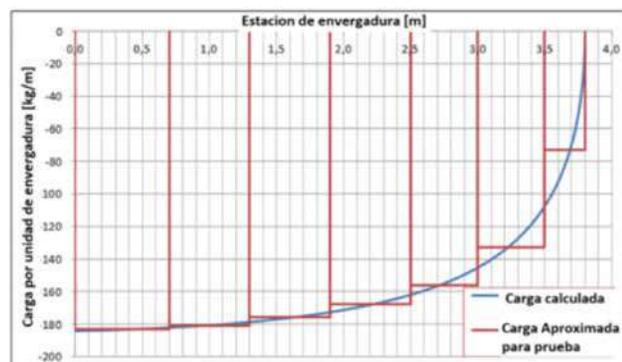
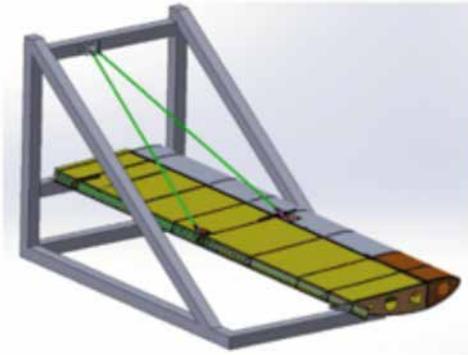


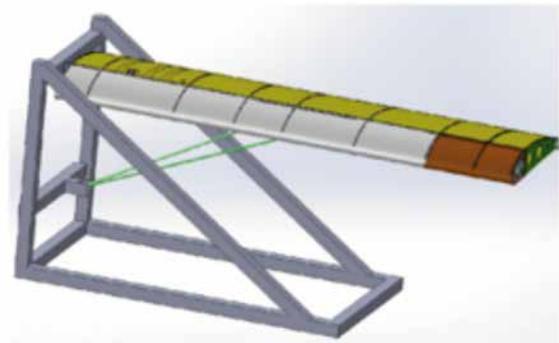
Figura 17. Distribución de carga última para maniobra negativa  
Fuente: elaboración propia por medio de las herramientas Matlab® y Excel®.

### Montaje

Para evaluar las dos condiciones más críticas, se diseña un banco de pruebas sobre el cual es ensamblada el ala, la cual, a su vez, es una copia exacta de la estructura instalada en la aeronave final (figura 18).



(a)



(b)

Figura 18. Ilustración del montaje de pruebas. (a) Para carga positiva, (b) para carga negativa

Fuente: elaboración propia.

### Descripción del procedimiento

La carga es simulada por medio de bolsas de arena de 10, 12, 20 y 24 kg, identificadas por colores amarillo, rojo, azul y verde, respectivamente. La semiala es cubierta con paneles de madera sobre los cuales se apoyan las bolsas, esto con el fin de evitar arrugar la piel y falsear los resultados de las vigas. Se utilizan varios paneles en lugar de un solo bloque para permitir que la estructura se flexione como lo haría en vuelo. Mientras se posicionan las bolsas de arena, el ala es sostenida por medio de un gato mecánico.

Inicialmente, el ala es cargada y descargada a la mitad de la carga límite, con el fin de permitir el asentamiento de la estructura, que al ser nueva puede presentar pequeñas holguras que confundirían las mediciones de desplazamiento.

Después del asentamiento, se define la referencia cero a partir de la cual se toman las mediciones (figura 19).

Se somete el ala a carga límite, se descarga y se registra cualquier deformación permanente.

Finalmente, se somete la estructura a la carga última por los tres segundos requeridos por norma, y se verifica que no colapse en este lapso de tiempo.

Estos procedimientos se llevan a cabo para ambas condiciones simuladas, esto es, maniobra negativa y positiva (figuras 20 y 21).



Figura 19. Método real de medición de las deflexiones  
*Fuente:* elaboración propia.



Figura 20. Montaje para carga de maniobra negativa  
*Fuente:* elaboración propia.



Figura 21. Montaje para carga de maniobra positiva  
*Fuente:* elaboración propia.

## Resultados

### Maniobra negativa. Carga límite

Después de aplicar la carga de asentamiento y tomar la referencia cero, la estructura es cargada hasta la condición límite, el gato mecánico bajado y la deflexión registrada. La deformación (imperceptible a la vista) fue de solo 2 mm. Valor despreciable que no representa una amenaza para la integridad estructural (figura 22).



Figura 22. Carga límite negativa (406 kg = -1.5 G)  
*Fuente:* elaboración propia.



### Carga última

La carga última es aplicada, y a medida que el gato mecánico es bajado se nota un fenómeno de pandeo (buckling) en los struts, lo cual obliga a detener la prueba (figura 23).



(a)



(b)

Figura 23. (a) Comienzo de la prueba a carga última. (b) Pandeo de los struts

Fuente: elaboración propia.

La prueba a carga última se considera fallida, y se toma como acción correctiva la instalación de elementos denominados *Jury Struts*, con el objetivo de brindar más rigidez a los *struts* (figura 24).



Figura 24. Instalación de *Jury Struts*

Fuente: elaboración propia.

La prueba a carga última es repetida y la estructura soporta sin problemas por más de tres segundos, de acuerdo con lo requerido (figura 25).



Figura 25. Carga última negativa (612 kg = -2.25 G)

Fuente: elaboración propia.

### Maniobra positiva

En una primera sesión, el ala demuestra soportar la carga límite presentando una deformación de solo 3 mm. Al momento de aplicar la carga última y antes de contabilizar tres segundos, el punto de conexión del strut al ala colapsa, considerándose entonces una prueba fallida (figuras 26 y 27).



Figura 26. Aplicación de carga última positiva  
Fuente: elaboración propia.

Después de analizar el elemento colapsado y sopesado las posibles causas de fallo, la pieza se rediseña alineando los agujeros y aumentando las distancias a los bordes, como se ilustra en la figura 28.

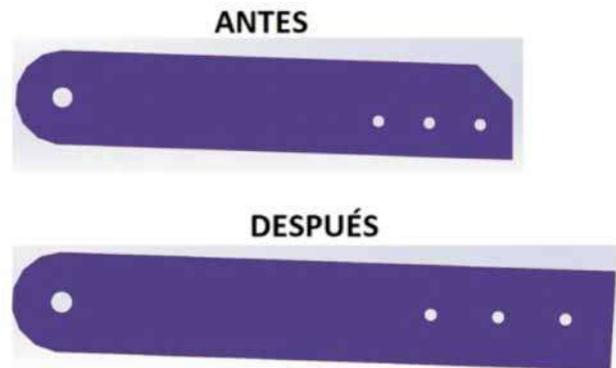


Figura 28. Modificación de la pieza fallida  
Fuente: elaboración propia.

Igualmente, otras zonas del ala son modificadas mediante refuerzos en L, y aumentando el número de costillas en la zona del tanque de combustible (figuras 29, 30 y 31).



Figura 27. Elemento fallido bajo carga última: conexión entre el strut y el ala  
Fuente: elaboración propia.

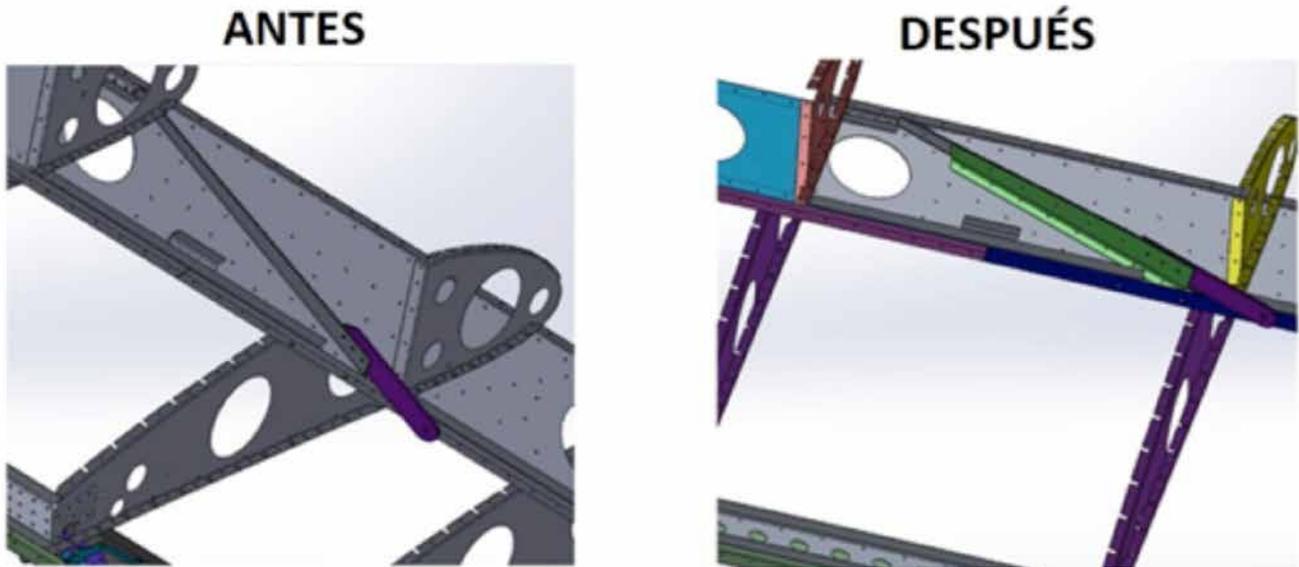


Figura 29. Refuerzo en la zona central del ala  
Fuente: elaboración propia.

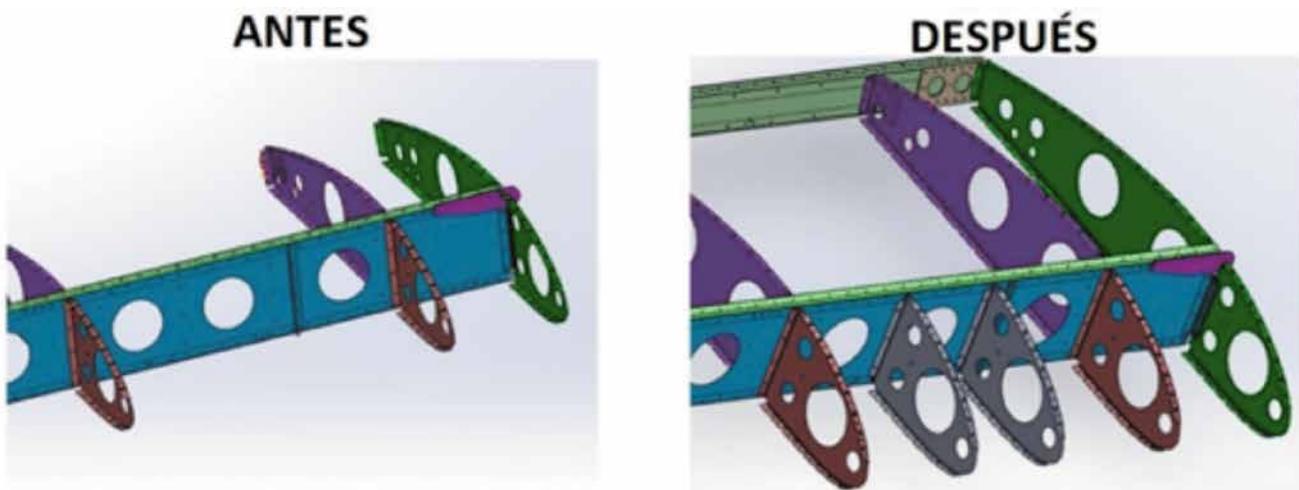


Figura 30. Aumento del número de costillas en la zona del tanque de combustible  
Fuente: elaboración propia.



Figura 31. Fotografía de las piezas modificadas  
Fuente: elaboración propia.



Figura 32. Carga límite positiva (1075 kg = 3.8 G)  
Fuente: elaboración propia.



Figura 33. Carga última positiva (1597 kg = 5.7 G)  
Fuente: elaboración propia.

Una vez hechas las mejoras, en una segunda sesión se somete nuevamente la estructura a carga límite presentando una deformación de solo 4 mm (Figura 32).

Finalmente, la estructura también demuestra soportar la carga última por varios segundos sin colapsar, de acuerdo con lo requerido en la norma (figura 33).

## Conclusiones

En este reporte de caso se ilustra parte del trabajo de certificación de la aeronave colombiana WA500-AG, particularmente del ala. Todo el proceso de análisis de cargas y pruebas estructurales conllevaron a resultados satisfactorios, donde la estructura presentó deformaciones despreciables y en los casos de carga última donde hubo falla, se identificaron las causas, se implementaron mejoras, se repitieron las pruebas y se mostró conformidad con la normativa. El rediseño de las piezas e instalación de *Jury Struts* son

permitidas desde un punto de vista legal, ya que el diseño de la aeronave es propio, es decir, no son requeridas asesorías ni autorizaciones de fabricantes externos. Con esto, el presente artículo pretende demostrar las capacidades aeronáuticas de nuestro país, que no se limitan solamente a la fabricación de piezas o al ensamble y modificación de aeronaves extranjeras, sino que estamos capacitados para llevar a cabo todo un proceso de diseño, fabricación, y –re-cientemente– certificación de productos aeronáuticos nacionales.

Este artículo solo muestra parte del proceso de certificación, pero es importante destacar que estudios y pruebas semejantes se han elaborado para el estabilizador horizontal, vertical, bancada de motor, tren de aterrizaje, puntos de anclaje de sillas y cinturones de seguridad, superficies de control y tanques de combustible. Todos y cada uno auditados y en presencia de personal de la Aeronáutica Civil Colombiana (figura 35).



## Referencias

Aerocivil. (2012). *Reglamentos Aeronauticos Colombianos - RAC 26*. Colombia: Unidad Administrativa Especial de Aeronautica Civil.

Anderson, J. (1999). *Aircraft Performance and Design*. U.S.A: McGraw-Hill.

EASA. (2009). *Certification Specifications For Very Light Aeroplanes, CS-VLA Book 1*. European Aviation Safety Agency.

FAA. (2007). *AC n.º: 23-19A - Airframe Guide For Certification of Part 23 Airplanes*. U.S.A: U.S. Federal Aviation Administration.

Gudmundsson, S. (2011). *Aircraft Preliminary Handbook*. Dayton Beach, Florida: Embry-Riddle Aeronautical University.

Megson, T. (2007). *Aircrafts Structures for Engineering Students*, (4 ed.). Jordan Hill, Oxford: Elsevier Aerospace Engineering Series.

OACI. (2010). *Anexo 8 al convenio sobre aviación civilInternacional: aeronavegabilidad*. Montreal, Canada: Organización de Aviación Civil Internacional.

WACSA S. A. S. (2015). *WA500-AG Aerodynamic Data Determination*. Unpublished. Cali, Colombia: World Aircraft Company South America S. A. S.



Figura 35. De izquierda a derecha: Máximo Tedesco (representante legal de WACSA S. A. S) y Jairo Sora (coordinador del grupo de certificación de productos aeronáuticos: Aeronáutica Civil Colombia)

Fuente: elaboración propia.



## DISEÑO DE UN MODELO DE TRANSFERENCIA DE LA METODOLOGÍA DE REFERENCIA DE OPERACIONES PARA CADENA DE SUMINISTRO (SCOR) PARA LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA<sup>1</sup>

DESIGN OF A TRANSFER MODEL OF THE SUPPLY CHAIN OPERATIONS REFERENCE (SCOR) MODEL TO THE COLOMBIAN AIR FORCE<sup>2</sup>

PROJETO DE UM MODELO DE TRANSFERÊNCIA DA METODOLOGIA DE REFERÊNCIA DE OPERAÇÕES PARA CADEIA DE SUPRIMENTO (SCOR) PARA A FORÇA AÉREA COLOMBIANA<sup>3</sup>

Elvin Perea Lemos<sup>4</sup>

Pedro José Sánchez Caimán<sup>5</sup>

Fuerza Aérea Colombiana y Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

---

### CIENCIA Y PODER AÉREO

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-9468 / Volumen 13 / Número 2 / julio-diciembre de 2018/ Colombia /pp. 46-66

Recibido: 15/07/2018

Aprobado por evaluador: 08/09/2018

Doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.601



**Para citar este artículo:**

Perea, E. y Sánchez, P. J. (2018). Diseño de un modelo de transferencia de la metodología de referencia de operaciones para cadena de suministro (SCOR) para la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(2), 46-66. doi:

<sup>1</sup> Artículo original. Reporte de caso, que recoge los resultados del trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en Gestión de Organizaciones.

<sup>2</sup> Original article. Case report, which includes the results of the degree work presented as a partial requirement to apply for the Master's degree in Organization Management.

<sup>3</sup> Artigo original. Relato de caso, que inclui os resultados do trabalho de graduação apresentado como requisito parcial para se candidatar ao mestrado em Gestão de Organizações.

<sup>4</sup> Administrador Aeronáutico. Magister en Seguridad y Defensa Nacional de Escuela Superior de Guerra. Bogotá, Colombia. Magister en Gestión de Organizaciones de la Universidad Central. Bogotá, Colombia. Comandante Grupo Técnico. Comando Aéreo de Combate N.º 5 de la Fuerza Aérea Colombiana. ORCID: 0000-0001-9026-8171 Correo electrónico: elvinperea173@gmail.com

<sup>5</sup> Ingeniero Industrial. Candidato a PHD en Ingeniería y Magister en Logística de la Universidad Nacional del Cuyo, Argentina. Director del Programa de Ingeniería Industrial de la Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. ORCID: 0000-0001-5719-7164. Correo electrónico: pedro.sanchez@unimilitar.edu.co; persaint2004@yahoo.com

**Resumen:** La logística aeronáutica juega un papel fundamental en el desarrollo de las operaciones aéreas de la Fuerza Aérea Colombiana, en razón a que debe proveer la aeronaves y equipo aéreo asociado para el cumplimiento de la misión institucional. De tal modo que, el objetivo de este trabajo es plantear una propuesta mejora al desempeño de la cadena de suministro, como un factor determinante para el alistamiento de las aeronaves, mediante el Diseño de un Modelo de Transferencia de la Metodología de Referencia de Operaciones para Cadena de Suministro (SCOR), a través de cuatro fases metodológicas: análisis preliminar, diagnóstico situacional, desarrollo y cierre; las cuales permitieron diseñar una propuesta conforme a las necesidades de la organización para el desarrollo de las operaciones aéreas en todo el territorio nacional, teniendo en cuenta los resultados encontrados, conclusiones y recomendaciones a considerar por parte de la institución.

**Palabras Claves:** cadena suministro, Logística, Modelo SCOR, Operaciones aéreas.

**Abstract:** The aeronautics logistics has an important role in the Colombian Air Force to development of the air operations, owed to the fact that it must provide the aircraft and associated air equipment to the fulfillment of the institutional mission. Thus, the general objective of this work is to set a proposal to improve the performance of the supply chain, as an essential aspect to get the aircrafts ready, through a design of model Transfer Reference Methodology for Supply Chain Operations (SCOR) for the Colombian Air Force (FAC) by four methodological phases: preliminary analysis, situational diagnosis, development and closure, which allowed to get a proposal according to organization request for the development of air operations in the national territory, taking into account the results found, conclusions and recommendation to be considered by the institution.

**Keywords:** Supply Chain, Logistics, SCOR model, Air operations.

**Resumo:** A logística aeronáutica desempenha um papel fundamental no desenvolvimento das operações aéreas da Força Aérea Colombiana, pois deve fornecer as aeronaves e equipamentos aéreos associados para o cumprimento da missão institucional. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é propor uma proposta de melhoria do desempenho da cadeia de suprimentos, como fator determinante para a prontidão das aeronaves, através do Modelo de Transferência de Modelo da Metodologia de Referência de Operações para a Cadeia de Suprimentos. Fornecimento (SCOR) através de quatro fases metodológicas: análise preliminar, diagnóstico situacional, desenvolvimento e fechamento, que permitiu elaborar uma proposta de acordo com as necessidades da organização para o desenvolvimento de operações aéreas em todo o território nacional, levando em consideração os resultados encontrados, conclusões e recomendações a serem consideradas pela instituição.

**Palavras-chave:** Cadeia de suprimentos, Logística, Modelo SCOR, Operações aéreas.

## Introducción

La Fuerza Aérea Colombiana tiene la misión constitucional de garantizar la soberanía e interdependencia del espacio aéreo, así como la conducción de operaciones aéreas para contribuir en logro del objetivo de Seguridad y Defensa de la Nación. De este modo, el proceso misional de operaciones aéreas se soporta en la gestión logística aeronáutica como factor estratégico para el cumplimiento de la razón de ser de la organización. De ahí que diseñar un modelo de transferencia de metodología de referencia de operaciones para cadena de suministro (SCOR) para la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), está orientado a identificar y brindar solución a una problemática de la gestión logística aeronáutica de organización como factor determinante en el cumplimiento de la misión institucional (Universidad Central, 2015).

De este modo el trabajo define la problemática actual de la gestión logística aeronáutica de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) en su cadena de suministro, como una necesidad de mejorar el nivel de alistamiento de la aeronaves, incrementar consumo de material solicitados en plan anual de soporte logístico (PASL), disminuir el número de solicitudes de material imprevisto, así como el valor de crecimiento de los almacenes aeronáuticos y reparables como una necesidad de solucionar los problemas que afectan su cadena de suministros.

El diseño de transferencia de la metodología SCOR para la Fuerza Aérea Colombiana, específicamente a la gestión logística aeronáutica de la institución como responsable de proveer las aeronaves que requiere el cliente interno (operaciones aéreas), surge como una necesidad plantear una alternativa solución a la problemática de su cadena de suministro en aspectos de planeación, gestión de materiales e incidencia en el mantenimiento aeronáutico, los cuales afectan de manera directa la disponibilidad de las aeronaves para el desarrollo de las operaciones aéreas en cumplimiento de la razón de ser de la organización.

## Fases de la investigación

La investigación se desarrolló teniendo en cuenta las siguientes fases metodológicas: análisis preliminar, diagnóstico, desarrollo y cierre. A fin de lograr plantear una propuesta de mejora para cadena de suministros de la institución.

### 1. Análisis preliminar

Mediante una revisión de la bibliografía de interés al tema de estudio se logró contextualizar la organización del sistema logístico aeronáutico de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), a fin de entender el funcionamiento de la cadena de suministros de la organización. De tal manera, se

identificaron varios modelos relacionados con el tema investigación, lográndose profundizar en los modelos para cadenas de suministro de flujo de inventarios, mejoramiento total estudiados por la doctora Urquiaga (1999) citado por Gómez (2006) en la tesis doctoral en ciencias técnicas del desarrollo de organizaciones, y el modelo SCOR desarrollado por el Supply Chain Council como herramienta de gestión de la cadena de suministros, con reconocimiento y aprobación mundial por organizaciones de excelencia logística (Georgise, Thoben, & Seifert, 2012; Lama & Esteban, 2005; Lockamy III & McCormack, 2004). Los cuales se explican a continuación:

**Modelo de flujo de inventarios:** de acuerdo con Urquiaga (1999) citado por Gómez (2006). El modelo fue desarrollado por Hughes en los años 70 como un instrumento de apoyo estratégico en la administración de la cadena de suministro, a fin de establecer relaciones logísticas entre suministradores y clientes. Este contempla cinco pasos: consolidación de la información, análisis de tiempos de entrega acumulada, mostrar la información de dinero, estudio del proceso y detalles adicionales. Estos pasos permiten cuantificar el nivel de inventario ideal necesario ofreciendo beneficios de disminución, ahorro en costos de transporte, así como la reducción de los inventarios de riesgosos.

Este tipo de modelo puede ayudar a establecer una revisión periódica del inventario, teniendo presente cuándo y cuánto pedir, ya que el sistema se basa en ordenar las cantidades requeridas una vez se llegue al punto de reorden, el cual está determinado por las variables de demanda. Sin embargo, su técnica varía dependiendo del tipo de producto y el ambiente de producción debido a su orientación matemática. Este tipo de modelo requiere especial atención en caso de que la demanda sea variable (Gutiérrez y Vidal, 2008; Sarkar, 2013).

**Modelos de mejoramiento total:** son metodologías en las cuales se plantea una teoría de restricciones que reconoce dos aspectos claves de las organizaciones, la primera es la estructura jerárquica piramidal, la cual considera la presencia de inconvenientes en la cadena de suministro cuando los mandos intermedios tratan de buscar la adecuada y local configuración en la organización como una alternativa a los problemas que se le presentan. Las limitaciones del sistema logístico estarán establecidas por aquellos eslabones más frágiles de la cadena, para lo cual los gerentes deben dirigir los esfuerzos a la solución de los problemas que estos presentan, de tal forma que no afecten el logro de los objetivos organizacionales. La segunda es que el esfuerzo de sincronización debe permitir la integración de los diferentes procesos de la organización a fin de evitar que una decisión aislada de una área funcional pueda afectar el cumplimiento



de los objetivos de la compañía, conforme con Urquiaga (1999) citado por Gómez (2006).

**Modelo de referencia de operaciones de la cadena de abastecimientos – SCOR:** es una herramienta para presentar, analizar y configurar cadenas de suministros, desarrollado en 1996 por el consejo de la cadena de suministro Supply-Chain Council, con el objetivo de proporcionar un marco único que une los procesos de negocio, los indicadores de gestión, las mejores prácticas y la tecnología para apoyar la comunicación entre los diferentes actores del proceso logístico y de esta forma mejorar la eficacia en la gestión logística de la cadena de suministro (Ganji, Shaharoun, & Norehan, 2015; Georgise, Thoben, & Seifert, 2012; Georgise, Thoben, & Seifert, 2013; Lama & Esteban, 2005; Lockamy III & McCormack, 2004). De acuerdo con Georgise, et al. (2012) el modelo SCOR es utilizado por el Departamento de Estado (DoD) de USA y La Fuerza de Defensa Nacional de Sudáfrica (SANDF). Del mismo modo, en el sector privado es utilizado por algunas compañías **como:** Mead Johnson Nutritionals, AT&T Electronic Consumer Products Division, AT&T Fixed Wireless Service, Dow Corning Corporation, Merck & Co, Alcatel USA, Alcatel Carrier Division, Unilever, Borden Chemical, AEP Industries Inc., AVON Cosmetics, New Zealand Dairy Board (Lama & Esteban, 2005).

El modelo está organizado en cinco factores claves de la gestión logística que permite describir las actividades del negocio para satisfacer las necesidades del cliente: planificación, aprovisionamiento, manufactura, distribución y devolución (Bean, Schmitz, & Engelbrecht, 2009; Hubert, 2014; Kasi, 2005; Lama & Esteban, 2005; Lambert, García-Dastugue, & Croxton, 2005; Lockamy III & McCormack, 2004; Stephens, 2001; Zhou, Benton, Schilling, & Milligan, 2011).

El modelo SCOR abarca todas las interacciones con los clientes (desde que se genera un pedido hasta su pago), todas las transacciones de materiales (desde los proveedores hasta los clientes incluyendo equipos suministros repuestos, software etc.) y todas la interacciones del mercado (desde la demanda agregada hasta el cumplimiento de cada pedido) este modelo no incluye recurso humanos (Kasi, 2005; Lama & Esteban, 2005). SCOR domina cuatro niveles de detalle de los procesos: nivel superior (tipologías de proceso), nivel de configuración (categorías de procesos), nivel de elemento (disgregación de los procesos) y nivel de implementación (descripción de las actividades del proceso). El análisis de estos nivel permite a la organización establecer indicadores con atributos de rendimiento en flexibilidad, fiabilidad, velocidad, costos y activos (Lama & Esteban, 2005; Lockamy III & McCormack, 2004; Palma, 2014; Zhou, et al., 2011).

## 2. Diagnóstico situacional

Esta fase permitió identificar la problemática actual que afecta la cadena de suministro de la logística de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), mediante una triangulación desde la perspectiva del cliente interno (operaciones aéreas), personal que trabaja en la logística aeronáutica de la institución y el directivo de la Jefatura de Operaciones Logística (Dutton, Fahey, & Narayanan, 1983; Heagney, 2011; Westland, 2007); mediante una encuesta al personal del área logística y de operaciones aéreas, así como cinco entrevistas a directivos de mencionado procesos y una revisión de los indicadores de gestión relacionados con el área logística aeronáutica de la organización.

La Fuerza Aérea Colombiana (FAC) tiene como misión constitucional la de “ejercer y mantener el dominio del espacio aéreo y conducir operaciones aéreas para la defensa de la soberanía, la independencia, la integridad del territorio nacional, el orden constitucional y el logro de los fines del Estado” (Fuerza Aérea Colombiana, 2005, p. 51; López, 2004). Para el cumplimiento de su razón de ser, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) posee como proceso misional las operaciones aéreas (JOA) (Gutierrez, Eduardo, y Calderon, 2007). JOA trabaja bajo el concepto de eficacia operacional, soportado en el proceso de gestión logística aeronáutica (JOL), que orienta sus esfuerzos a través de su cadena de suministros mediante el concepto de alistamiento para dar cumplimiento con el Despliegue Operacional (Fuerza Aérea Colombiana, 2010), como factor fundamental para el cumplimiento de la misión organizacional, el cual está definido como la distribución estratégica de las aeronaves en determinados puntos de la geografía nacional para el desarrollo de misiones aéreas, de acuerdo con el plan estratégico institucional (Fuerza Aerea Colombiana, 2011).

En la actualidad el despliegue operacional de la Fuerza Aérea Colombiana presenta aspectos por mejorar en cuanto a la disponibilidad de medios aéreos, generado por la dificultad que tiene el proceso logístico aeronáutico a través de su cadena de suministro para proveer los materiales a las aeronaves que requiere su cliente interno (operaciones aéreas) a fin de satisfacer las necesidades operacionales en el cumplimiento de la misión institucional. Estas deficiencias conllevan a entender la necesidad de adecuar la cadena de suministros, que se adapte a las necesidades de la organización, que permita mediante una adecuada planeación el análisis de las diferentes variables y suministrar los repuestos que necesitan las aeronaves en el tiempo requerido, para poder cumplir con los programas de mantenimiento y solucionar los imprevistos propios de la operación aérea militar.

Esta situación reviste de complejidad para la Jefatura de Operaciones Logísticas debido a los procedimientos

administrativos para la adquisición de materiales, deficiencias de los proveedores, alto número de aeronaves, envejecimientos de algunas de ellas, diversidad de equipos que posee la organización, dinámica operacional militar y diversidad de factores que interactúan, teniendo en cuenta que la FAC debe garantizar una disponibilidad permanente de sus aeronaves durante todo el año.

Para garantizar disponibilidad de las aeronaves la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) planea sus requerimientos de materiales en el Plan Anual de Soporte Logístico Aeronáutico (PASL) en la vigencia Fiscal N para las vigencias fiscales N+1 y N+2. (Fuerza Aerea Colombiana, 2009). En el PASL ellos consolidan todos los requerimientos de repuestos, elementos de consumo, reparaciones, herramientas e insumos que requieren las aeronaves de la institución para volar durante la próxima vigencia, de donde en el año 2011 del material comprado se consumió el 77 %, en el 2012 el 78 % y en el 2013 el 61 % del material adquirido fue consumido (Fuerza Aérea Colombiana Direccion de Procesos Logiticos, 2015).

De este modo, se evidencia la falta de un modelo para la gestión de la cadena de suministro que se adapte a las necesidades de la organización mediante la conjugación de los diferentes factores propios de la dinámica operacional. Con estas consideraciones es importante preguntarnos ¿Cómo sería el diseño del modelo para la cadena de suministro de la Fuerza Aérea Colombiana, basados en la transferencia de la metodología SCOR, que permita responder satisfactoriamente a los requerimientos de su cliente interno, en cuanto a las aeronaves necesarias para el desarrollo de las operaciones aéreas en cumplimiento de la misión institucional?

Para determinar que el modelo SCOR se adecua a la solución la problemática de gestión de materiales de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) se realizó una comparación de las características de este modelo frente al modelo flujo de inventarios y mejoramiento total, de acuerdo con los resultados obtenidos de:

1. Encuesta aplicada al personal de pilotos, técnicos de mantenimiento, oficiales logísticos e ingenieros de las diferentes bases de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), que trabajan en las áreas de mantenimiento de aeronaves, abastecimientos aeronáuticos, comunicaciones, confiabilidad, armamento y personal de pilotos de: combate, helicópteros, transporte y entrenamiento e inteligencia, en una población estimada de 800 funcionarios, con un margen de error del 5 % y un porcentaje confianza del 95 %, a fin de validar los

problemas de mayor impacto al sistema logístico de la organización.

2. Entrevista al personal: esta actividad fue orientada a cinco directivos del proceso de logística aeronáutica y operaciones aéreas de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) que participan en la toma de decisiones en la organización a fin de ampliar la información de aspectos relevantes de la problemática que afecta la gestión logística aeronáutica de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) (Ander-Egg, 2003; Arribas, 2004). Donde se pudo obtener información estratégica de la importancia de la gestión logística de la FAC, en cuanto a planeación de las necesidades para sostener las horas de vuelos de toda la flota aérea durante un año; de mismo modo, los entrevistados reconocieron que gracias al apoyo logístico a la FAC pudo participar en varios ejercicios aéreos internacionales durante los dos últimos años. Sin embargo, se menciona la necesidad de mejorar los tiempos de aprovisionamiento, mejorar la planeación, incumplimiento de los proveedores y la forma de medir nivel de alistamiento de las aeronaves.

Revisión de indicadores de gestión: se evaluaron los indicadores de desempeño de la gestión logística referente a los años 2014, 2015 y 2016 así: nivel de alistamiento de aeronaves, consumo del programa anual de soporte logístico PASL y rotación de los almacenes (Fuerza Aerea Colombiana, 2008a, 2009); donde se obtuvo información en cuanto al nivel de alistamiento a partir del año 2010 cuando se registró un 75.11 %, en el 2011 73.65 %, luego en el 2012 72.57 %, posteriormente en 2013 71.75 % y en el 2014 un 64 %. Es de aclarar que, en el último año se presentó un cambio la forma de medición del indicador de acuerdo a la directiva 015 de 2014 (Fuerza Aérea Colombiana Seccion Planeacion JOL, 2015). El porcentaje de consumo del programa anual de soporte logístico –PASL mide el consumo del material aeronáutico solicitado por cada una de las trece bases de Fuerza Aérea Colombiana (FAC). Mencionado indicador presento un resultado de 77 % en 2011, 78 % en 2012 y 61% en 2013 (Fuerza Aérea Colombiana Direccion de Procesos Logiticos, 2015); y, en cuanto a los almacenes se presentó una disminuida rotación de los inventarios (Fuerza Aerea Colombiana, 2009).

Mediante un análisis DOFA de los resultados obtenidos en la encuesta, entrevistas y la revisión de los indicadores de gestión se pudo confirmar la aplicabilidad del modelo SCOR de acuerdo a las necesidades de la organización. Como se puede apreciar en la gráfica 1 el modelo SCOR se ubica con mayor puntaje para ofrecer solución a la problemática de la cadena de suministros de la FAC. Seguido



por los modelos la calidad total con 9 puntos y flujo de inventarios con 6 puntos; de modo que, los otros modelos estudiados solo describen la técnica de manera general para la solución de problema a acorde con la finalidad del modelo, pero carecen de elementos metodológicos que garanticen el adecuar la cadena de suministros conforme las necesidades de la FAC.

### 3. Desarrollo

En esta fase se plantea el diseño del modelo de transferencia de la metodología SCOR, de acuerdo con los tres niveles de procesos establecidos por modelo SCOR: nivel superior (tipologías de proceso), nivel de configuración (categorías de procesos) y nivel de elemento (disgregación de los procesos). Teniendo en cuenta los cinco factores claves de la gestión logística propuestos en el modelo SCOR para satisfacer las necesidades del cliente planificación,

aprovisionamiento, mantenimiento (manufactura), distribución y devolución. Por consiguiente, se plantearon nuevos indicadores de gestión para la cadena de suministros FAC, con el fin de efectuar un seguimiento a los diferentes procesos que permita tener información útil para el proceso de toma de decisiones, y la forma como se integran las actividades al interior de la cadena con el fin de satisfacer las necesidades de disponibilidad de aeronaves del cliente.

Es importante mencionar que la metodología SCOR es amplia en su análisis de la cadena de suministros; por lo tanto, algunos de los conceptos fueron adaptados la terminología propia de la Fuerza Aérea Colombiana a fin de lograr una mayor comprensión. De ahí, que los aspectos que se plantearon a continuación son los que se consideran necesarios para la FAC, teniendo en cuenta la misión de la organización.

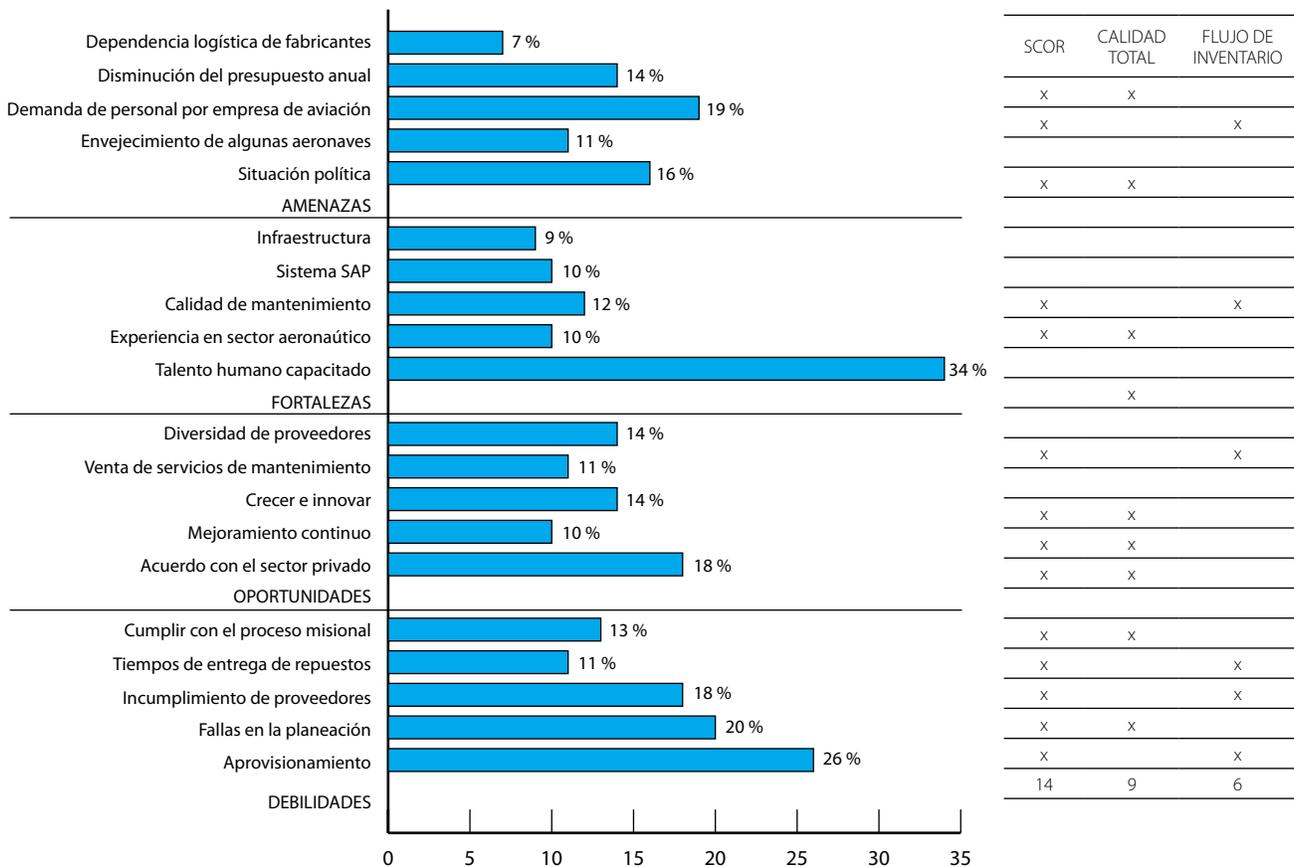


Figura 1 Aplicabilidad del modelo  
Fuente: elaboración propia de acuerdo encuesta del 30 agosto de 2014.

### 3.1 Nivel-1 alcance y contenido de la cadena de suministros de la FAC

El alcance de la cadena suministros de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) está determinado por el mapa de procesos de organización, donde se establece como objetivo estratégico No. 13 "Desarrollar y mantener el sistema logístico" (Fuerza Aerea Colombiana, 2011, p. 52). De tal forma, que permita satisfacer las necesidades de su cliente interno, es decir operaciones aéreas para el contribuir con el cumplimiento de la misión de la organización (Fuerza Aérea Colombiana, 2010). Por tanto, las necesidades del cliente se basan en un flujo de información, materiales, retorno y presupuesto para entregar aeronaves listas, como se puede apreciar en la figura 2.

El contenido de la cadena de suministros de la FAC, de acuerdo con la metodología del modelo SCOR, está determinado por los siguientes procesos de nivel I:

**Planeación (sP):** este proceso consiste en la previsión de las actividades logísticas como adquisición, mantenimiento, presupuesto y horas de vuelos que requieren de una adecuada organización y estimación para el funcionamiento de toda la cadena de suministro. Su objetivo es prever los recursos necesarios para garantizar desarrollo de las operaciones aéreas. De modo tal, que se puedan identificar los objetivos a corto, mediano, largo plazo y los aspectos fundamentales para lograrlo en horizonte de tiempo determinado, teniendo en cuenta dinámicas del entorno organizacional y expectativas del cliente interno.

**Aprovisionamiento (sS):** consiste en la compra y adquisición de todos los insumos, repuestos y materiales nece-

sarios, que requieren las aeronaves para el desarrollo de las operaciones aéreas en cumplimiento de la misión de la organización. El proceso de adquisición se realiza mediante solicitudes de material planeado y necesidades imprevistas que se generan por parte de la base aérea donde se encuentran las aeronaves asignadas logísticamente, siguiendo los protocolos de contratación de estatal nacional y en el exterior.

**Mantenimiento (sM):** como parte de la propuesta del diseño de transferencia de la metodología SCOR se cambió el proceso de fabricación por del mantenimiento, teniendo en cuenta que la misión de la FAC es ejercer el dominio del espacio aéreo y desarrollo de operaciones aéreas. Por tanto, el proceso está más orientado a garantizar el mantenimiento de sus aeronaves para el desarrollo de operaciones aéreas, más que a la fabricación de partes. De este modo, el proceso ejecuta las actividades destinadas al alistamiento de las aeronaves, de acuerdo con los programas establecidos por los fabricantes y los eventos instituidos por la FAC como operador de las aeronaves para garantizar su perfecto funcionamiento.

**Envío o Distribución (sD):** comprende el establecimiento las actividades correspondientes al recibo y despacho de material aeronáutico requerido por cada una de la Base Aéreas para las aeronaves, donde el material se recibe para ser instalado en una aeronave o almacenado para posteriormente ser utilizado en algún evento de mantenimiento imprevisto o programado. Por otro lado, la distribución también se origina cuando se envían los elementos reparables a la exterior para algún trabajo de mantenimiento.

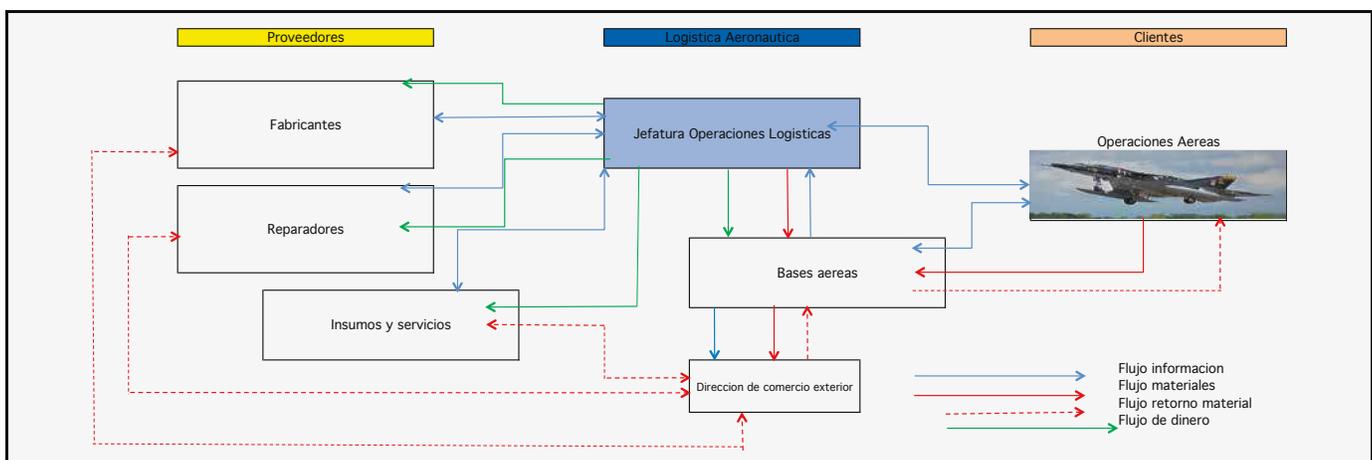


Figura 2. Alcance de cadena de suministro  
Fuente: elaboración propia de acuerdo a Rubiano & Sotelo, 2013.



**Devoluciones (sR):** se presenta cuando se retorna un componente al proveedor por garantía por presentar novedades técnicas que afectan la calidad del elemento o por estar por fuera del contrato. El proceso de devoluciones es liderado por la Agencia de Compras de la FAC en Miami-EE. UU, la Dirección de Comercio Exterior y la Dirección de Procesos Logísticos quienes coordinan con los proveedores los procesos de reclamación de garantías del material que fue adquirido por la institución y presento algún tipo de novedad para su devolución.

### 3.1.1 Indicadores de rendimiento propuestos

Teniendo en cuenta la metodología SCOR para el nivel I se plantearon los indicadores claves de rendimiento (KPI's) de

nivel estratégico para la cadena de suministro de la Fuerza Aérea Colombiana de cara al cliente y de cara a la empresa, los cuales se describen a continuación en la tabla 1.

Los indicadores planteados en el nivel 1 de la cadena de suministro de cara al cliente (operaciones aéreas), permiten hacer un seguimiento de los diferentes procesos de la cadena para obtener información estratégica que contribuya al proceso de toma de decisiones por parte de los directivos de la Jefatura de Operaciones Logísticas, por tanto se consideran de suma importancia para la gestión organizacional de la Fuerza Aérea Colombiana, a fin de visualizar si se está contribuyendo hacia el cumplimiento de la misión institucional de forma satisfactoria.

Tabla 1. Atributos de rendimiento/indicadores nivel I

	Atributos de Rendimiento	Definición de los atributos de rendimiento	Métricas de nivel 1	Calculo
De frente al cliente	Confiabilidad en el cumplimiento de la cadena de suministro	El desempeño de la cadena de suministro de la FAC en la entrega de los materiales en cuanto al: Entrega en el tiempo correcto, en cantidad solicitada, en el lugar correcto, con asl condciones de calidad solicitado, con el adecuado embalaje y con los documento de trazabilidad correctos.	Pedidos cumplidos perfectamente (RL.1.1)	Pedidos cumplidos perfectamente = (Pedidos cumplidos satisfactoriamente/Total de pedidos solicitados)x100
			Disponibilidad aeronaves (RL.1.2)	Disponibilidad aeroanves= (Numero de misiones no cumplidas por afectación logitica-mes/Total misiones programas -mes)x100
	Tiempo de respuesta de la cadena de suministro	La velocidad con que la cadena de suministro de la FAC provee los materiales para el alsitamiento de las aeronaves	Tiempo de ciclo en el cumplimiento de un pedido (RS.1.1)	Tiempo en el cumplimiento pedido imprevisto= Fecha de solicitud del pedidos- fecha de llegada de material.
De frente a la organización	Costos de la cadena de suministro	Costos asociados con las operaciones de la cadena de suministro	Costos de sostenimiento de la cadena de suministro FAC (CO.1.1)	Costos de sostenimiento= Costos laborales personal admnistrativo+costos almacenamientos + costos seguros
			Nivel consumo del programa anual de soporte logístico PASL (CO.1.2)	Nivel consumo PASL= (Pedidos cosumidos Base Aerea/Total pedidos llegados Base Aerea)x100
De frente a la organización	Activos de la cadena de suministro	La efectividad de la FAC en la administracion los activos para responder a la demanda de operaciones aereas de manera satisfactoriamente.	Inventario estrategico hipotesis de guerra (AM1.1)	Inventario estrategico = Kits de repuestos para inspeccion x horas de vuelo /Total de inspecciones
			Capital de trabajo (AM1.2)	Capital de trabajo = (Personal asignado- personal vacaciones, cusos, vuelo/Total personal logistica)x100

Fuente: elaboración propia de acuerdo al Modelo de referencia SCOR V. 10.0, (Supply – Chain Council, 2010)

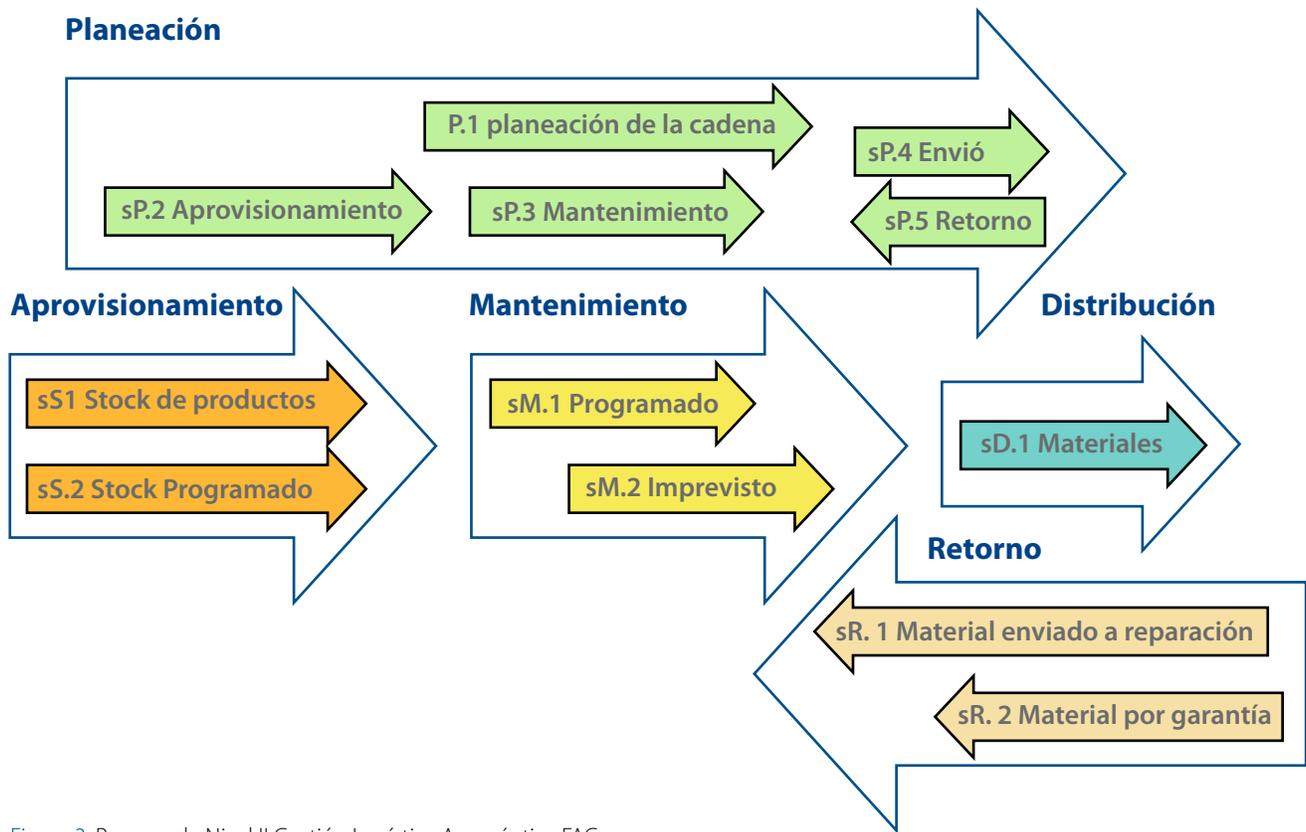


Figura 3. Proceso de Nivel II Gestión Logística Aeronáutica FAC  
Fuente: elaboración propia de acuerdo al Modelo de referencia SCOR V. 10.0, (Supply-Chain Council, 2010).

### 3.2 Nivel 2 de configuración de la cadena

#### 3.2.1 Categorías y mapa de procesos de la cadena

Teniendo en cuenta la metodología SCOR el nivel de configuración, está orientado a describir los procesos de definidos en el nivel I conforme su categoría en el estado actual, para posteriormente poder plantear la reconfiguración de la cadena de suministro como se puede apreciar en la figura 3.

Con el análisis de los conceptos establecidos en la metodología SCOR, el diagnóstico de la cadena de suministro de la FAC permitió entender la condición actual de los procesos de la cadena, derivado del mapa de la Jefatura de Operaciones Logísticas.

Se identificaron las tres fases misionales de la gestión logística aeronáutica de la Fuerza Aérea Colombiana como son: planeación y evaluación logística, gestión de materiales y gestión de mantenimiento para satisfacer las necesidades y expectativas del cliente interno.

#### 3.2.2 Mapa de geográfico

La Jefatura de operaciones logísticas aeronáuticas tiene 152 proveedores registrados para el suministro de materiales de origen exterior (Peña & Estrada, 2014), los cuales se agrupan en tres grandes grupos como se aprecia en la figura 4, fabricantes ubicados en los Estados Unidos, España, Brasil e

Israel. Del mismo modo, están los talleres reparadores de componentes aeronáuticos ubicados en Estados Unidos, Canadá y Chile. Finalmente se encuentran los intermediarios o comúnmente conocidos como Bróker ubicados principalmente en Estado unidos, Canadá y Chile. Los anteriores proveedores ubicados a nivel mundial suplen las necesidades de materiales que necesitan las aeronaves de la Fuerza Aérea Colombiana. Sin embargo, se identificó en el proceso de entrevistas y encuestas realizadas, algunas deficiencias en el aprovisionamiento por la multiplicidad de proveedores.

El mapa geográfico permite visualizar los diferentes proveedores que tiene la FAC y su ubicación, para comprender como funcionan los procesos de aprovisionamiento, distribución y retorno del material que se requiere para las aeronaves de la organización.

#### 3.2.3 Propuesta de indicadores nivel II

Teniendo como referencia los objetivos de rendimiento planteados en el nivel de cadena de suministro para la gestión logística aeronáutica de la FAC, a continuación, en la tabla 2, se presentan los indicadores propuestos para el nivel II de la cadena teniendo en cuenta la confiabilidad, velocidad, flexibilidad y adaptabilidad en los procesos de planeación, aprovisionamiento, mantenimiento de aeronaves, envío y retorno de componentes.

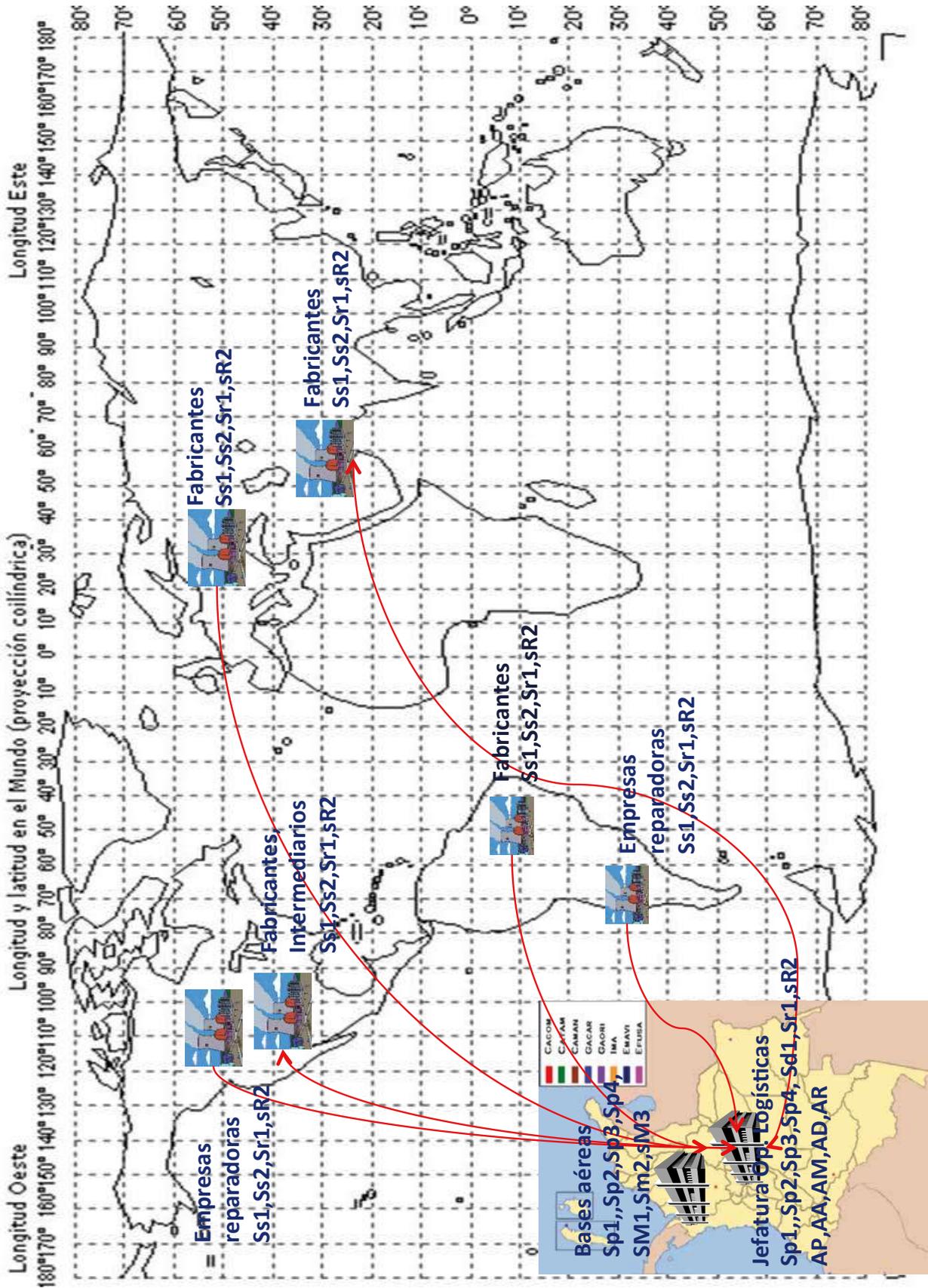


Figura 4. Mapa geográfico gestión logística aeronáutica FAC

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Indicadores propuestos nivel II

	Atributos de Rendimiento	Métricas de nivel II	Calculo
Atributos de Rendimiento	Confiabilidad en el cumplimiento de la cadena de suministro	Pedidos tramitados (RL.2.1)	$\text{Pedidos tramitados} = (\text{Pedidos tramitados} / \text{Total pedidos solicitados}) \times 100$
	Tiempo de respuesta de la cadena de suministro	Tiempo de envío de componentes (RS 2.2)	$\text{Tiempo de envío de componentes (RS 2.2)} = \text{Fecha de ubicación del material en DICEX} - \text{Fecha de ubicación del material en el taller.}$
	Flexibilidad de la cadena de suministro	Adaptabilidad en el mantenimiento de aeronaves (AG.2.1)	$\text{Adaptabilidad en el mantenimiento de aeronaves} = (\text{Numero de aeronaves adicionales} / \text{Total de aeronaves programas}) \times 100$
		Flexibilidad en reparación. (AG.2.2)	$\text{Flexibilidad en reparación} = (\text{Numero componentes Reparables recibidos} / \text{Total de componetes reparables enviados al exterior}) \times 100$
De cara a la empresa	Costos de la cadena de suministro	Costos de mantenimiento aeronave (CO.2.1)	$\text{Costos de mantenimiento aeronave} = \text{costos de materiales directos} + \text{costos laborales directos} + \text{costos indirectos relacionados el mantenimiento}$
		Costos hora de vuelo de una aeronave (CO.2.2)	$\text{Costos hora de vuelo de una aeronave} = \text{Cotos de mantenimiento} + \text{costos laborales tipulacion aeronaves} + \text{costos de combustibles}$
	Activos de la cadena de suministro	Material obsoleto (AM2.1)	$\text{Material obsoleto} = (\text{Numero de item obsoletos} / \text{Total de invenario}) \times 100$
		Rotacion de inventario (AM2.2)	$\text{Rotacion de inventario} = (\text{Valor ingresado} / \text{Valor inicial} - \text{Valor egresos}) \times 100$

Fuente: elaboración propia de acuerdo al modelo de referencia SCOR V. 10.0, (Supply – Chain Council, 2010).

### 3.3 Nivel 3 de elementos del proceso

En este nivel se realiza la descomposición de las categorías en elementos del proceso.

#### 3.3.1 Proceso planeación de la cadena de suministros.

Es el proceso mediante el cual se identifican todos los

requerimientos que se necesitan para garantizar el soporte de las operaciones aéreas de cada una de las aeronaves que tiene la Fuerza Aérea Colombiana.

A continuación, en la figura 5, se presenta la descomposición del proceso de planeación.

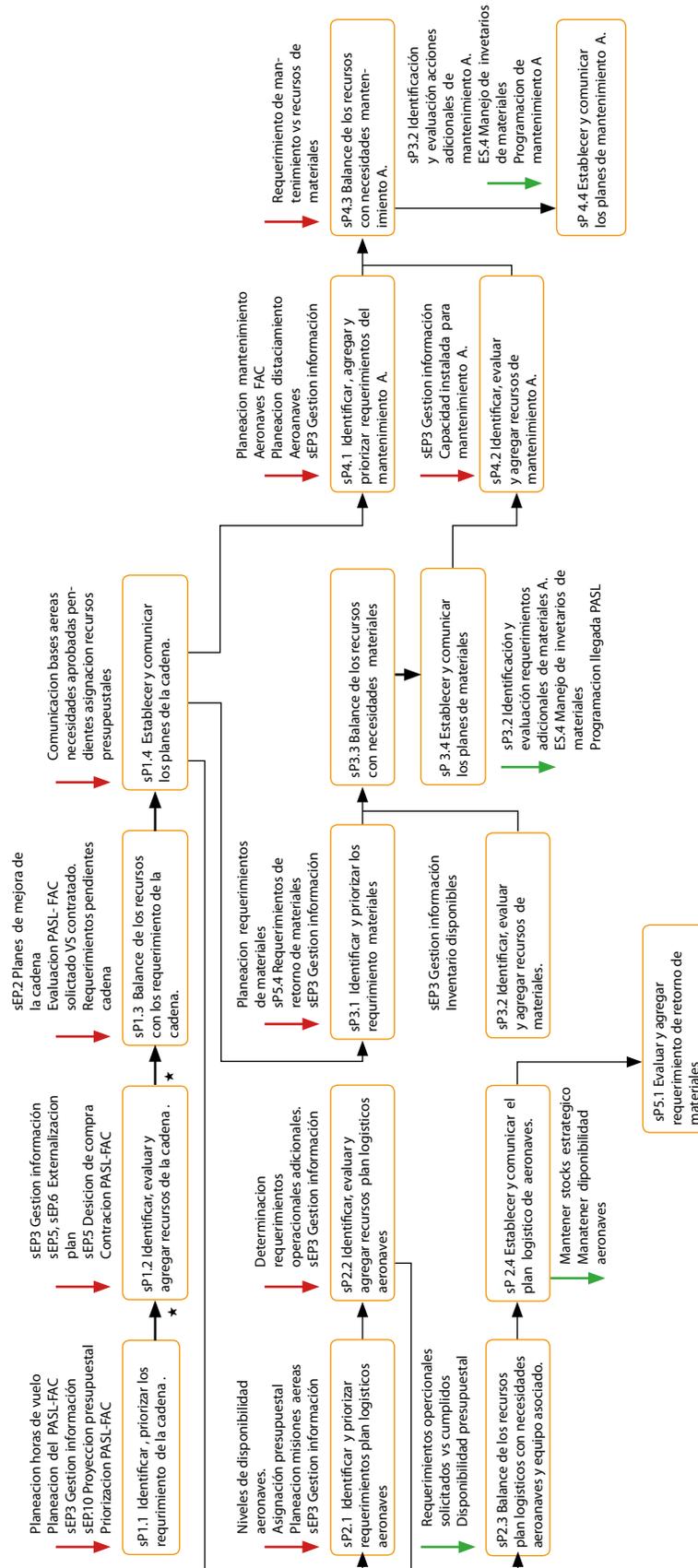


Figura 5. Descomposición propuesta proceso planeación  
Fuente: elaboración propia de acuerdo con Rubiano & Sotelo, 2013

### 3.3.2 Procesos aprovisionamiento, distribución y retorno de material

Estos procesos están orientados a garantizar el óptimo desempeño de la cadena de suministros, previendo los materiales que se necesitan para la gestión de mantenimiento imprevisto y programado, efectuando una adecuada distribución y retorno del material. Por tanto, en la figura 6, se presenta la descomposición de mencionados procesos.

#### 3.3.3. Proceso mantenimiento Aeronáutico

Este proceso tiene la responsabilidad de garantizar el óptimo desempeño de las aeronaves con los mejores estándares de calidad de acuerdo con los manuales de mantenimien-

to; por lo tanto, está orientado a la revisión, acondicionamiento, adecuación y alistamiento de las aeronaves en los tres niveles de mantenimiento: básico, intermedio y mayor. De tal forma, que mediante una adecuada programación estudio de los planes de mantenimiento de cada una de las aeronaves se pueda garantizar su disponibilidad para el cumplimiento de las operaciones aéreas, ver la figura 7.

#### 3.3.4 Categorías de indicadores propuesto nivel III

De acuerdo con la metodología SCOR se proponen algunos indicadores de nivel III que avalan el desempeño de la cadena en la configuración de elementos los cuales se relacionan en la tabla 3.

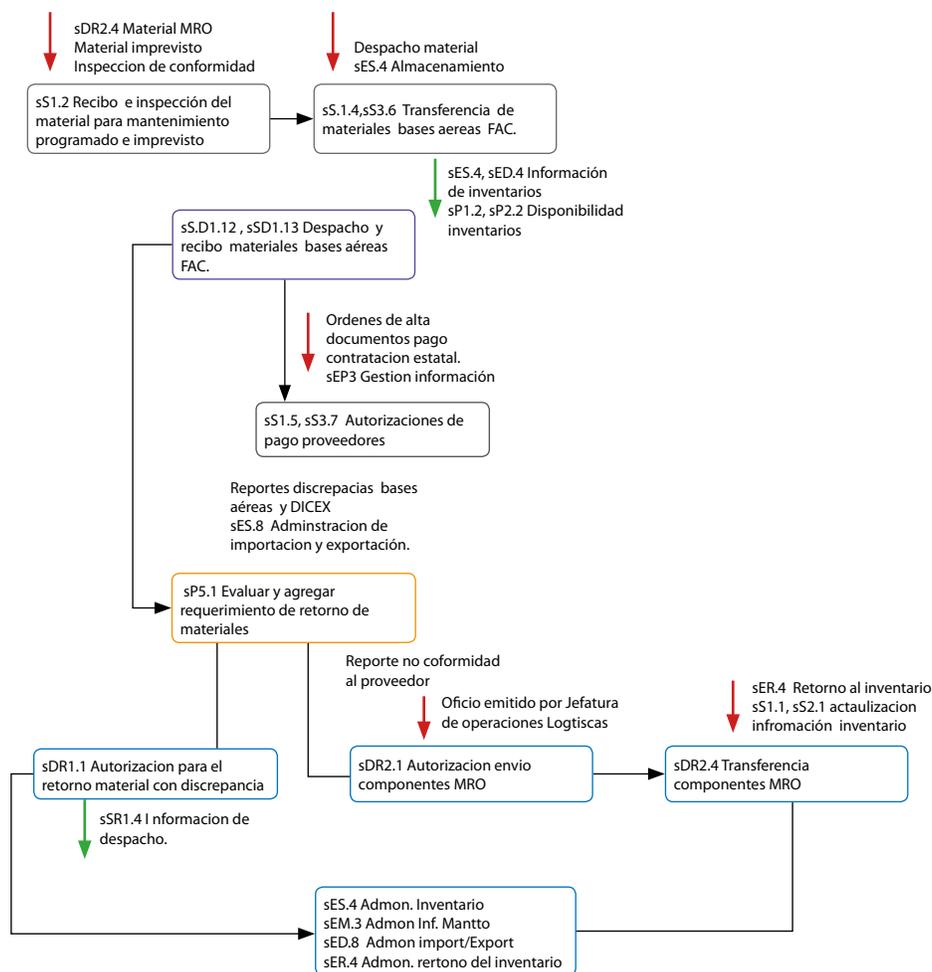


Figura 6. Descomposición propuesta proceso aprovisionamiento, distribución y retorno

Fuente: elaboración propia de acuerdo con Rubiano & Sotelo, 2013.

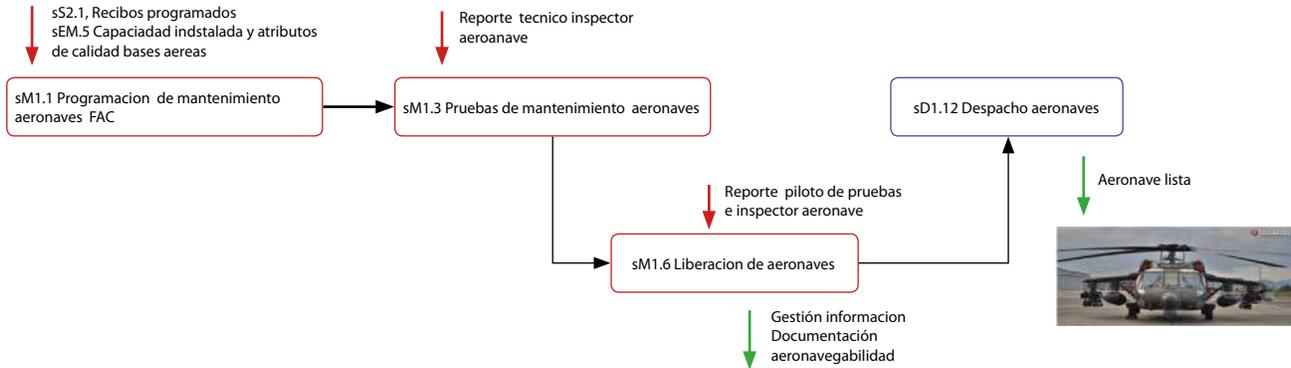


Figura 7. Descomposición proceso mantenimiento aeronáutico propuesto  
Fuente: El autor de acuerdo con Rubiano & Sotelo, 2013

Tabla 3. Indicadores nivel III

	Atributos de Rendimiento	Métricas de nivel III	Definición	Calculo
De cara al cliente	Confiabilidad en el cumplimiento de la cadena de suministro	Ejecución Presupuestal -pagos (RL.3.1)	Mide la ejecución presupuestal de acuerdo con los contratos asignados a la Jefatura de Operaciones Logísticas durante una vigencia determinada.	Ejecución presupuestal-pagos= (Numero contratos pagados/ Total de contratos vigencia actual)x 100
	Tiempo de respuesta de la cadena de suministro	Tiempo de despacho (RS 3.2)	Calcula en tiempo que se toma la Dirección de Comercio Exterior en ubicar un elemento en una Base Aerea de la FAC.	Tiempo de Despacho = Fecha de ubicación del material en DICEX- Fecha de recibo del material en la Base Aérea.
	Flexibilidad de la cadena de suministro	Adaptabilidad (AG.3.1)	El porcentaje de personal tecnico de una Base Aerea trabajando en labores disitintas su especialidad.	Adaptabilidad = (Numero de funcionarios por fuera de la especialidad/Total funcionarios asignados al grupo tecnico Base Aérea.
De cara a la empresa	Costos de la cadena de suministro	Costos de reparación (CO.3.1)	Evalua todos los costos asociados con el envio a reparación de un componente al exterior.	Costos de reparacion exterior= costos de reparacion + exportación
	Activos de la cadena de suministro	Activos reparables en exterior(AM3.1)	Evalua el nivel de costos del material que se encuentra en reparación en el exterior.	Activos reparables exterior= Numero item reparables en exterior x Valor unitario en inventario.

Fuente: elaboración propia de acuerdo al Modelo de referencia SCOR V. 10.0 (Supply – Chain Council, 2010)

Los indicadores propuestos en el nivel III generan un seguimiento a nivel de elementos de acuerdo a la metodología SCOR en los atributos de rendimiento, en cuanto a confiabilidad de la cadena de suministro, tiempos de respuesta y flexibilidad de cara al cliente y por el otro lado, los atributos de costo y activos de la cadena permiten un control de cara a la organización.

### 3.4 Diseño del modelo de transferencia de la metodología SCOR para la cadena de suministro de la Fuerza Aérea Colombiana

Una vez realizado el análisis de la cadena de suministros de la Fuerza Aérea Colombiana, en los niveles I, II y III establecidos en la metodología SCOR, se presenta a continuación el diseño del modelo de transferencia de la metodología

SCOR para la institución, como producto del análisis de los conceptos establecidos en la mencionada metodología y con fundamento en las información obtenida en las fases de la investigación, lo cual permite plantear una propuesta de mejora de la cadena de suministros para la institución de acuerdo con la figura 8.

El diseño de basa en los cinco procesos claves de la cadena de la organización en cuanto a la planeación, aprovisionamiento, distribución, mantenimiento aeronáutico y retorno; los cuales permiten trabajar de una forma integrada y no de manera independiente. De tal forma, se puedan satisfacer los requerimientos operacionales para el cumplimiento de la misión.

**3.4.1 Planeación de las necesidades**

Teniendo en cuenta que uno de los elementos más fuertes de la cadena de suministros es la planeación, se plantea la necesidad de integrar la planeación el aprovisionamiento, el mantenimiento, la distribución y el retorno a través de los procesos de SP1.1; Identificar, priorizar los requerimientos de la cadena, SP 1.2; Identificar evaluar y agregar los recursos a la cadena, SP1.3; Balance de los recursos de los requerimientos de la cadena, SP1.4; SP.15 Establecer y comunicar los pla-

nes de la cadena; sP2.1 Identificar y priorizar requerimientos plan logísticos aeronaves; sP2.2 Identificar, evaluar y agregar recursos plan logísticos aeronaves; sP2.3 Balance de los recursos plan logísticos con necesidades aeronaves y equipo asociado; sP 2.4 Establecer y comunicar el plan logístico de aeronaves; sP3.1 Identificar y priorizar los requerimiento materiales; sP3.2 Identificar, evaluar y agregar recursos de materiales; sP3.3 Balance de los recursos con necesidades materiales; sP 3.4 Establecer y comunicar los planes de materiales; sP4.1 Identificar, agregar y priorizar requerimientos del mantenimiento A; sP4.2 identificar, evaluar y agregar recursos de mantenimiento A; sP4.3 Balance de los recursos con necesidades mantenimiento A; sP 4.4 Establecer y comunicar los planes de mantenimiento A. Estos procesos permiten que el cliente (operaciones aéreas) tenga las aeronaves disponibles en el momento que lo requiere.

Por lo tanto, se presenta la FAC una propuesta metodológica para la planeación de los requerimientos de la cadena de suministros, la cual guarda coherencia con los conceptos del modelo SCOR así:

1. Proyección de inspecciones a realizar: mediante el cálculo de acuerdo al tiempo total de vuelo

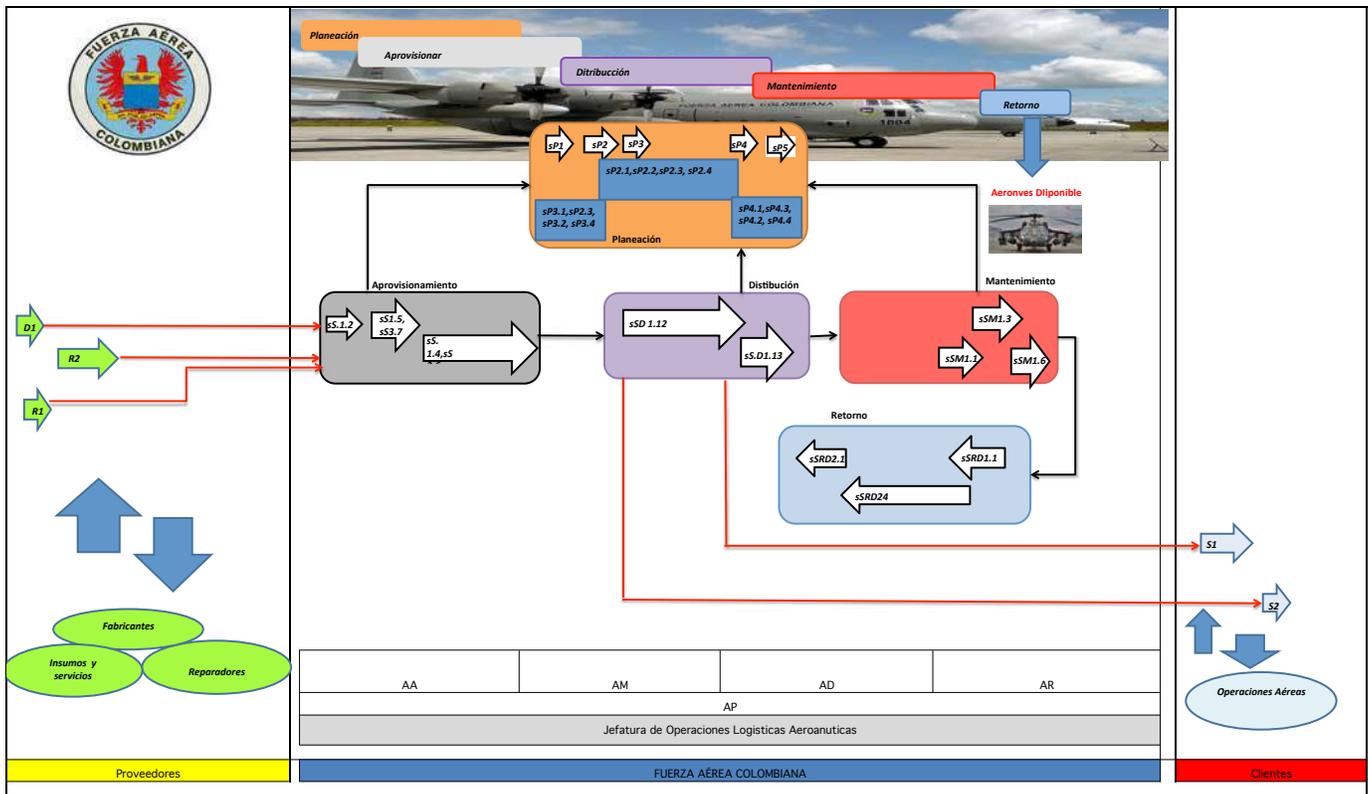


Figura 8. Diseño del modelo de transferencia de la metodología SCOR propuesto para la FAC  
Fuente: elaboración propia de acuerdo al Modelo de referencia SCOR V. 10.0 (Supply – Chain Council, 2010).



- asignado a cada tipo de aeronave y la periodicidad del mantenimiento establecida por el fabricante según el equipo, se asignan las horas de vuelo obteniendo el número total de inspecciones y tipo de inspecciones a realizar por cada una de las potenciales aeronaves que se encuentran en vuelo durante el año a planear y se determina la programación de mantenimiento por cada aeronave.
2. Cronograma de inspecciones: consiste en la distribución de las inspecciones a realizar por número de cola, y la fecha a realizarse de acuerdo con el promedio de horas de vuelo del equipo (mínimo dos años), así como los tiempos de acuerdo con su ubicación a nivel nacional, y el tipo de misión que cumple el equipo (transporte, ataque, instrucción, inteligencia etc.).
  3. Recolección información plataforma SAP R3: se revisan las salidas de materiales de los almacenes (mínimo 3 años) identificando descripción, fecha de salida, cantidad, código SAP, número de parte, número de identificación nacional (NSN) y sistema de la aeronave.
  4. Revisión tareas de mantenimiento: se estudian las tareas que se efectúan en una inspección dependiendo del evento de mantenimiento y el tipo de aeronave, verificando:
    - Listado de acuerdo a tareas: se identifican las tareas ordenadas por el fabricante y las originadas por la FAC como operador de las aeronaves.
    - Identificación de elementos: se tipifican los elementos empleados durante las inspecciones que son necesarios para el cumplimiento de las tareas, y se hacen recomendaciones de acuerdo al análisis de fallas y comportamiento de los equipos.
  5. Identificación de elementos:
    - Rotación: de acuerdo a la recurrencia de requerimientos del material dentro de los eventos de mantenimiento.
    - Segmentación: se clasifican los ítems de acuerdo al tipo de inspección a realizar.
    - Para el análisis de la demanda independiente se considera importante una revisión de los métodos de pronósticos de inventarios que podrían aplicar a la FAC a partir de los autores (Batanero, 2000; Chase, Jacobs, & Aquilano N, 2010; Guide Jr, 2000; O. P. Gutiérrez, 2009; Kim, Jun, Baek, Smith, & Kim, 2005; Mora, 2010; Silver, Pyke, & Peterson, 1998).
  6. Estudio demanda insatisfecha: se estudian los ítems que presentaron existencias cero en el almacén al ser requeridos para mantenimiento y la ocurrencia por bimestre, aquellos cuya recurrencia sea frecuente (más de dos veces) entran en evaluación para ser incluidos dentro de las listas ABC.
  7. Consolidación clasificación material:
    - Listas ABC por inspección: de acuerdo a su rotación, análisis de demanda dependiente e independiente, imprevistos, análisis de demanda de falla y confiabilidad, modificaciones especiales y configuración de la aeronave así: Lista A: Entre 80 % y 100 %, Lista B: Entre 25 % y 79 %, lista C: entre 7 % y 24 %
    - Listas de material de consumo apoyo para inspección: hacen referencia a los suministros que se emplean durante la ejecución del mantenimiento y que no son catalogados como repuestos; estos se emplean en la remoción e instalación de componentes.
  8. Estudio de componentes que cumplen por ciclos de operación: es el seguimiento realizado a los componentes que se deben reemplazar una vez cumplidos ciertos ciclos de operación (horas de vuelo, aterrizajes, encendidos, etc.), teniendo en cuenta:
    - TBO (Time Between Overhaul): mediante proyección de fechas de entrada de aeronaves y el número de horas asignadas se determinan los elementos reparables que cumplen tiempos de mantenimiento mayor y se solicita su reparación dentro de la programación del PASL.
    - Cambios mandatarios: mediante proyección de fechas de entrada de aeronaves y el número de horas asignadas se determinan los elementos que deben ser reemplazados y se incluyen dentro del PASL para su adquisición.
    - Inspecciones por aeronave: de acuerdo a los Boletines Técnicos y ordenes técnicas se incluyen dentro de las inspecciones y de acuerdo al número de equipos a los que se les debe realizar se hace el requerimiento de material en el PASL.
  9. Capacidad reparadora y productiva: de acuerdo a la capacidad de cada taller (instalaciones y personal), rotación de los elementos reparables y stock mínimo de seguridad se establece la cantidad de

elementos a reparar en la unidad y se hacen los requerimientos de material para la realización de las reparaciones.

10. Cruce de Información: la información obtenida de los pasos anteriores se consolida para la elaboración del PASL.

### 3.4.2 Aproveccionamiento

El aprovisionamiento juega un papel importante para garantizar la disponibilidad de material que se requieren para el alistamiento de las aeronaves. De allí que, la calidad de proveedores es un factor decisivo para este fin. Por tanto, la Fuerza Aérea Colombiana requiere de relaciones fuertes, estables y duraderas que garanticen el suministro oportuno de los materiales requeridos para las aeronaves. El aprovisionamiento de la cadena de suministros de la FAC se debe centrar en los procesos de sS1.2 recibo e inspección del material para mantenimiento programado e imprevisto, sS1.4, sS3.6 transferencia de materiales Bases aéreas FAC y sS1.5, sS3.7 autorizaciones de pago proveedores, mediante una conexión directa con los proveedores en los niveles de fabricante, talleres reparadores e insumos y servicios por medio de los procesos de: D.1 Distribución, R.1 Retorno material reparable enviado a reparación y el R.2 Retorno de material por reclamación de garantías.

Para mejorar el aprovisionamiento de la FAC se hace necesario:

Clasificar el número de proveedores que actualmente tiene la institución de acuerdo con los equipos que se posee y las capacidades de cada proveedor, exigiendo las certificaciones establecidas nivel internacional para la venta de repuestos y partes aeronáuticas.

Los procedimientos para el trámite de pedidos de material para una aeronave se deben adecuar al ambiente operacional de Fuerza Aérea, de tal forma que siguiendo la normatividad contractual del estado Colombiano se puedan tener los elementos de manera rápida, para ello se hace necesario contar con contratos abiertos que reducen los tiempos para la adquisición del material.

Se considera importante en la evaluación de los proveedores un mayor énfasis a los siguientes aspectos:

- Cumplimiento: fecha comprometida del despacho vs la fecha de entrega del material.
- Calidad: cumplimiento de los requerimientos técnico en la entrega de material, estos incluyen los documentos de trazabilidad del material para su uso.
- Cantidad: entrega oportuna de los materiales solicitados de acuerdo con la orden de pedido.

- Tiempo: las capacidades del proveedor de suministrar los materiales solicitado por FAC en la fecha que se requieren si dilatación o demoras
- Garantías: el respaldo ofrecido por le proveedores con respecto los productos vendidos y su capacidad de dar respuesta pronta a una reclamación de la organización.
- Precios: se debe evaluar que los precios de los productos ofrecidos por el proveedor se encuentren de acuerdo las condiciones del mercado.
- Capacidad instalada: que el proveedor posea la infraestructura necesaria para desarrollar el negocio de venta de materiales aeronáuticos, esto incluye las de respectivas certificaciones de autoridad aeronáutica.

### 3.4.3 Distribución

Proceso que permite que los materiales solicitados para las aeronaves puedan ser enviados a las bases Aéreas para su consumo o almacenamiento y para posterior uso de acuerdo con los eventos de mantenimiento imprevisto o programado.

Este proceso de centra en los procesos de sS. D1.12, sSD1.13 despacho y recibo materiales bases aéreas FAC y sD1.12 despacho aeronaves.

El proceso de distribución de la Fuerza Aérea Colombiana debe establecer contratos para el transporte mercancía a nivel nacional a territorios apartados de la geografía nacional para el envío de material, ya que si por algún motivo no se presentan vuelos de la FAC se puede apoyar el alistamiento de las aeronaves a la mayor brevedad posible.

### 3.4.4 Mantenimiento

De este modo, JOL realiza la asignación logística de las aeronaves a las bases aéreas para dar cumplimiento las funciones de: mantener la capacidad instalada para la ejecución de los tres niveles de mantenimiento (mayor, intermedio y línea); responder por la elaboración y ejecución del Programa Anual de Soporte Logístico; proporcionar asesoría y apoyo técnico a las bases aéreas donde estén asignadas operativamente las aeronaves; mantener las capacidades de los talleres de la respectiva base aérea; reportar las modificaciones a los planes y programas de mantenimiento, de las aeronaves asignadas logísticamente.

Este proceso contempla los procesos sM1.1 Programación de mantenimiento aeronaves, sM1.3 Pruebas de mantenimiento aeronaves y sM1.6 Liberación de aeronaves de acuerdo con la metodología SCOR.



El proceso de mantenimiento aeronáutico recibe de la gestión de materiales los elementos que se requieren para los trabajos imprevistos y programados en las aeronaves.

En este proceso la Fuerza Aérea Colombiana debe mejorar los siguientes aspectos:

- Actualización de los planes y programas de mantenimiento de todas aeronaves por asignación logística en el sistema SAP.
- Definir los programas de envejecimiento y vida útil de las aeronaves por cumplimiento de ciclo de vida.
- Definir los materiales requeridos para los programas de recuperación de aeronaves paralizadas.
- Establecer estudios de confiabilidad por equipos de vuelos a fin de determinar el análisis de fallas recurrentes y los posibles materiales que se requieren.

### 3.4.5 Retorno

Este proceso tiene por responsabilidad la gestión de la reincorporación a los inventarios de los componentes reparables que fueron enviados reparación y una vez terminados los trabajos deben retornar la FAC. Del mismo modo, en este proceso se gestionan ante los proveedores las garantías que presentan los elementos adquiridos por FAC.

El proceso de retorno se centra para la Fuerza Aérea Colombiana de acuerdo con la metodología SCOR en los procesos de: sDR1.1 Autorización para el retorno material con discrepancia, sDR2.1 Autorización envió componentes MRO, sDR2.4 Transferencia componentes MRO, sES.4 Administración Inventario, sEM.3 Administración información de mantenimiento, sED.8 Administración importaciones/Exportaciones, sER.4 Administración del retorno de inventario. Para mejor desempeño de este proceso la Fuerza Aérea Colombiana debe gestionar la devolución de los componentes que se encuentran en exterior con un tiempo superior a un año. Desarrollar un procedimiento que permita establecer multas a los proveedores por recurrencia en la reclamación de garantía de material vendido con baja calidad.

## 5. Cierre

Esta fase comprende el planteamiento de los resultados, conclusiones y recomendaciones para la organización, conforme a la propuesta modelo de transferencia de la metodología de referencia de operaciones para cadena de suministro (SCOR). De ahí que su implementación depende de los procedimientos internos de la institución.

## 5.1 Resultados

La planeación de los materiales en cada una de las bases de la Fuerza Aérea Colombiana se hace de manera autónoma, es decir que cada unidad de acuerdo a las necesidades que tiene utiliza una metodología diferente para planear los requerimientos de sus materiales que necesitan sus aeronaves. Estos requerimientos se consolidan en el plan anual de soporte logístico que tiene una vigencia de un año.

La cadena de suministros de la FAC tiene una variedad de proveedores que llegan al ciento cincuenta (152) proveedores actualmente a nivel exterior, catalogados entre fabricantes, talleres reparadores y un porcentaje representativo de intermediarios o bróker. Este alto número de proveedores representa una dificultad a la hora de conseguir los repuestos, teniendo en cuenta que no existe una lealtad por parte de los proveedores hacia la Fuerza Aérea para suplir las necesidades que tienen las aeronaves y se deben seguir los procesos de contratación estatal con cada proveedor.

La Fuerza Aérea tiene varios procedimientos administrativos para el trámite de los requerimientos de los materiales que necesitan las aeronaves. En este caso se verificaron los procedimientos para la planeación de los requerimientos de soporte logístico EL PASL, igualmente se verificó los procedimientos de trámite de garantías de materiales, envío de componentes reparables al exterior, adquisición de elementos aeronáuticos en el exterior y pedidos imprevistos o comúnmente conocidos en la organización como pedidos AOG (Aircraft on ground). Conviene subrayar que el procedimiento para la adquisición material AOG se establece para la necesidades urgentes que afectan el alistamiento de una aeronave hasta por cinco elementos, pero se debe cumplir con los aspectos de la contratación estatal lo que genera que el tiempo de retorno al servicio de la aeronave se extienda desde el momento en que se genera la necesidad hasta la llegada del material dependiendo debido a los trámites administrativos que se deben seguir para su adquisición. situación que reviste de complejidad teniendo en cuenta la disponibilidad permanente que requieren las aeronaves de la FAC.

Hay un incremento en las necesidades de los materiales que se piden por imprevistos, dado a que algunas bases aéreas estos son significativos con respecto a los que se piden el PASL y en algunas ocasiones estos materiales no se consumen en su totalidad y se quedan en el almacén.

La Fuerza Aérea Colombiana tiene un sistema de aplicaciones y productos denominado SAP, este sistema permite una comunicación entre las diferentes Fuerzas del Ministerio de Defensa Nacional, pero actualmente existe

una limitación debido a que no hay una comunicación en tiempo real que permita a los usuarios verificar los inventarios de otras fuerzas para hacer traspasos y aprovechar los recursos, de manera tal que si alguna unidad o base militar tiene un elemento se pueda pedir en condición de préstamo o traspaso, mientras se resuelve la necesidad y poder generar un ahorro.

De los 152 proveedores que tiene la Fuerza Aérea Colombiana registrados para la adquisición de los materiales en el exterior el sesenta y cinco por ciento (65 %) corresponden a intermediarios o bróker, lo que puede afectar el precio final de los repuestos y la calidad y de los productos.

### 5.2 Conclusiones

Teniendo en cuenta la dinámica interna del país, las tendencias internacionales, los procesos científicos y tecnológicos y la constante transformación de los tipos de amenaza que afronta el país, se obliga a la Fuerza Aérea Colombiana a anticiparse a los cambios del entorno y desarrollar acciones estratégicas que contribuyan a la construcción de un futuro más próspero y seguro para la Nación. De este modo, tener una cadena de suministro que se adecúe a las necesidades del cliente interno de la organización permite responder de manera sobresaliente a las necesidades del ambiente operacional.

Las operaciones aéreas que actualmente desarrolla la Fuerza Aérea Colombiana son importantes para la seguridad y defensa del país, en ese orden de ideas la gestión logística de la organización juega un papel preponderante para el cumplimiento de la misión de la organización; de tal modo, es importante tener en cuenta que la cadena de suministro debe estar articulada con esas necesidades que tiene la organización de tal forma que permita que mencionadas operaciones se desarrollen de manera exitosa.

Debido a las reducciones presupuestales que ha venido sufriendo la organización y los cambios en el entorno mundial se considera fundamental que la Fuerza Aérea Colombiana mejore el desempeño del sistema logístico mediante una cadena de suministro que le permita aprovechar las oportunidades que ofrece los diferentes sectores aeronáuticos, con el fin de optimizar los recursos, optimizar el presupuesto, para que la misión de la organización no se vea afectada.

La propuesta del diseño de la cadena de suministro para la Fuerza Aérea Colombiana, en su proceso logístico a través de la metodología SCOR, permite establecer claramente cuáles son los procesos que se manejan a nivel de la Jefatura de Operaciones Logísticas, establecer unos indica-

dores de gestión claros con unas mediciones que permita hacer seguimiento al desempeño de la cadena.

La metodología SCOR permite establecer los pasos que se deben seguir para la verificación del rendimiento de la cadena de suministro, de tal manera que se puedan satisfacer las necesidades de los clientes. Es importante tener en cuenta que esta metodología ha sido utilizada y probada a nivel mundial, demostrado ser útil en diferentes tipos de organizaciones entre ellas organizaciones que tienen algún tipo de desempeño o comportamiento en el entorno militar.

### 5.3 Recomendaciones

Es importante en el proceso de implementación de la cadena de suministro a través de la metodología SCOR, tener una participación de los diferentes agentes que intervienen en la cadena de suministro de la organización, como son los proveedores, operaciones aéreas, el personal que trabaja en el mantenimiento de las aeronaves, el personal administrativo, directivos del proceso logístico y proceso de operaciones aéreas, con el fin de establecer claramente cuáles son las expectativas al momento de hacer la modelación de mencionada cadena.

Para la implementación de la metodología SCOR en la cadena de suministro se requiere que el sistema de información SAP se encuentre actualizado con la información de los inventarios, información de alistamiento, información de los programas de mantenimiento, de tal forma que se pueda tomar información de los diferentes procesos, a fin de obtener los resultados deseados.

Uno de los aspectos más importantes de la metodología SCOR son los indicadores de gestión que permitan medir el desempeño y rendimiento de la cadena, para esto se recomienda a la Fuerza Aérea Colombiana que la información de mencionados indicadores sea parametrizada en el sistema de información, de forma tal que se pueda obtener de forma automática y en tiempo real los resultados para la toma de decisiones.

El modelo SCOR evalúa cinco aspectos fundamentales como son la planeación, el aprovisionamiento, el mantenimiento, la distribución y el envío; sin embargo, hay aspectos como son el manejo de los recursos humanos que este modelo no lo contempla y es importante que la Fuerza Aérea Colombiana establezca un plan de relevo generacional de las capacidades que tiene el personal técnico con más tiempo y experiencia en la organización, de modo tal que cuando se retiren no afecte al sistema logístico de la institución por la ausencia de su conocimiento.



Finalmente, el presente documento hace parte de una investigación académica y de campo, desarrollada de acuerdo con los lineamientos establecidos para tal fin. La información utilizada del modelo SCOR se realizó conforme a las referencias bibliográficas disponibles en bases de datos. La Fuerza Aérea Colombiana no ha realizado su implementación hasta tanto no surtir los trámites administrativos y legales pertinentes.

## Referencias

- Ander-Egg, E. (2003). *Técnicas de investigación social* (Cuarta ed.) 24. Buenos Aires: Lumen.
- Arribas, M. (2004). Diseño y validación de cuestionarios. *Matronas profesión*, 5(17), 23-29.
- Batanero, C. (2000). Significado y comprensión de las medidas de posición central. *Uno. Revista de Didáctica de las Matemáticas*, 25, 41-58.
- Bean, W. L., Schmitz, P. M. U., & Engelbrecht, G. N. (2009). *Adapting the SCOR model to suit the military: A South African example*. 14th Annual Logistics Research Network Conference, 9th-11th. 342-349.
- Chase, R., Jacobs, R., & Aquilano N. (2010). *Administración de operaciones*. México D. F.: Duodécima ed.
- Dutton, J. E., Fahey, L., & Narayanan, V. K. (1983). Toward understanding strategic issue diagnosis. *Strategic Management Journal*, 4(4), 307-323.
- Fuerza Aerea Colombiana. (2008a). *Indicadores de gestión*. Bogotá.
- Fuerza Aerea Colombiana. (2008b). *Manual de mantenimiento aeronáutico*. Bogotá.
- Fuerza Aerea Colombiana. (2009). *Manual de abastecimientos*. Bogotá.
- Fuerza Aerea Colombiana. (2011). *Plan estratégico misional 2011-2030*. Bogotá.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2005). *Vocación de victoria* (Primera ed.). Bogotá.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2010). *Plan estratégico funcional Jefatura de Operaciones Logísticas Aeronáuticas 2010-2019*. Bogotá.
- Fuerza Aérea Colombiana Direccion de Procesos Logiticos. (2015). *Propuesta Mejora Sistema Logístico*. (20152290027253 del 21-01-15 MDN-CGFM-COFAC-JEMFA-JOL-DIPLO-SUBES 17-2). Bogotá.
- Fuerza Aérea Colombiana Seccion Planeacion JOL. (2015). *Propuesta Mejora Sistema Logístico*. (20152290042583 del 21-01-15 MDN-CGFM-COFAC-JEMFA-JOL-DIPLO-SUBES 17-2). Bogotá.
- Ganji, B., Shaharoun, M., & Norehan, H. (2015). Assessing Supply Chain Performance through Applying the SCOR Model. *International Journal of Supply Chain Management*, 4(1), 1-11. Recuperado de <http://ojs.excelingtech.co.uk/index.php/IJSCM/article/view/1053>
- Georgise, F. B., Thoben, K.-D., & Seifert, M. (2012). Adapting the SCOR Model to Suit the Different Scenarios: A Literature Review & Research Agenda. *International Journal of Business and Management*, 7(6), 2-17.
- Georgise, F. B., Thoben, K.-D., & Seifert, M. (2013). Implementing the SCOR Model Best Practices for Supply Chain Improvement in Developing Countries. *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, 6(4), 13-25.
- Gómez, C. G. (2006). *Propuesta de un modelo de gestión logística de abastecimiento internacional en las empresas grandes e importadoras de materia prima. Caso Manizales*. (Tesis maestría). Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales. Recuperado de [file:///Users/carolinasuarez/Downloads/Propuesta\\_de\\_un\\_modelo\\_de\\_gestion\\_logistica\\_de\\_aba.pdf](file:///Users/carolinasuarez/Downloads/Propuesta_de_un_modelo_de_gestion_logistica_de_aba.pdf)
- Guide Jr, V. D. R. (2000). Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal of Operations Management*, 18(4), 467-483.
- Gutierrez, Eduardo, & Calderon, J. (2007). Elementos vitales SGC Fuerza Aerea Colombiana. Incorporación. Recuperado de <https://www.incorporacion.mil.co/elementos-vitales-del-sgc-en-la-fuerza-a-a%C3%A9rea-colombiana>
- Gutiérrez, O. P. (2009). Un enfoque multicriterio para la toma de decisiones en la gestión de inventarios. *Cuadernos de Admón. Pontificia Universidad Javeriana*, 22(38), 169-187.
- Gutiérrez, V. y Vidal, C. J. (2008). Modelos de Gestión de Inventarios en Cadenas de Abastecimiento: Revisión de la Literatura. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 43, 134-149
- Heagney, J. (2011). *Fundamentals of Project Management*. New York: AMACOM American Management Association.
- Hubert, A. (2014). Increasing efficiency of sport's event companies by implementing lean management & lean thinking across the processes defined by the SCOR model: OC Sport, a case of Sport Event Business Company. (Dissertation). Recuperado de <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-159079>
- Kasi, V. (junio de 2005). *Systemic Assessment of SCOR for Modeling Supply Chains*. Paper presented at 38th Hawaii International Conference on System Sciences. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/221184052\\_Systemic\\_Assessment\\_of\\_SCOR\\_for\\_Modeling\\_Supply\\_Chains](https://www.researchgate.net/publication/221184052_Systemic_Assessment_of_SCOR_for_Modeling_Supply_Chains)
- Kim, C., Jun, J., Baek, J., Smith, R., & Kim, Y. (2005). Adaptive inventory control models for supply chain management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(9-10), 1184-1192.
- Lama, J. L. C. & Esteban, F.-C. L. (8 y 9 de septiembre de 2005). *Análisis del modelo SCOR para la Gestión de la Cadena de Suministro*. Artículo presentado en el IX Congreso de Ingeniería de Organización. Gijón, España.

- Lambert, D. M., García Dastugue, S. J., & Croxton, K. L. (2005). An Evaluation of Process oriented Supply Chain Management Frameworks. *Journal of Business Logistics*, 26(1), 25-51.
- Lockamy III, A., & McCormack, K. (2004). Linking SCOR planning practices to supply chain performance: An exploratory study. *International journal of operations & Production Management*, 24(12), 1192-1218.
- López, J. (2004). *Constitución política de Colombia*. Bogotá: Plaza y Janes Editores S.A.
- Mora, L. A. (2004). Indicadores de gestión logísticos Retrieved 11 Enero, 2015, from [www.webpicking.com/hojas/indicadores.htm](http://www.webpicking.com/hojas/indicadores.htm)
- Mora, L. A. (2010). *Gestión Logística Integral*. Bogotá.
- Palma, J. A. (2014). Analytical hierarchy process and SCOR model to support supply chain re-design. *International Journal of Information Management*, 34(5), 634-638.
- Peña, S., & Estrada, E. (2014). Diagnóstico del proceso de adquisiciones logísticas aeronáuticas a través del Portal de proveedores de la agencia de compras FAC. *Ciencia y Poder Aéreo*, 9(1), 43-53.
- Rubiano, P.T., & Sotelo, J. L. (2013). *Desarrollo del SCOR model para la cadena de suministro, de la Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, sede Bosque Popular*. Bogotá: Universidad Libre.
- Sarkar, B. (2013). A production-inventory model with probabilistic deterioration in two-echelon supply chain management. *Applied Mathematical Modelling*, 37(5), 3138-3151.
- Silver, E., Pyke, D. F., & Peterson, R. (1998). Inventory management and production planning and scheduling.
- Stephens, S. (2001). Supply chain council & supply chain operations reference (scor) model overview. *Supply chain council*, 303.
- Supply-Chain Council. (2010). Supply Chain Operations Reference Model-SCOR Version 10.0 Retrieved 20 Febrero, 2015, from [www.supply-chain.org](http://www.supply-chain.org)
- Universidad Central. (2015). Lineamientos generales para el desarrollo de trabajo de grado (pp. 1- 26). Bogotá: Universidad Central.
- Westland, J. (2007). *The Project Management Life Cycle: A Complete Step-By-Step Methodology for Initiating, Planning, Executing & Closing a Project Successfully*. Mishawaka, IN, U.S.A.: Kogan Page
- Zhou, H., Benton, W., Schilling, D. A., & Milligan, G. W. (2011). Supply chain integration and the SCOR model. *Journal of Business Logistics*, 32(4), 332-344.





## ASEDIO A GÜEPÍ: FUERZA AÉREA COLOMBIANA, MIRADA A UNA OPERACIÓN TRASCENDENTAL<sup>1</sup>

SIEGE OF GÜEPÍ: COLOMBIAN AIR FORCE, LOOK AT A TRANSCENDENTAL OPERATION<sup>2</sup>

CERCO A GÜEPÍ: FORÇA AÉREA COLOMBIANA, OLHAR PARA UMA OPERAÇÃO DE TRANSCENDENTAL<sup>3</sup>

Abraham Ortiz Miranda<sup>4</sup>  
Fuerza Aérea Colombiana. Bogotá, Colombia

---

### CIENCIA Y PODER AÉREO

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-9468 / Volumen 13 / Número 2 / julio-diciembre de 2018/ Colombia /pp. 68-76

Recibido: 20/02/2018

Aprobado por evaluador: 15/04/2018

Doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.602



Para citar este artículo:

Ortiz, A. (2018). Asedio a Güepí: Fuerza Aérea Colombiana, mirada a una operación trascendental. *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(2), 68-76. doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.602

---

<sup>1</sup> Artículo resultado de una reflexión exploratoria del conflicto colombo-peruano asociado al Grupo de Investigación Análisis en Contexto. DICOP. Fuerza Aérea Colombiana.

<sup>2</sup> Article resulting from an exploratory reflection of the Colombian-Peruvian conflict associated with the Research Group Analysis in Context. DICOP. Colombian Air Force.

<sup>3</sup> Artigo resultado de uma reflexão exploratória do conflito colombiano-peruano associado à Análise de Contexto do Grupo de Análises. DICOP. Força Aérea Colombiana.

<sup>4</sup> Profesional en Historia de la Universidad Nacional. Oficial historiador Fuerza Aérea Colombiana. Correo electrónico: aortizmiranda@gmail.com

**Resumen:** Abandonada a su suerte, fue en la zona de frontera del trapecio amazónico colombiano donde se decidió el destino de un trance mucho mayor: el conflicto con el Perú. Impulsado por la presencia de aventureros y empresarios en la región, el gobierno central peruano pretendió dislocar la integridad nacional colombiana. No obstante, tales objetivos de ocupación ilegal del territorio colombiano se vieron coartados por el hecho de la victoria decisiva que conquistó el poder aéreo colombiano en el bastión de Güepí. Fueron las dinámicas sociales y de comportamiento humano y castrense que se gestaron al interior de la institución, las que permitieron que la Fuerza Aérea Colombiana coadyuvara a mantener el control del Estado a nivel nacional, y así cumplir los objetivos constitucionales.

**Palabras clave:** Fuerza Aérea Colombiana, poder aéreo militar, Amazonas, Güepí, victoria decisiva.

**Abstract:** Abandoned to its fate, it was in the border area of the Colombian Amazon trapeze where the fate of a much greater trance was decided: the conflict with Peru. Driven by the presence of adventurers and entrepreneurs in the region, the Peruvian central government sought to dislocate Colombia's national integrity. However, these objectives of illegal occupation of Colombian territory were hampered by the fact of the decisive victory of Colombian air power in the bastion of Güepí. It was the social dynamics and human and military behavior that were developed within the Institution, which allowed the Colombian Air Force to help maintain control of the State at the national level, thus fulfilling the constitutional objectives.

**Keywords:** Colombian Air Force, Military Air Power, Amazon, Güepí, Decisive Victory.

**Resumo:** Abandonado ao seu destino, foi na área fronteira do trapézio amazônico colombiano que se decidiu o destino de um transe muito maior: o Conflito com o Peru. Impulsionado pela presença de aventureiros e empresários na região, o governo central peruano buscou deslocar a integridade nacional colombiana. No entanto, tais objetivos de ocupação ilegal do território colombiano, foram prejudicados pelo fato da vitória decisiva que conquistou o poder aéreo colombiano no bastião de Güepí. Foi o comportamento social e humano e a dinâmica militar que se desenvolveu dentro da Instituição, o que permitiu que a Força Aérea Colombiana ajudasse a manter o controle estatal em nível nacional, cumprindo assim os objetivos constitucionais.

**Palavras chave:** Força Aérea Colombiana, Força Aérea Militar, Amazônia, Güepí, Vitória Decisiva.

## Introducción

El Estado-nación colombiano ha sido presa de periodos de violencia desde el mismo inicio del siglo XX, los cuales han pretendido quebrantar su cuerpo institucional y hasta su integridad nacional. Un ejemplo histórico de lo anterior es el planteamiento de objetivos que actores transnacionales gestaron para ampliar sus propios territorios a costa de la desintegración del territorio nacional, trastornando así la cotidianidad de la población del sur de Colombia. A priori a los estallidos de violencia endógena que marcaron el siglo XX, poblaciones amazónicas fronterizas se vieron temporalmente desintegradas del territorio colombiano al ser invadidas por tropas peruanas, las cuales pretendían usufructuar rentas sobre la tierra ilegítimamente ocupada el 1 de septiembre de 1932. Tal invasión fue un pilar más para gestar épocas que situaban a los ciudadanos en una constante perspectiva de peligro, planteándose la duda sobre si el leviatán colombiano realmente era tal, ya que se empezaba a perder el monopolio legítimo de las armas por parte de las administraciones centrales<sup>1</sup> (Di John, 2010, pp. 49-50).

Un factor esencial para que Colombia no se fragmentara por motivo de su conflicto internacional en la tercera década del siglo pasado, es el hecho de que la Fuerza Aérea Colombiana tuvo bajo su mando el liderazgo de operaciones trascendentales que permitieron la llegada del fin de dichas luchas. Siguiendo siempre las directrices establecidas desde el Estado por intermedio del comando general de las fuerzas militares, el potencial y las facultades de la Fuerza Aérea Colombiana relucieron en las múltiples operaciones que debió cumplir, bien fuera de respuesta inmediata a ataques de grupos armados extranjeros usando grandes destacamentos, o una decisión gubernamental, logrando una victoria decisiva desde el aire.

## Marco conceptual

Para una mayor comprensión del contexto, tal concepto de victoria decisiva necesita de ciertas precisiones, siendo la primera de ellas ratificar que la implementación de la fuerza militar es un instrumento de decisión usado por los estados (definición de Estado, ver nota 3). En un segundo estadio, la victoria decisiva en lo militar conduce a decisiones políticas, considerando siempre múltiples opciones aceptables:

En este sentido, la victoria decisiva puede manifestarse en tres niveles: a) el operacional, cuando la victoria decide el resultado de una campaña; b) a nivel estratégico, cuando la victoria decide

quién gana en lo militar; c) la victoria decisiva a nivel político. (Marín et al., 2017, p. 46)

La victoria decisiva se conquistó por motivo que la Fuerza Aérea Colombiana convenció a los opositores del Estado alzados en armas, a reevaluar su actuar. La base de dicho logro tuvo su germen en las acciones militares con las que la Fuerza hizo que el bando peruano considerara el costo-beneficio de no realizar lo que Colombia determinaba. La implementación de lo anterior se llevó a cabo por parte de la institución castrense aérea, a partir de disuadir a los grupos armados extranjeros de no realizar cruzadas inaceptables y al compelerlo de cambiar su comportamiento (Losada, 2014, p. 13).

## Objetivos

Para lograr entender dichas conquistas y logros meritorios de la Fuerza Aérea Colombiana que coadyuvaron a mantener el control del Estado a nivel nacional, y así cumplir los objetivos constitucionales, es necesario buscar la raíz histórica de estas. Una pertinente identificación de las estructuras temporales que la Fuerza Aérea Colombiana heredó del conflicto colombo-peruano, hará relucir aquellas dinámicas sociales y de comportamiento humano y castrense que permitieron que el poder aéreo nacional reinara en el sur del país. Sin el desarrollo a priori de tales conductas y acciones por parte del personal que componía la aviación militar colombiana, el impacto del poder aéreo nacional durante el desarrollo del conflicto hubiera sido muy variable e ínfimo.

No obstante, al entrar en el detalle de las mencionadas estructuras temporales que surgieron en dicha época, se vuelve asequible un conocimiento cabal del impacto que el poder aéreo militar colombiano tuvo en el desarrollo del conflicto con el Perú. Las decisiones que los integrantes del arma aérea tomaron en su momento, en el teatro de operaciones del trapecio amazónico, estuvieron completamente influenciadas por los motivos y causales cambiantes que los obligaba a estar en perspectiva beligerante; de allí que el estudio de las mencionadas mociones sea pertinente para determinar el alcance que tuvo la aviación militar colombiana en los momentos de conflicto internacional.

## Marco teórico

Comprender la victoria decisiva desde el aire que gestó la institución, significa generar un eficaz y comprensible conocimiento de sus estructuras temporales, de sus "itinerarios ya recorridos, de los valores antiguos, de las experiencias vividas", a razón que una entidad castrense como la aquí estudiada, "es siempre un pasado, de este modo, un cierto pasado vivo" (Goberna, 2003, p. 218). Son las continuidades temporales establecidas y construidas a través de casi un siglo de existencia las que han dado paso a una estructura,

<sup>1</sup> Aquí se sigue un entendimiento de la falencia estatal desde las premisas maquiavélico/weberiano, tal y como se observa más adelante.



a un indudable “ensamblaje, una arquitectura; pero, más aún, una realidad que el tiempo tarda enormemente en desgastar y en transformar”, trascendiendo el simple hecho de ser nada más que una organización (Braudel, 2006, p. 8).

Es allí donde reside la importancia de tales acontecimientos que traspasan las conciencias de los contemporáneos para ser más que una explosión, una llamarada que los obnubila. Testimoniando sobre movimientos muy profundos, los mismos deben estar cargados de una serie de significaciones y relaciones (Braudel, 2006, p. 4), que sean capaces de presentar consecuencias de tal magnitud que se aproximen al reloj de tiempo de Fernand Braudel: “primero, del acontecimiento a la estructura, y, después, de las estructuras y de los modelos al acontecimiento” (Braudel, 2006, p. 32).

En otras palabras, son de suma importancia solo las operaciones aéreas que representan un tipo de acontecimiento que entra en dialéctica con aquella arquitectura que le rodea, para romper con “los viejos ciclos y con las tradicionales costumbres” (Goberna, 2003, p. 218) del mundo castrense de ese entonces. Es solo aquella intervención que realmente señala un “cambio”, “una fase nueva”, destacando por sí mismas (Goberna, 2003, p. 218), por motivo de gestar nuevas estructuras que se vuelvan casi imperecederas al trasegar del tiempo, relacionando el pasado con el presente en “un continuo ir y venir” (Goberna, 2003, p. 219). Finalmente, se debe tener en la mirilla solo aquella operación trascendental realizada por la Fuerza Aérea Colombiana que logró la construcción de realidades que han durado “tanto tiempo que pueden parecer inmutables, aunque también varían lenta e imperceptiblemente” (Goberna, 2003, p. 221), sobresaliendo “entonces las grandes permanencias o semipermanencias, tanto conscientes como inconscientes” de la institución (Goberna, 2003, p. 222).

Por lo tanto, una operación que realizó la Fuerza Aérea Colombiana en pro de mantener la integridad nacional y la legitimidad del Estado, para así cumplir los objetivos constitucionales, y que marcó un hito trascendental en la generación de doctrina dentro de la institución, perdurando hasta hoy día, es la batalla de Güepí, enmarcada en el conflicto colombo-peruano de inicios del siglo XX, tal asedio construyó en un primer estadio la plataforma de tecnificación, profesionalización y de reacción oportuna y precisa que ha caracterizado a la Fuerza hasta hoy en día, además de ser la primera operación conjunta realizada por las fuerzas militares colombianas.

## La batalla de Güepí

### La previa al asedio

Aquel asedio conjunto de 8 horas sobre Güepí decidió el destino de los territorios sureños colombianos, lugares de

frontera no tenidos en cuenta por el Estado colombiano a inicios del siglo XX. Sobre estas locaciones se decidió el destino de un trance mucho mayor: el conflicto con el Perú.

A diferencia de los 2.220 kilómetros de frontera acordados y delimitados en 1891 en la región de la Orinoquía entre Colombia y Venezuela, para finales del siglo XIX e inicios del XX estaban pendientes los límites internacionales con Brasil, Perú y Ecuador. La situación sobre el trapecio amazónico se vio acentuada por razón de que la explotación del caucho se volcó en el centro de gravedad de los distintos gobiernos y los grandes emporios industriales. Es allí donde aparecen en el radar personajes como Julio César Arana, “quien en 1910, y sobre la base de sus estaciones caucheras en Colombia, ya era uno de los principales productores suramericanos” (Palacios, 2002, p. 514).

Pugnando la soberanía colombiana y el *modus vivendi* establecido entre Colombia y Perú para el año de 1906, el convenio limítrofe de 1907 de Colombia y Brasil y el acuerdo establecido entre Ecuador y Colombia para el año de 1916, la Casa Arana<sup>2</sup> fue denunciada por delitos tales como “esclavitud, peonaje por deudas y explotación sexual de mujeres” (Palacios, 2002, p. 515), sobreviviendo a todas las investigaciones que se realizaron en su contra y hasta a una encíclica papal. Con lo anterior, la empresa más grande de explotación del caucho se transfiguró en la punta de lanza de los empresarios y aventureros extranjeros, transformándose en una prueba del gobierno central peruano sobre su posesión del trapecio amazónico colombiano.

Si bien uno de los motivos de la pugna se debía a razón de la incomunicación casi total del gobierno central colombiano con estas regiones, esta se vio acrecentada, en un primer momento, con la derrota de un contingente de 70 soldados a manos de tropas peruanas en la Chorrera; y en un segundo estadio, por motivo del fortalecimiento político y económico de Arana. Estando detrás de todos los movimientos peruanos sobre territorios colombianos, “Arana y las elites de Loreto no se dieron por vencidos”, llegando a patrocinar un “grupo armado de policía y civiles peruanos que, sin disparar un solo tiro, coparon la guarnición colombiana de Leticia”, el 1 de septiembre de 1932 (Palacios, 2002, p. 517).

Incluyéndose el desconocimiento del tratado fronterizo firmado en el año de 1922 entre Colombia y Perú, el gobierno de Luis Miguel Sánchez Cerro “reconoció la “junta patriótica” establecida en Leticia”, dando así inicio al conflicto colombo-peruano (Palacios, 2002, p. 517). Dos de las

<sup>2</sup> Empresa de Julio César Arana, más tarde conocida como la Peruvian Amazon Rubber Company, registrada en Londres y en la que “participaban capitalistas del reino” (Palacios, 2002, p. 515).



Figura 1 Aplicabilidad del modelo  
 Fuente: Croquis del Sur de Colombia-Conflicto con el Perú. (Boy, 2009, 203).

batallas cruciales que ayudaron a solventar la problemática de Colombia con su vecino del sur, fueron la batalla de Tarapacá y la batalla de Güepí. Si bien el asedio conjunto sobre las tropas peruanas apostadas en Güepí marcó la pauta militar para negociar el fin del conflicto en la sociedad de naciones<sup>3</sup>, no hay que perder de vista que fue en Tarapacá donde se comenzó a recuperar el territorio perdido a manos peruanas. Si bien fue en tal asedio sobre dicha población colombiana, aledaña a Leticia, donde se logró la victoria por medio de un bombardeo contraofensivo, fue en Güepí donde la aviación colombiana conquistó la supremacía aérea necesaria para convencer a las fuerzas militares del Perú a reevaluar su actuar; con sus acciones, la Fuerza Aérea Colombia puso en consideración de dichos grupos el costo-beneficio de no realizar lo solicitado por la institucionalidad colombiana, como se examina a continuación.

### La hora de la verdad...

Mostrándose displicente y escéptico durante su estancia en Manaus, el general Alfredo Vásquez Cobo llegó a darle a la aviación militar colombiana de la década de 1930, la relevancia y estima que esta merecía después de ver los resultados de acciones tales como la batalla de Tarapacá del 15 de febrero de 1933. No obstante, surge la incertidumbre de cuáles fueron las razones que motivaron tal cambio.

3 Pasados casi dos meses exactos de la batalla de Güepí, Herbert Boy recibe un radio en donde el presidente Olaya Herrera le indicó la suspensión de las hostilidades luego que el Perú hubiese aceptado “la fórmula de arreglo que había sido propuesta para solucionar el conflicto” (Boy, 2002, p. 232).

Ubicada sobre el río Caquetá, la base de Puerto Boy se construyó a razón de la distancia mediada entre la base de Palanquero y el teatro de operaciones del sur durante el conflicto con el Perú. Las operaciones militares en el sur hacían impositivo el establecimiento de una base aérea situada a distancia prudencial de la frontera colombo-peruana (Villalobos, 1993, p. 56).

Edificada con el fin de proveer protección aérea a las distintas guarniciones ubicadas en el trapecio amazónico colombiano, la base de Puerto Boy contó con la facilidad de extensas y amplias aguas rectilíneas del río Caquetá al ser ubicada en frente de Caucajá. Gozando con riberas que estaban varios metros sobre el nivel de las aguas, y poseyendo capas vegetales suficientes para el autoabastecimiento por medio de la agricultura<sup>4</sup>, los medios de subsistencia de este paraje distaba mucho de los que poseía la escuela de formación en aviación militar y sus planicies, o de los de la base de Palanquero y su centralidad en el territorio nacional:

La carencia de medios y de materiales y la ingente dificultad para llevar estos elementos desde el interior del país, dada la absoluta ausencia de vías de comunicación, obligaban a acometer un proyecto de instalaciones rústicas cuya urgencia no admitía pérdida de tiempo. (Villalobos, 1993, p. 56)

4 Al acuatizar vimos que en efecto la tierra se esponjaba, elevándose a unos quince metros de altura sobre el nivel del río, y era un lugar seco y adecuado para nuestros proyectos (Boy, 2009, p. 204).



Figura 2. Flotilla de Hawk II F-11  
Fuente: Boy (2009, p. 237)



Figura 3. Flotilla de Osprey C-14  
Fuente: Boy (2009, p. 238)

A tal terreno selvático se le sumaba una serie de enemigos contra los cuales tuvieron que luchar los hombres que participaron en la campaña del sur. Considerada como una prisión para las tropas, la selva amenazaba la existencia dada la cantidad de pantanos y miasmas que habitaban en esta, enfermando a cada humano que en ella habitara a razón que doblegaba de forma rápida su resistencia. No obstante, dichos desafíos no fueron piedra de tropiezo para que Puerto Boy no pudiera ser dotada con rampas para los aviones que intervinieron en el conflicto; ranchos y casas de

madera, bodegas para materiales, alojamientos para tropas, estación de radio, muelle-atracadero, puesto de sanidad, comedores, cuartel, servicios sanitarios, abastecimiento de agua y sementeras y hortalizas para la supervivencia.

La infraestructura mencionada soportó y proyectó a la victoria sobre el bastión de Guëpi. El parque aeronáutico colombiano destinado para el conflicto, compuesto por 11 aviones de ataque: seis Hawk II F-11, tres Wild X y dos Osprey C-14 de caza y bombardeo (Fuerza Aérea Colombiana, 2014).

Vale resaltar que los indígenas de Curiplaya otorgaron gran apoyo para la realización de un proyecto de tal magnitud, como lo era la base hidroaérea de Puerto Boy. Los nativos tuvieron a cargo la misión de realizar la limpieza de la selva y la construcción de toda la infraestructura que contemplaba la unidad, edificándola en menos de un mes. La ayuda de la comunidad amazónica no solo se limitó a lo vislumbrado, sino que se extendió a tareas tales como el abastecimiento de alimentos o la guía y localización de las tropas de la aviación militar colombiana en la zona (Boy, 2009, pp. 204-206).

A su vez, las fuerzas peruanas no se quedaban atrás en el conflicto; las tropas comenzaron a robustecer sus posiciones en Güepí, teniendo en mente el obstaculizar el paso fluvial colombiano entre Puerto Asís y Caucajá. Haciendo presencia con varias embarcaciones armadas arriba de Puerto Arturo, 140 hombres se movilizaron a la guarnición peruana de Pantoja para así reforzar Güepí. Motivadas por tales movimientos, las fuerzas colombianas fueron engrosadas con un total de 992 hombres que garantizaban acciones sobre Caucajá, El Encanto, Puerto Ospina, Chavaco y Puerto Asís, siendo aprovisionados constantemente por la aviación militar. Con estas acciones, las tropas peruanas vigorizaron el bastión de Güepí al construir zanjas para tiradores y puesto de observación, contando con el apoyo de la base aérea del alto Napo.

Seleccionada la posición de Güepí, partiendo de la perspectiva del Estado de disminuir las hostilizaciones sistemáticas en contra de sus embarcaciones en la cuenca amazónica, el 26 de marzo de 1933 se llevó a cabo la batalla sobre esta. Tal decisión se vio motivada por “la necesidad de despejar la amenaza adversaria en aquellos sitios del río donde el enemigo tenía mayor posibilidad de ejercer control y obstruir el aprovisionamiento” (Villalobos, 1993, p. 66). Aunque aquella determinación fue meditada por los altos mandos, el asedio sobre Güepí sufrió varios retrasos, debidos a la gestión jurídica llevada a cabo por el delegado de Colombia ante la Liga de las Naciones, “Ilovían órdenes y contraórdenes procedentes de Bogotá de acuerdo con el giro de las conversaciones de Ginebra, y la tropa padecía el tedio de la inacción, que es fatal para ejércitos en campaña” (Boy, 2009, p. 230).

La primera orden de ataque llegó el 13 de febrero de 1933, cuando se intensificaron los hostigamientos por parte de las tropas peruanas a la navegación colombiana en el alto Putumayo. A la par que la Liga de las Naciones fallaba parcialmente a favor de las premisas colombianas, “el Comité del Consejo de la Liga, encargado de informar sobre el caso de Leticia, no puede comprender cómo estando el puerto de Tarapacá dentro del territorio colombiano,

había allí guarniciones militares del Perú” (Villalobos, 1993, p. 66). Por otro lado, el general Vázquez Cobo transmitía un ultimátum de rendición a las fuerzas peruanas que estaban dentro del territorio nacional. Tal declaratorio vio la luz ya que en aquellos días la aviación militar peruana emprendió acciones de bombardeo sobre los buques de la Expedición Amazonas, estando ellos aún en aguas brasileñas. La situación se vio agravada como consecuencia del asalto que se produjo a la sede de la Legación de Colombia en la capital de Lima. Aunque la gestión militar tenía clara su proyección sobre el conflicto, el estadio político viraba sus manijas a partir de lo vivenciado en la Liga de las Naciones. Resultado de lo anterior es la emisión de la primera contraorden del 17 de febrero, aplazando toda acción militar en razón del sentido favorable que habían tomado las negociaciones entre Colombia y Perú.

Entretanto, se habían entablado gestiones en Ginebra, ante la Liga de las Naciones; el doctor Eduardo Santos, como delegado de Colombia, procuraba por todos los medios hacer triunfar las tesis jurídicas de la Cancillería de San Carlos, demoliendo la argumentación de los peruanos. No podía entrabarse la gestión de Ginebra emprendiendo acciones militares que debilitaran nuestra posición jurídica, pero tampoco podía descuidarse la preparación de un ataque sobre las guarniciones peruanas, en el caso de que las negociaciones fracasaran. (Boy, 2009, p. 230)

Olvidando el escenario de negociaciones, aeronaves peruanas aumentaban su actividad a lo largo del río Putumayo, llegando incluso a considerar ocupar un islote colombiano aledaño a Chavaco, obligando a los militares colombianos a trabar combate para repelerlos y evitar tal pretensión. Según una información emitida por el coronel Roberto D. Rico, “los peruanos han atacado nuestras canoas procedentes de Puerto Asís sin lograr hacer blanco. Hostilidad interrumpe prácticamente nuestras comunicaciones creando grave situación. Espero órdenes” (Villalobos, 1993, p. 69).

Tales hostilidades por parte del lado peruano motivaron una segunda orden de ataque el 22 de febrero. No obstante, y por segunda vez, dicha orden no se efectuó, teniendo como causa el hecho de que el gobierno peruano venía flexibilizando su férrea posición en la Liga de las Naciones, “sin duda, a esta modificación contribuyó en alto grado el descalabro sufrido por las fuerzas [peruanas] que hubieron de abandonar Tarapacá y la inminencia del ataque colombiano contra Güepí, previsible por las concentraciones en Chavaco” (Villalobos, 1993, p. 70). Lo anterior generó que se detuviera todo asedio contra los navíos colombianos en el alto Putumayo. El cese al fuego en cuestión fue



respondido por el gobierno colombiano al detener la operación el día 28 de febrero.

Finalmente, la ofensiva contra Güepí se desarrolló el día 26 de marzo de 1933. Sin embargo, la operación tenía que sobreponerse a un impase más para poder efectuarse: el general Vásquez Cobo, quien durante su paso por Manaos se manifestó de manera apática frente a la aviación militar. Al momento del movimiento de las flotas aéreas apostadas después de la batalla sobre Tarapacá, el general Vásquez Cobo comenzó a valorar el poder aéreo, a tal punto que, paradójicamente, no permitía ningún movimiento sino era autorizado por él mismo.

Veía que nuestra presencia en Tarapacá ya no era indispensable, puesto que la situación se había fortalecido y los barcos permanecían como centinelas anclados en la orilla. Además, se necesitaba el concurso de la aviación en el alto Putumayo, para otras operaciones militares tendientes a despejar de enemigos las orillas del río.

Expuse al general Vásquez Cobo estos puntos de vista, pero él, que en Manaos se había mostrado tan displicente y escéptico cuando le hablaba de nuestra aviación, ahora exageraba su importancia y por ningún motivo permitía que la dejara abandonada en mitad de la selva. Un día dirigió un radio al presidente Olaya Herrera, con estas palabras: si los aviones no pueden venir a auxiliarnos contra los aviadores peruanos, en breves días nuestra situación será muy grave (Boy, 2009, p. 227)

No obstante, dicho comportamiento fue solventado por motivo que desde el Estado Mayor General se emitió la orden de movilizar la aviación al alto Putumayo, a raíz de que allí era menester tenerla por las razones anteriormente aducidas, permitiéndose el asedio sobre Güepí.

Frente a tal operación, la aviación militar presentaba la orden específica de ser la primera en entablar combate para ablandar las posiciones de su contrincante, brindando apoyo constante al ejército.

Bombardeará las posibles fortificaciones del enemigo, especialmente las que se encuentran detrás de la margen derecha del río, y no se retirará de su radio de acción sino cuando haya constatado que nuestra infantería ha hecho el paso del río e iniciado combate formal. Quedará luego en vigilancia a fin de batir probables aviones enemigos que se presenten y para recibir nuevas tareas que los cambios de situación demanden. (Villalobos, 1993, p. 71)

Es así que a las 08:30 horas decolaron las primeras aeronaves desde la base de Puerto Boy, para hacer entrega de su armamento sobre el bastión de Güepí. Durante un periodo de 8 horas, las 11 aeronaves destinadas para este asedio obligaron a las tropas del contrincante a replegarse a una segunda línea de senderos y zanjas que facilitaban su escape a la población de Pantoja, desviando siempre la atención del antagonista de las maniobras que la Armada y el Ejército realizaban sobre la posición en cuestión. No obstante, la resistencia peruana cedió marcando un triunfo para Colombia hacia las 16:30 horas, ondeando sobre Güepí el pabellón nacional, “se acercaban rápidamente a las orillas, y mientras los aviones castigaban la guarnición enemiga, se llevó el desembarco por dos puntos distintos. La operación fue perfecta por la serenidad y la rapidez con que actuaron las tropas” (Boy, 2009, pp. 230-231).

Fue una victoria decisiva y clara la que se obtuvo en aquella ocasión, a razón que diez bajas se presentaron del lado peruano, sin contar que las tropas colombianas retornaron como prisioneros a 24 combatientes, más otros dos que quedaron heridos (Villalobos, 1993, pp. 71-72) Con lo anterior, a diferencia de la batalla de Tarapacá, el asedio sobre Güepí se convirtió en una operación trascendental.

El influjo que se recibió de las doctrinas militares aéreas de países como Francia, Suiza, Alemania y Estados Unidos<sup>5</sup> en los primeros años de formación de la aviación militar colombiana, claramente marcaron uno de los pilares de victoria sobre Güepí. Fue el proceso de estandarización al que se vio sometida tanto la instrucción como la formación de los aviadores y mecánicos colombianos, las que rindieron frutos en la campaña del sur:

Se abandonaron las prácticas desarrolladas empíricamente, tanto en el área de mantenimiento, como en el de vuelo primario. Se revisaron funciones y roles del personal militar y de instructores, procurando reducir las responsabilidades administrativas de estos últimos a fin de dirigir los esfuerzos a incrementar el número de horas de instrucción en tierra y en vuelo. Aunque los manuales siguieron siendo pocos, se procuró traducirlos lo mejor posible al español y elaborar otros, siguiendo el lineamiento de los existentes e incorporando la experiencia que se había adquirido en los años anteriores. (Peña, 2015, p. 30)

<sup>5</sup> Se menciona este país a razón del “ingreso al escalafón militar de aviadores y mecánicos de aviación formados en el exterior”, que ayudaron a complementar las tareas de las misiones extranjeras *per se* (Peña, 2015, p. 26).

A nivel nacional, tal demostración del poder aéreo puso en evidencia la necesidad de contar con una flota de aeronaves capaz de hacer desistir al contrincante de sus premisas ofensivas, a más de generarse un aumento drástico en la capacidad operativa de la aviación militar. Colombia inició el conflicto del sur contando nada más que con un destacamento de tan solo 16 aviones, siendo que para el final de las hostilidades, el 25 de mayo de 1933, el número de aeroplanos se multiplicó hasta llegar a ser más de 60. Lo mismo ocurrió con el personal de la aviación militar, ya que el grueso de las filas llegó a contar con 27 pilotos y 37 mecánicos, a diferencia de los 12 pilotos y 17 mecánicos que estuvieron presentes al inicio del conflicto (Forero, 1994, pp. 51-52).

### Batalla de Güepí: operación trascendental

Haciendo un recuento de todos los percances y contratiempos que tuvo la aviación militar para poder realizar la operación sobre el bastión de Güepí, es de notar que, por la profesionalización de la técnica y la instrucción de la aviación del momento, y por el imperante papel que los comandantes de las fuerzas militares de la época le otorgaron a la aviación militar, es que la Batalla de Güepí se nombra una victoria decisiva desde el aire.

A la par, la construcción de Puerto Boy y la adquisición y modernización de las flotas de aeronaves disponibles para el momento del conflicto, dan cuenta de la reflexión que hizo el control central colombiano para adquirir una victoria decisiva desde el aire en los niveles operacional y estratégico. Bastó la simple hazaña de Güepí para determinar el resultado de la campaña y la superioridad militar, las cuales coadyuvaron a gestar las derivaciones políticas negativas a las pretensiones peruanas sobre el trapecio amazónico en los tribunales de la Sociedad de Naciones, fallando a favor de Colombia.

Lo anterior no hubiera sido posible sin antes tener en cuenta que el Estado Mayor General de aquel tiempo cae en razón de la flexibilidad y versatilidad que presenta como principios el poder aéreo, ya que con la retoma de Tarapacá y su posterior y ágil movimiento a Güepí, la aviación militar colombiana demostró su “capacidad de concentrar la fuerza en cualquier lugar y atacar cualquier faceta del enemigo” (Fuerza Aérea Colombiana, 2013, pp. 74). De allí que el asedio sobre tal localidad peruana generara una plata-

forma persistente al tiempo en el interior de la institución, por motivo que en esos días la aviación militar colombiana supo “adaptarse y permitir al comandante modificar los planes de acuerdo con los nuevos escenarios del campo de batalla” (Fuerza Aérea Colombiana, 2013, pp. 62-63).

### Referencias

- Boy, H. (2009). *Una historia con alas*. Bogotá, Colombia: Fuerza Aérea Colombiana.
- Braudel, F. (2006) La larga duración. *Revista Académica de Relaciones Internacionales*, (5), 1-36.
- Di John, J. (2010). Conceptualización de las causas y consecuencias de los Estados fallidos: una reseña crítica de la literatura. *Revista de Estudios Sociales*, (37), 46-86.
- Forero, O. (1994). *75 años en los cielos patrios*. Bogotá, Colombia: Fuerza Aérea Colombiana.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2013). *Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial (MADBA)*. Cuarta edición. Bogotá. [https://cdn.fac.mil.co/sites/default/files/manual\\_de\\_doctrina\\_basica\\_aerea\\_y\\_espacial\\_mabda\\_fac-0-e\\_publico.pdf](https://cdn.fac.mil.co/sites/default/files/manual_de_doctrina_basica_aerea_y_espacial_mabda_fac-0-e_publico.pdf)
- Fuerza Aérea Colombiana. (2014). *V. El conflicto fronterizo*. Bogotá. Recuperado de <https://www.fac.mil.co/v-el-conflicto-fronterizo>
- Goberna, J. (2003). Fernand Braudel, la civilización y la larga duración. *Cuadernos de Estudios Gallegos*, 50(116), 213-255.
- Losada, F. (2014). Poder aéreo como herramienta de coerción. *Taktika*, 5(9), 12-19.
- Marín, A., Esquivel, R., Castiblanco, C., Garzón, D., Castrillón, J., Cotrina, N., Santos, M., Echeverry, A., García, J., Barón, L., Gómez, J., Tiuso, A., Benavides, E., Guzmán, A., Jaimes, G. (2017). *Victorias desde el aire: la Fuerza Aérea Colombiana y el término del conflicto armado*, (p. 664). Segunda edición. Bogotá: Grupo Editorial Ibáñez.
- Palacios, M., y Safford, F. (2002). *Colombia. País fragmentando, sociedad dividida. Su historia*. Bogotá, Colombia: Editorial Norma.
- Peña, Y. (2015). *De la subordinación a la autonomía: la profesionalización militar en la construcción de la aviación militar colombiana. 1920-1936*. (Tesis de maestría). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Villalobos, J. (1993). *Historia de las fuerzas militares. Fuerza Aérea*. Bogotá, Colombia: Planeta Colombiana Editorial S. A.



Tecnología e Innovación

Technology and Innovation

Tecnologia e Inovação



## ESTUDIO COMPARATIVO DE APLICACIONES MÓVILES (APP), EN EL ERROR DE MEDICIÓN CON AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA (RPA)<sup>1</sup>

COMPARATIVE STUDY OF MOBILE APPLICATIONS (APP), IN THE MEASUREMENT ERROR WITH REMOTELY PILOTTED AIRCRAFT (RPA)<sup>2</sup>

ESTUDO COMPARATIVO DE APLICAÇÕES MÓVEIS (APP), NO ERRO DE MEDIÇÃO COM AERONAVE PILOTO REMOTA (RPA)<sup>3</sup>

Juan Francisco Guzmán Zabala<sup>4</sup>

Jorge Mario Paternina<sup>5</sup>

Julián Andrés Rodríguez Cárdenas<sup>6</sup>,

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Bogotá, Colombia.

---

### CIENCIA Y PODER AÉREO

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-9468 / Volumen 13 / Número 2 / julio-diciembre de 2018 / Colombia /pp. 78-88

Recibido: 28/01/2018

Aprobado por evaluador: 29/04/2018

Doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.603



#### Para citar este artículo:

Guzmán, J. F., Paternina, J. M., y Rodríguez, J. A. (2018). Estudio comparativo de Aplicaciones Móviles (APP), en el error de medición con Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA). *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(2), 78-88. doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.603

<sup>1</sup> Este artículo es producto de una investigación terminada y los resultados fueron tomados de la ejecución del proyecto: "Caracterización e implementación de tecnologías de aeronaves remotamente tripuladas para levantamiento topográfico inspección de redes eléctricas e inspección de fachadas y terrazas". El proyecto se inició el 20 de marzo de 2017 y finalizó el 20 de diciembre de 2017, fue financiado y ejecutado por el SENA.

<sup>2</sup> This article is the product of a completed research and the results were taken from the execution of the project: "Characterization and implementation of remotely manned aircraft technologies for topographic survey, inspection of electrical networks and inspection of facades and terraces." The project began on March 20, 2017 and ended on December 20, 2017, was financed and executed by SENA.

<sup>3</sup> Este artigo é o produto de uma investigação concluída e os resultados foram retirados da execução do projeto: "Caracterização e implementação de tecnologias de aeronaves tripuladas remotamente para levantamento topográfico de redes elétricas e inspeção de fachadas e terraços". O projeto teve início em 20 de março de 2017 e terminou em 20 de dezembro de 2017, e foi financiado e executado pelo SENA.

<sup>4</sup> Ingeniero forestal. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera. Grupo de Investigación CTCM SENA Bogotá. Bogotá D. C., Colombia. Correo electrónico: jfguzmanz@sena.edu.co

<sup>5</sup> Ingeniero civil. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera. Grupo de Investigación CTCM SENA Bogotá. Bogotá D. C., Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2303-9149>. Correo electrónico: jmpaternina@sena.edu.co

<sup>6</sup> Ingeniero aeronáutico, piloto comercial de avión. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera. Grupo de Investigación CTCM SENA. Bogotá, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5862-9045>. Correo electrónico: julianr5827@hotmail.com

**Resumen:** En la topografía actual se vienen incorporando las nuevas tecnologías de RPA para la medición de áreas, reduciendo los tiempos de toma de datos e incorporando las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) a través de las APP, facilitando su control y operación, haciendo hoy en día la toma de datos sistemática e intuitiva. En el presente artículo se reportan las 5 principales APP usadas en el mercado de fotogrametría, con el objetivo principal de evaluar el error de medición asociado a cada una de ellas, a través de la construcción de ortomosaicos con la cámara ZENMUSE X3 (FC350) de resolución de 12 Mp del dron DJI Inspire 1, estableciendo puntos de control a través de estaciones topográficas con precisión al milímetro, con la finalidad de hallar el error asociado a cada uno de los ortomosaicos construidos con las diferentes APP. Se encontró que el margen de error promedio para todas las APP es de 1.11 %, de igual manera, se pudo determinar que la altura mínima para marcación de puntos de control con cámara de 12 Mp es de 60 m, la precisión en la medición mejora en 0.35 %, siendo la mejor APP DroneDeploy, con un error promedio de 0.66 %. Ofreciendo una alternativa tecnológica importante para mejorar el desempeño en servicios topográficos.

**Palabras clave:** Altura de vuelo, APP, error de medición, fotogrametría, RPA.

**Abstract:** The current topography incorporates the new RPA technologies for measuring areas, reducing data collection times and incorporating Information and Communication Technologies (ICT) through PPPs, facilitating their control and operation, making today systematic and intuitive data collection. This article reports the 5 main APPs used in the photogrammetry market, with the main objective of evaluating the measurement error associated to each one of them, through the construction of ortho-mosaic with the ZENMUSE X3 camera (FC350) of 12 Mp resolution of the drone DJI Inspire 1, establishing control points through topographic stations with millimeter precision, in order to find the error associated to each one of the ortho-mosaic built with the different APPs. It was found that the average margin of error for all APPs is 1.11 %, likewise, it could be determined that the minimum height for marking Control Points with 12 Mp camera is 60 m, the accuracy in the measurement improves by 0.35 %, being the best APP DroneDeploy with an average error of 0.66 %. Offering an important technological alternative to improve performance in topographic services.

**Keywords:** Flight height, APP, measurement error, photogrammetry, RPA.

**Resumo:** Na topografia atual eles estão incorporando novas tecnologias RPA para medir áreas, reduzindo a coleta de dados de tempo e incorporando Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) a través da APP, facilitando o controle e operação, fazendo hoje no dia coleta de dados sistemática e intuitiva. Neste artigo relatou a 5 maior APP usado na fotogrametría mercado, com o objetivo principal de avaliar o erro de medição associado a cada, a través da construção de orthomosaics com X3 cámara ZENMUSE (FC350) de resolução Dron 12 Mp DJI Inspire 1, estabelecendo postos de controle por meio de estações de pesquisa com precisão milimétrica na ordem de encontrar o erro associado a cada orthomosaics construídos com APP diferente. Verificou-se que a margem de erro médio para todos APP é 1.11 %, da mesma forma, foi determinado que a altura mínima para traçando cámara de control 12 é 60 m Pf, a precisão da medição melhora em 0.35 %, sendo o melhor APP DroneDeploy com um erro médio de 0.66 %. Oferecendo uma importante alternativa tecnológica para melhorar o desempenho em serviços topográficos.

**Palavras-chave:** Altura do vôo, APP, erro de medição, fotogrametría, RPA.

## Introducción

El smartphone (término en inglés), también llamado teléfono inteligente, es un término comercial para denominar a un teléfono móvil que ofrece más funciones que un teléfono móvil común. Soportan al menos un correo electrónico y la función de un organizador de aplicaciones. Los smartphones permiten la instalación de programas o aplicaciones (De Luca, 2017, pp. 1-2).

De acuerdo a De Luca, (2017), el término APP es una abreviatura de la palabra en inglés *application*. Es decir, una APP es un programa, pero con unas características especiales. Características desarrolladas por el fabricante del móvil, por el sistema operativo del móvil o por un tercero.

Siendo el principal objetivo de este estudio evaluar el error de medición asociado a las 5 APP (ver tabla 1) más co-

merciales del mercado, disponibles para smartphone con sistemas operativos Android e IOS.

Teniendo como las principales variables del estudio: Altura de captura de fotografía para la construcción de los ortomosaicos, el error sin puntos de control de tierra o por sus siglas en inglés Ground Control Points (GCP) y el error con GCP. Dichas variables medidas y analizadas en las 5 APP. Variables igualmente usadas por Aira y Ferreira (2015), Perdomo et al. (2016) y Sáez y Beltrán (2015).

Esta evolución tecnológica de acuerdo a INCAE (2017), ha crecido a un ritmo exponencial y no lineal en los últimos 10 años, su avance tan acelerado no da oportunidad a que se incorpore a la formación profesional con la misma velocidad, igualmente la Aeronáutica Civil de Colombia (2015) y Ramírez (2015) manifiestan que la expedición de norma-

Tabla 1. Detalle de prestaciones ofrecidas por las APP

APP	CARACTERÍSTICAS	PRECIO (COP)	SISTEMA OPERATIVO	DRONES COMPATIBLES	LOGO APP	LENGUAJE
DroneDeploy	NDVI + capas de elevación Medida de volumen Mapa + 3D Exportar Shapefile + Contour Export RTK + Coordenadas personalizadas Puntos de control de tierra Modelos digitales del terreno	\$ 8 531 645 / año	Aplicación móvil Android IOS	Mavic Pro - Phantom 4 Pro - Phantom 4 - Phantom 4 Advanced - Phantom 3 Pro - Phantom 3 Advanced - Inspire 1 and Inspire 1 Pro - Inspire 2 (including support for the Zenmuse x5 camera) - Matrice 100 - Matrice 200 - Matrice 600		
Pix4D	Orthomosaics Modelos digitales de elevación (DSM / DTM) Mapas de índice (por ejemplo, NDVI) Medir distancias, superficies y volúmenes No evita obstáculos automáticamente	\$24 750 021/perpetuidad	OS: Windows 7, 8, 10 64 bits, Mac OS (Beta), Linux (Enterprise only)	• DJI - Phantom 4 Pro - Phantom 4 - Mavic Pro - Inspire 2 - Inspire 1 (Pro) - Phantom 3 Professional - Phantom 3 Advanced - Phantom 3 Standard - Matrice 100 - Spark • Parrot - Bebop 2 with Skycontroller 2 - Bluegrass		English, Spanish, Mandarin (zh-CH, zh-TW), Russian, German, French, Japanese, Italian and Korean
PrecisionFlight	CON CONEXIÓN Y SIN CONEXIÓN Ortomosaicos Modelos 3D Herramientas de análisis Mediciones de Volumen nubes de puntos y modelos de superficie digital de datos aéreos MAPAS DE LÍNEAS DE CONTORNO INSPECCIÓN DE FACHADAS	\$ 537 000	Aplicación móvil Android	Phantom 3 Standard Phantom 3 Advanced Phantom 3 Professional Phantom 3 4K Phantom 4 Pro Inspire 1 Inspire 2 Matrice 100 Matrice 600 Mavic Pro		
ALTIZURE	modelos 3D y ortofotos de fotogrametría	free	Aplicación móvil Android IOS	Mavic Pro Inspire 1 (X3 / X5 / X5R) Phantom 4 Series (4 / 4 Pro) Phantom 3 Series (Professional / Advanced / 4K / Standard) M600, M100 A3 / A2 + LB2 (Testing) Inspire 2 (Testing) N3 + LB2		
MAP PILOT	calcular áreas	\$144 000	IOS	Phantom 4 Pro Phantom 4 Mavic Pro Phantom 3 Professional Phantom 3 Advanced Phantom 3 Standard Inspire 1 Inspire 1 Pro Matrice 100 Matrice 600		

Fuente: elaboración propia



tiva sobre el uso de RPA no es acorde con los avances tecnológicos, requiriendo tiempo para la implementación de la norma.

Siendo las primeras tecnologías de punta reportadas tan solo hace 17 años por Cheli (2011) el Sistema de Perfilamiento Terrestre (BLT), que requería igualmente puntos de control terrestre para mejorar su precisión, los BLT median 5000 distancias por segundo contra apenas entre 4 y 5 de las estaciones totales. En poco tiempo se cubre un área con millones de puntos, cuyas coordenadas X Y Z pueden descifrarse y ofrecer una descripción particular de la geometría superficial del elemento.

De 2011 a hoy, Saha et al. (2018) coincide en que los smartphone que incluyen las potentes aplicaciones APP para captura, almacenamiento y procesamiento de datos, en combinación con drones de última generación a bajos costos, ofrecen una alternativa más que considerable para las mediciones y con cada vez menos errores de medida, gracias a que los drones en la actualidad se soportan en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), así mismo, las tecnologías relacionadas con la configuración de la aeronave constituyen la tendencia con mayor actividad inventiva con 779 invenciones a 2015 (CIGEPI, 2015, p. 32).

Según Putch (2017), los drones se están convirtiendo rápidamente en los medios de referencia para la colección de fotografías aéreas a pedido de sectores productivos, tales como la construcción y la topografía. La capacidad de capturar rápidamente imágenes generadas por drones y el uso de APP de fotogrametría basadas en la nube para procesar mapas ortomosaicos de alta calidad, brinda a los profesionales la capacidad de realizar mediciones lineales punto a punto, sin la necesidad de capturar datos manualmente en áreas peligrosas, incluyendo sitios de trabajo como: vías, minas, terrazas y otras estructuras elevadas, así como de difícil acceso (UPM, 2010, p. 2).

Si bien las técnicas de fotogrametría proporcionan eficiencia y una mayor seguridad, Díaz (2015) opina que se ha cuestionado la precisión de estas medidas planimétricas sin base argumentativa.

Finalmente, cabe destacar que el documento abarca inicialmente en la metodología: el tipo de estudio, los equipos empleados para la captura de datos, las APP empleadas para la captura y procesamiento de datos, las variables a considerar, así como la metodología empleada para establecer los puntos de control. De igual manera los resultados de la investigación, una discusión frente al contexto actual de la tecnología y sus posibles aplicaciones en el ámbito laboral, finalmente las conclusiones obtenidas de

la ejecución del proyecto y referencias bibliográficas respectivas.

## Metodología

### Tipo de estudio

Estudio de carácter cuantitativo-comparativo, de fuente de datos primaria, transeccional en la recogida de información y cobertura muestral del 100 % para el área total del predio estudiado.

### Equipos empleados

En este artículo se empleó la metodología de López (2014) en su tesis de maestría, "Planificación de vuelos fotogramétricos para U.A.V. sobre cliente QGIS". Exploramos la precisión relativa de las mediciones bidimensionales de los modelos generados con imágenes recopiladas del dron DJI Inspire 1 con cámara de 12 Mp ZENMUSE X3 (FC350), que según Winn (2017) la marca DJI y el modelo Inspire, es uno de los modelos de drones más populares en el mercado para mapeo.

### Especificaciones técnicas de la cámara

De acuerdo con DJI (2016) la cámara ZENMUSE X3 (FC350), posee un sensor con tamaño de 6.17 x 4.55 mm, Tipo CMOS, Pixeles efectivos 12.4 M, rango de ISO entre 100 a 3200 y un lente con óptica de 20 mm (35 mm formato equivalente) f/2.8 aumentos at  $\infty$ , iris F/2.8, diagonal FOV 94, rango equivalente a 20 mm, distorsión del 0.90 %, rango de enfoque infinito (DJI, 2016).

La tecnología más puntera de DJI ha sido implementada en la rótula de estabilización de la cámara Zenmuse X3, para mantener la cámara bien estabilizada en el cielo, asegurando conseguir una fotografía estable y profesional todas las veces (DJI, 2016).

La rótula de estabilización en 3 ejes recibe un flujo continuo de datos del mando de control inteligente, así sabe en todo momento los parámetros de vuelo de la aeronave y calcula la corrección de movimiento necesaria al milisegundo. La velocidad angular, el momento, la fuerza inercial, e incluso los datos de GPS permiten al estabilizador aplicar la potencia y fuerza correctas en cada situación para mantener la cámara perfectamente nivelada sin importar cómo vuele (DJI, 2016).

### Captura de la información

La información se capturó utilizando las 5 APP más reconocidas en el mercado: DroneDeploy, Pix4D, PrecisionFlight, Altizure y Map Pilot. Los datos resultantes fueron procesados en la versión desktop de cada APP correspondientemente, versiones de prueba gratuita por periodo de 30 días, con apoyo de equipos topográficos para los GCP, em-

pleados en las instalaciones del SENA, Centro de Diseño y Metrología, ubicado en el municipio de Bogotá D. C.

De igual manera, la información resultante se validó con los informes técnicos correspondientes de Putsch (2017), Küng et al. (2011), Bernard (2017) y Madawalagama (2016).

**Variables a considerar**

Las principales variables a considerar en el estudio comparativo fueron: Altura de captura de fotografía para la construcción de los ortomosaicos, el error sin GCP y el error con GCP.

No se contemplaron otras variables como velocidad del viento, ya que la cámara posee estabilizador de alta precisión, tampoco temperatura, ni humedad, en vista de que no se reportan estudios que demuestren que la variación en la temperatura o humedad afectan las variables que generan el error de muestreo.

**Tamaño de la muestra**

Se consideró el 100 % del área del predio como tamaño de la muestra equivalente a 20 282.96 m<sup>2</sup> al poseer como línea base los planos originales de las instalaciones del SENA, Centro de Diseño y Metrología, ubicado en el municipio de Bogotá D. C.

**Numero de muestras**

El número de muestras se determinó con base a la metodología empleada por López (2014) en su tesis de maestría "Planificación de vuelos fotogramétricos para U.A.V. sobre cliente QGIS", haciendo una correlación respecto al área empleada por López (2014) y el tamaño del área de 20 282.96 m<sup>2</sup> reportada por los planos de línea base.

**Puntos de control**

Para probar la precisión de dos mediciones dimensionales, se estableció un GCP en el techo de las oficinas del SENA, Centro de Diseño y Metrología. Esto se muestra en la figura 1. Además de los GCP, este sistema de control definió las distancias de control con longitudes conocidas, proporcionadas por los planos originales de la sede. Estas distancias de control se compararon con mediciones realizadas con las APP de fotogrametría a través de fotografías capturadas con el dron.

Para los GCP se usaron 110 marcadores que se colocaron en los vértices de las edificaciones. Las distancias de control entre cada marcador se midieron manualmente usando una cinta métrica de metal, y se verificaron con el equipo Leica Laser Distance Meter.

**Recolección de datos aéreos**

Posteriormente, se recopilaron datos aéreos en más de 80 vuelos individuales utilizando el dron DJI inspire 1 con cámara de 12 Mp ZENMUSE X3 (FC350) y las APP: DroneDeploy, Pix4D, PrecisionFlight, Altizure y Map Pilot. Se llevaron a cabo 4 vuelos para cada una de las siguientes alturas: 20 metros, 30 metros, 60 metros y 120 metros sobre la superficie del predio y para cada una de las aplicaciones, con un total de 16 vuelos por APP, 80 vuelos en total para las 5 APP, sin sobrepasar los 152 metros de altura como lo estipula el numeral 7.3, inciso (f) de la Circular Reglamentaria expedida por la Aeronáutica Civil de Colombia n.º 002 de 2015: "requisitos generales de aeronavegabilidad y operaciones para RPAS (numeral 4.25.8.2)".

**Captura de datos del punto de control terrestre**

Para recolectar los datos del punto de control de tierra, se colocaron 4 objetivos adicionales en los vértices de la terra-

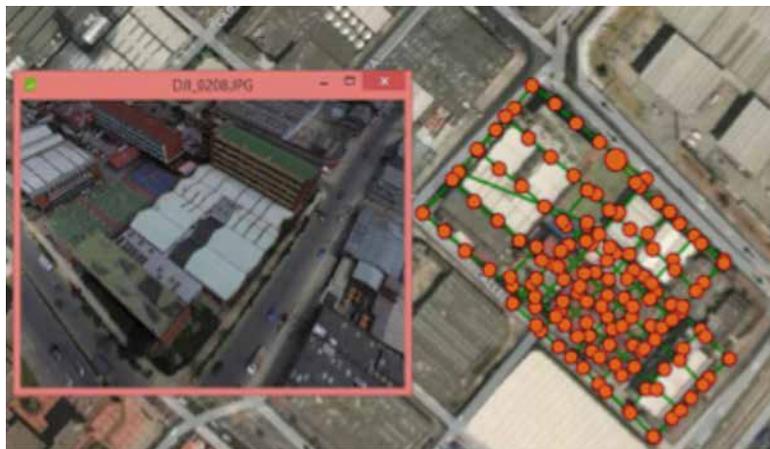


Figura 1. Puntos establecidos para el GCP  
Fuente: elaboración propia



za del edificio principal del Centro de Diseño y Metrología. Las ubicaciones geográficas del centro de estos objetivos más grandes se registraron con los equipos: Emlid Reach RS y Trimble Catalyst.

En la figura 2 se puede ver un mapa aéreo procesado de la configuración del GCP. Una vez que se configuró la estación de tierra, se usó un DJI Inspire 1 para mapear el techo una vez más a elevaciones de 20 metros, 30 metros, 60 metros y 120 metros.

Para comprender mejor la desviación estándar y el margen de error promedio, se tomó una muestra estadística utilizando el Dji Inspire 1, volando planes de misión idénticos con captura de GCP a una altura de 20 metros, se completaron un total de 6 vuelos adicionales. De manera similar, se creó un conjunto de datos final sin GCP al volar el Dji Inspire 1 a 20 metros, 10 veces más. Este método se adoptó para aproximar la variación presente en la precisión de medición lineal al mapear una ubicación en las mismas condiciones.

#### Análisis estadísticos de los errores en las mediciones

Para el estudio se calculó la media aritmética (fórmula 1), desviación de la media (fórmula 2), desviación promedio (fórmula 3), desviación estándar (fórmula 4) y error probable (fórmula 5).

Fórmula 1

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{n} = \frac{\sum X}{n}$$

$\bar{X}$ : Media aritmética

$X_1, X_2, X_N$ : Lecturas tomadas

$n$ : Número de lecturas tomadas

Fórmula 2

$$d_i = X_i - \bar{X}$$

$d_i$ : Desviación de la media

$X_i$ : Lecturas tomadas

Fórmula 3

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n}$$

D: desviación promedio

$n$ : Numero de lecturas tomadas

Fórmula 4

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum d_n^2}{n - 1}}$$

$\sigma$ : Desviación estándar

$n$ : Numero de lecturas tomadas

Fórmula 5

$$r = \pm 0.6745 \times \sigma$$

$r$ : Error probable

$\sigma$ : Desviación estándar

## Resultados

En promedio, las medidas lineales son precisas dentro del 1.11 %

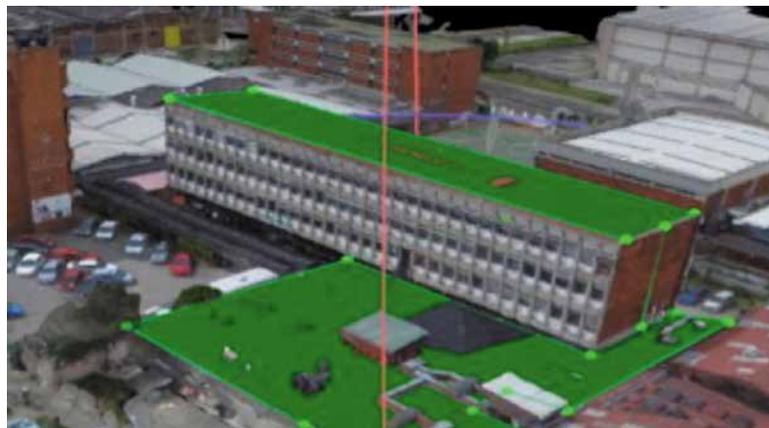


Figura 2. Vista aérea del GCP

Fuente: elaboración propia

Al comparar los datos recopilados en todas las aplicaciones móviles incluidas en el estudio, se encontró que el margen de error promedio para todas las APP es de 1.11 %. Resultado que infiere que el valor del error de medición promedio fue 1.11 % del valor de la longitud de control. Por lo tanto, cuando se mide una longitud de 100 metros, el error promedio será de 1.11 metros. Estos resultados se pueden encontrar en la tabla 2.

Tabla 2. Margen de error sin GCP para las APP

Factor de correlación de altura/ APP	medición 1 (12 m) Error (m)	medición 2 (15m) Error (m)	medición 3 (30 m) Error (m)	Promedio (m)
ALTIZURE	0,142	0,128	0,138	0,14
Pix4D	0,108	0,172	0,102	0,13
PrecisionFlight	0,167	0,246	0,156	0,19
DroneDeploy	0,108	0,115	0,090	0,10
MAP PILOT	0,117	0,121	0,092	0,11
<b>TOTAL</b>				0,13
Error promedio medición (m)	0,129	0,156	0,116	0,13
Error promedio medición (%)	1,1	1,3	1,0	1,11

Fuente: elaboración propia.

De igual manera, se encontró que las APP con el menor % de error son: DroneDeploy con un 0.66 %, seguido de Map Pilot con 0.7 %. Por el contrario, las APP Precision-Flight y Altizure obtuvieron los mayores % de error con 1.18 % y 0.83 % respectivamente.

### Volando bajo la precisión de medición se mejora en 0.35 %

Los datos sugieren que los planes de vuelo realizados con altitudes más bajas producirán mapas con mayor precisión que los que vuelan a elevaciones más altas. Los errores de medición promedio mostraron que el error aumentaría proporcionalmente a la altitud de vuelo con un coeficiente de correlación promedio de 0.99. Esta correlación se visualiza en la tabla 2.

Se encontró una mejora del 0.35 % en la precisión de la medición para los mapas con vuelos a alturas de 20 metros de elevación, en comparación con los vuelos a alturas de: 30 m, 60 m o 120 m (ver tabla 3).

Tabla 3. Coeficiente de correlación de errores de medición asociados a la altitud de vuelo

Altura de vuelo (m)	Medición 1 (12 m) Error (m)	Medición 2 (15m) Error (m)	Medición 3 (30 m) Error (m)
20	0,08	0,08	0,16
30	0,11	0,12	0,26
60	0,17	0,24	0,41
120	0,20	0,27	0,44
Error promedio medición (m)	0,14	0,18	0,32
Error promedio medición (%)	1,16	1,18	1,06

Fuente: elaboración propia.

### La altitud de vuelo es el factor clave para la resolución de las fotos

Se encontró que la altura mínima para la marcación del centro de cada GCP de dimensiones 1 m x 1 m durante el procesamiento de datos del mapa es 60 m con cámara de 12 Mp (figura 3).

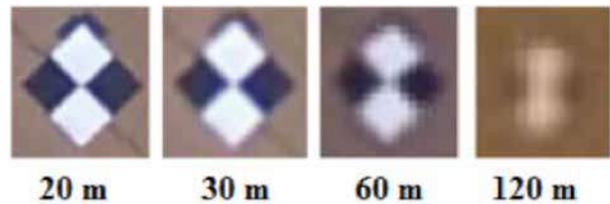


Figura 3. Resolución del mapa visualizada por altitud

Fuente: elaboración propia.

### Los GCP mejoran la precisión de trazado 10 veces

En los 10 mapas procesados con GCP, el error promedio de medición se redujo a 0.012 metros (1.21 centímetros). A diferencia de los mapas que fueron procesados sin GCP, el error promedio no depende de la magnitud de la longitud de control. La longitud de control de 30 metros, que siempre produjo el mayor margen de error cuando se midió en los mapas sin GCP (ver tabla 2), fue la más precisa con un error promedio de 0.32 metros (32 centímetros). Estos pequeños errores también son consistentes y tienen muy poca varianza.

La desviación estándar promedio ( $\sigma_x$ ) de los errores de medición en los mapas con GCP fue  $\sigma_x = 0.02$ , que fue 10 veces menor que los mapas sin GCP, como se muestra en la figura 4.

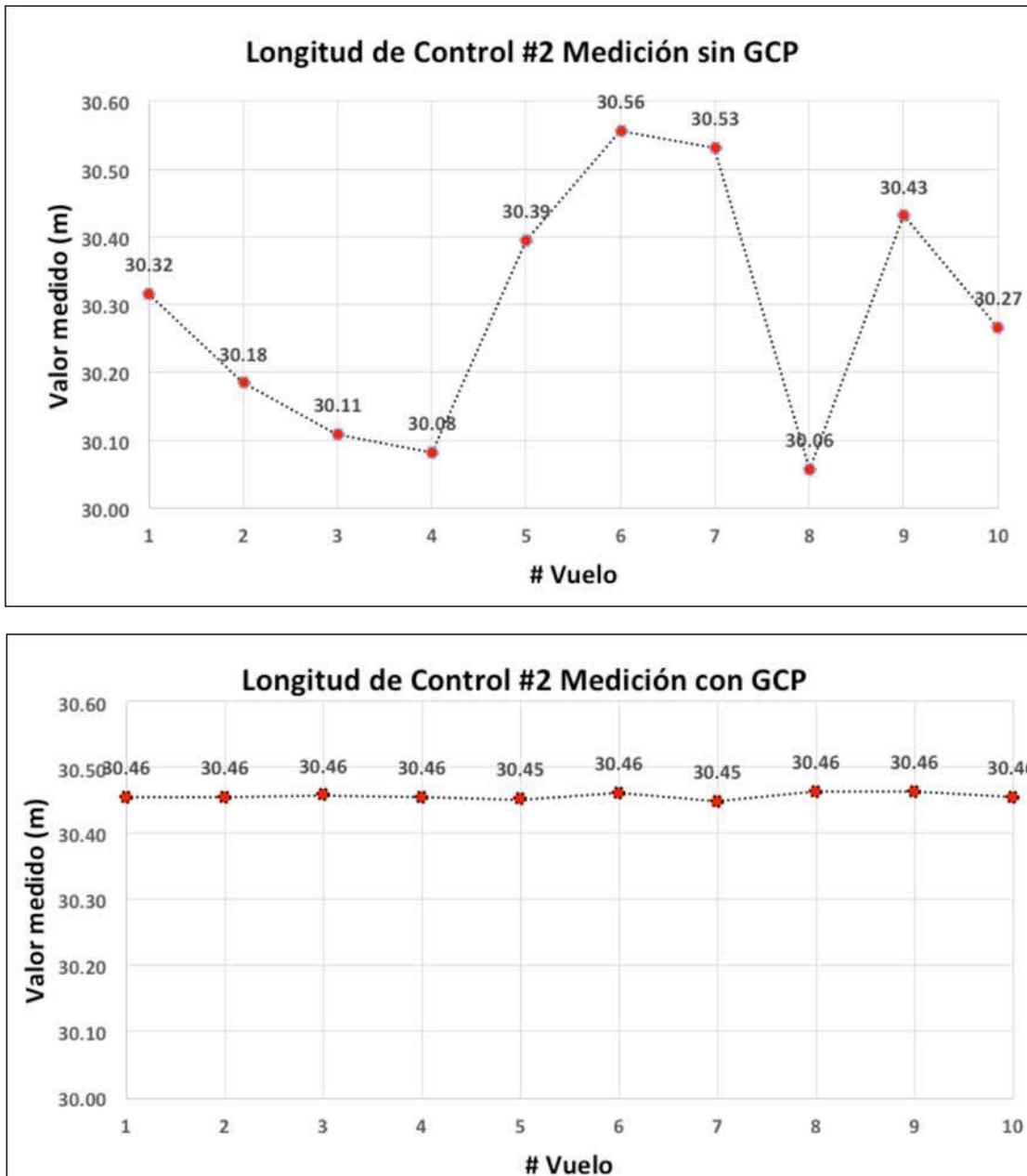


Figura 4. Dji Inspire 1, varianza de medición  
Fuente: elaboración propia.

### Discusión y análisis

De acuerdo con Rojas (2017), en el mundo aproximadamente 260 000 nuevas versiones de APP o nuevas APP se crean en un mes para sistemas Android, siendo las herramientas que hoy en día facilitan las labores cotidianas de trabajo. Esta competencia de mercado es la que genera mejores desarrollos con mejores precisiones cada día.

Se concluye que la APP con el menor margen de error para el cálculo de áreas superficiales a través de fotogrametría con dron es DroneDeploy, APP que tiene un costo

promedio anual de \$8 531 645 COP/ año, descargable para sistemas operativos Android e iOS.

Drone Deploy es adecuada si no se está planeando usar GCP y no requiere un aprendizaje avanzado del software. Básicamente, hace todo el procesamiento por sí solo y un poco de limpieza del aspecto 3D.

Se tiene mucho más control sobre los proyectos con Pix4D desde el inicio en el establecimiento de GCP, incluyendo una gran cantidad de productos adicionales como

curvas de nivel, Digital Surface Model (DSM), Digital Terrain Model (DTM), nubes de puntos, entre otras cualidades.

Sin embargo, Pix4D (versión de escritorio) es más sofisticada y requiere de mayor aprendizaje en el uso del software, pero las exportaciones para incorporar a otro software como Revit o CAD son bastante similares, aunque la versión de la nube de Pix4D cargada desde la versión de escritorio carece de algunas herramientas que posee DroneDeploy como el volumen, por ejemplo, no está disponible en la versión de la nube Pix4D, pero está en la implementación de Drone, solo en la vista 2D, lo que dificulta saber si el usuario está haciendo clic en los puntos correctos para obtener el volumen correcto. En el escritorio de Pix4D, los volúmenes se pueden hacer en 3D para que pueda ver lo que realmente está obteniendo.

Con la realización de los productos cartográficos, se puede observar una opción real del uso de drones en la elaboración de cartografía, no exenta de limitaciones de altura y calidad de las imágenes en lo cual coincide Santos (2014).

Es útil para extensiones de terreno pequeñas y es una opción a tener en cuenta a la hora de realizar levantamientos fotogramétricos rápidos y fiables, sin embargo, Quintero (2012) ha demostrado la factibilidad de llevar a cabo levantamientos aéreos en amplias zonas pequeñas (e.g. 3600 km<sup>2</sup>) utilizando cámaras de formato pequeño, con un tamaño de píxel en el terreno de 0.5 m, un error cuadrático medio (RMS) de posicionamiento en horizontal de 5 a 6 m, incrementándose de manera sensible en zonas montañosas, que permite mejorar la precisión en comparación con las fotografías satelitales y reduce significativamente el coste de la operación (Mitsikostas, 2017).

Al analizar los resultados y según la opinión de Villareal (2015), la densidad adecuada de puntos es de 4 GCP por hectárea de terreno y el mínimo de puntos de control para realizar un levantamiento topográfico de precisión con drones es de 3 GCP, siendo la morfología tipo cruz con punto céntrico la más adecuada para los GCP.

Se evidencia que para el flujo de trabajo fotogramétrico se requiere del apoyo de equipos terrestres para mejorar los resultados (Coello y Ballesteros, 2015, p. 110), equipos como: GPS, estación total, teodolitos u otros utilizados tradicionalmente en el país, se convierten en un complemento de la técnica. Por lo que la metodología estudiada no constituye una solución definitiva a la necesidad de información topográfica, ni excluye el uso de las técnicas topográficas tradicionales, sino que se apoya en ellas para compensar sus propias deficiencias (Claros et al., 2016, p. 214).

Sin dejar de lado el software de procesamiento de datos - SIG, que ofrecen servicios similares a las APP, software

como ArcGIS (Vázquez y Backhoff, 2017) o QGIS (López, 2014), con los cuales también se pueden procesar los datos obtenidos de drones en campo.

Finalmente, no hay que olvidar que el uso de drones está regulado por la Aeronáutica Civil, y para realzar los vuelos se requiere del cumplimiento de la Circular Reglamentaria expedida por la Aeronáutica Civil de Colombia n.º 002 de 2015, antes mencionada.

## Conclusiones

### Vuelos a baja altitud para una mayor precisión de medición

Los datos colectados sugieren que la creación de planes de vuelo a 60 metros facilita la identificación de los puntos de control en tierra con cámaras de mínimo 12 Mp.

Las reducciones exactas del error dependen de la cámara utilizada, para lo cual se recomienda que los pilotos creen planes de vuelo que equilibren las necesidades de la misión con la configuración de vuelo.

Volar más bajo, con una mayor superposición y una superposición lateral, si se pretenden realizar mediciones lineales precisas utilizando el mapa ortomosaico generado por el dron. Esto, por supuesto, dará lugar a una carga útil de imagen más grande para ser procesada dentro del motor de mapa de la APP. Este aumento en las imágenes también tendrá un aumento en el tiempo de carga y procesamiento, para lo cual se recomienda el uso de micro SD mínimo clase 10 para su escritura y almacenamiento.

### Los GCP producen los resultados más consistentes y exactos

La investigación demuestra que puede haber una amplia gama de errores presentes en los conjuntos de datos recopilados utilizando el modelo DJI Inspire 1 y su cámara asociada. El margen de error de medición lineal promedio sin el uso de puntos de control de tierra fue 1.11 % de la longitud de control, sin embargo, los valores de error individuales cayeron en cualquier rango de 0.003048 metros a 2.13 metros.

Si un proyecto requiere tasas de precisión altamente consistentes, o si es necesario realizar determinaciones de misión crítica a partir del conjunto de datos, entonces se deben usar GCP.

Este estudio encontró que el procesamiento con puntos de control de tierra redujo el error promedio de medición a 1.27 centímetros, una mejora de casi 10 veces, para todas las longitudes de control.

Los errores de medición para los mapas GCP también mostraron una reducción similar de 10 veces en la des-



viación estándar del error, lo que significa que los datos GCP no solo son más precisos, sino que también son más consistentes y confiables para las aplicaciones que requieren una mayor precisión.

### La altitud importa al mapear con GCP

Como se mencionó anteriormente, la resolución de la imagen se verá afectada por la altitud. Esto dificultará marcar el centro del GCP cuando se procese el mapa. La precisión no importará si no se puede identificar con precisión el centro del GCP. Los pilotos deben asegurarse de tener esto en cuenta y ajustar la altitud del vuelo para lograr una resolución deseada, que les permita identificar de manera adecuada y confiable el objetivo de GCP dentro de su mapa de drones procesados.

### La fotogrametría en el mundo laboral

La evolución continúa en la medida en que el hombre realiza progresos en su cultura. Estos aportes a la topografía no implican ni mucho menos la preocupación de algunos profesionales, de que los drones van a reemplazar su trabajo de campo. Contrariamente, los drones realizarán nuevos aportes laborales, que al igual que el GPS, las estaciones totales y los escáneres enriquecerán su patrimonio profesional y aumentarán sus niveles de conocimiento.

## Referencias

- Aeronáutica Civil de Colombia. (2015). *Circular reglamentaria n.º 002: Requisitos generales de aeronavegabilidad y operaciones para RPAS (numeral 4.25.8.2)*. Recuperado de <http://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil/certificacion-y-licenciamiento/Documents/PROYECTO%20BORRADOR%20CIRCULAR%20RPAS.pdf>
- Aira, V. G., y Ferreira, M. R. (2015). *Aplicaciones topográficas de los drones*. Recuperado de <http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/otragr/index/assoc/HASH0159/314a3cb8.dir/doc.pdf>
- Bernard, E., Friedt, C., Marlin, F., Tolle, M., Griselin, A. y Prokop, A. (2017). Investigating snowpack volumes and icing dynamics in the moraine of an Arctic catchment using UAV photogrammetry/photogrammetry and LiDAR. *University of Franche Comté*. 1–11. Recuperado de [http://jmfriedt.free.fr/vgc\\_wiley\\_small.pdf](http://jmfriedt.free.fr/vgc_wiley_small.pdf)
- Centro de Información Tecnológica y Apoyo a la Gestión de la Propiedad Industrial - CIGEPI. (2015). *Vehículos aéreos no tripulados, drones y sus sistemas de comunicación*. Superintendencia de Industria y Comercio. Recuperado de [http://www.sic.gov.co/recursos\\_user/documentos/publicaciones/Boletines/Drones.pdf](http://www.sic.gov.co/recursos_user/documentos/publicaciones/Boletines/Drones.pdf)
- Claros, R. A., Guevara, A. E., y Pacas, N. R. (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados*. (Tesis de pregrado). Universidad de El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/14218/1/50108282.pdf>
- Cheli, A. E. (2011). *Introducción a la fotogrametría y su evolución*. La Plata, Argentina: Hespérides.
- Coello, A., y Ballesteros, G. (2015). *Fotogrametría de UAV de ala fija y comparación con topografía clásica*. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de [http://oa.upm.es/34699/1/PFC\\_ALBA\\_COELLO\\_ROMERO.pdf](http://oa.upm.es/34699/1/PFC_ALBA_COELLO_ROMERO.pdf)
- De Luca, G. (2017). *Evolución de las aplicaciones para móviles*. Recuperado de <http://empresarias.camara.es/estaticos/upload/0/007/7438.pdf>
- Díaz, C. J. (2015). *Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. (Tesis de maestría). Universidad Complutense de Madrid. Recuperado de [http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM\\_Juan\\_Diaz\\_Cervignon.pdf](http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf)
- DJI. (2016). ZENMUSE X3 especificaciones. Recuperado de <https://www.dji.com/es/zenmuse-x3/info#faq>.
- INCAE. (2017). *Tecnología Exponencial y la Sociedad 2.0*. Recuperado de [http://comunidadilgo.org/back/\\_lib/file/doc/Tecnologias\\_Exponenciales\\_ILGO.pdf](http://comunidadilgo.org/back/_lib/file/doc/Tecnologias_Exponenciales_ILGO.pdf)
- Küng, O. et al. (2011). *The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-light UAV Imagery*. Recuperado de <https://infoscience.epfl.ch/record/168806>
- López, A. (2014). *Planificación de vuelos fotogramétricos para U.A.V. sobre cliente QGIS*. (Tesis de maestría). Universidad de Oviedo. Recuperado de [digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/28481/3/TFM\\_LopezDelaSierra.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/28481/3/TFM_LopezDelaSierra.pdf)
- Madawalagama, S. L., Munasinghe, N., Dampagama, S., y Samarakoon, L. (2016). *Low cost aerial mapping with consumer-grade drones*. Recuperado de <http://www.geoinfo.ait.asia/downloads/publications/2016-sasanka.pdf>
- Mitsikostas, E. (2017). *Monitorización y optimización de tierras con drones y fotogrametría aérea para aplicaciones de precisión en agricultura*. (Tesis de pregrado). Universitat Politècnica de València. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/86353/MITSIKOSTAS%20-%20Monitorizaci%F3n%20y%20optimizaci%F3n%20de%20tierras%20con%20drones%20y%20fotogrametr%EDa%20a%E9rea%20para%20apli...pdf?sequence=4>
- Perdomo, C., Caicedo, J., Núñez, N., Machado, D., García, J., y Pineda, M. C. (2016). *Establecimiento de puntos de control terrestre para la corrección planialtimétrica de imágenes tomadas por drones*. 1.er Congreso de Geomática. doi: 10.13140/RG.2.1.3415.4640
- Putch, A. (2017). *Linear Measurement Accuracy of DJI Drone Platforms and Photogrammetry*. Informe técnico de DroneDeploy. Recuperado de [https://prismic-io.s3.amazonaws.com/drone-deploy-www%2F46e720cd-fb03-41ec-a6a3-09b424d674b8\\_linear+measurement+accuracy+of+dji+drone+platforms+and+cloud-based+photogrammetry-v1.1.pdf](https://prismic-io.s3.amazonaws.com/drone-deploy-www%2F46e720cd-fb03-41ec-a6a3-09b424d674b8_linear+measurement+accuracy+of+dji+drone+platforms+and+cloud-based+photogrammetry-v1.1.pdf)

- Quintero, J. (2012). *Temas selectos de Geomática: métodos y aplicaciones*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/38>
- Ramírez, J. M. (2015). Aspectos reglamentarios. En Consejería de Economía y Hacienda (Eds.). *Los drones y su aplicación en la ingeniería civil*, 33-48. Madrid, España: Arias Montano S. A.
- Rojas, V. N. (2017). Crecimiento de la APP Colombiana en el mercado nacional e internacional. *Uniempresarial*, 1-12. Recuperado de <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/20220/TMKT%20R741c.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sáez, D., y Beltrán, A. M. (2015). Aplicaciones cartográficas. En Consejería de Economía y Hacienda (Eds.). *Los drones y su aplicación en la ingeniería civil*, 67-76. Madrid, España: Arias Montano S. A.
- Saha, H., et al. (2018). A low cost fully autonomous GPS (Global Positioning System) based quad copter for disaster management: 2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). Las Vegas, NV, pp. 654-660. DOI: 10.1109/CCWC.2018.8301782
- Santos, D. (2014). *Fotogrametría usando plataforma aérea UAV*. (Tesis de pregrado). Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/41806759.pdf>
- UPM, O. (2010). *Ingeniería cartográfica, geodésica y fotogrametría*. OCW UPM - Open Course Ware de la Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de <http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria>
- Vázquez, J., y Backhoff, M. (2017). *Procesamiento geoinformático de datos generados mediante drones para la gestión de infraestructura del transporte*. Sanfandila, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt490.pdf>
- Villareal, J. (2015). *Análisis de la precisión de levantamientos topográficos mediante el empleo de vehículos no tripulados (UAV) respecto a la densidad de puntos de control*. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja. Recuperado de <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/13079/1/Villareal%20Moncayo%20Joffre%20Vicente.pdf>
- Winn, M., Forster, M., Bartlett, C., Cole, H., Engel, S., & Gorrie, J. (2017). *Commercial Drone Industry Trends*. Informe técnico de DroneDeploy. Recuperado de [https://prismic-io.s3.amazonaws.com/dronedeploy-www%2F7cfc75ba-3916-405b-b604-af2f538ad0bd\\_10m\\_acre\\_report\\_2017\\_.pdf](https://prismic-io.s3.amazonaws.com/dronedeploy-www%2F7cfc75ba-3916-405b-b604-af2f538ad0bd_10m_acre_report_2017_.pdf)



Tecnología e Innovación

*Tecnologia e Inovação*

*Technology and Innovation*



## REVISIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL EN RED COMO BASE PARA SISTEMAS SATELITALES DE PEQUEÑA ESCALA<sup>1</sup>

REVIEW OF NETWORK CONTROL SYSTEMS AS A BASIS FOR SMALL-SCALE SATELLITE SYSTEMS<sup>2</sup>

REVISÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE DE REDE COMO BASE PARA SISTEMAS DE SATÉLITE DE PEQUENA ESCALA<sup>3</sup>

Germán Wedge Rodríguez Pirateque<sup>4</sup>

Jorge Sofrony Esmeral<sup>5</sup>

Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica, CETIA - JEA y Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

---

### CIENCIA Y PODER AÉREO

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-9468 / Volumen 13 / Número 2 / julio-diciembre de 2018/ Colombia /pp. 90-125

Recibido: 06/03/2018

Aprobado por evaluador: 26/08/2018

Doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.604



#### Para citar este artículo:

Rodríguez, G. W. y Sofrony, J. (2018). Revisión de sistemas de control en red como base para sistemas satelitales de pequeña escala. *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(2), 90-125. doi: 10.18667/cienciaypoderareo.604

<sup>1</sup> Artículo de revisión asociado al proyecto "Defensa de la soberanía: sistemas de satélites de pequeña escala para servicios aeroespaciales de monitoreo y vigilancia del territorio nacional".

<sup>2</sup> Review article associated with the project "Defense of sovereignty: small-scale satellite systems for aerospace services for monitoring and surveillance of the national territory".

<sup>3</sup> Artigo de revisão associado ao projeto "Defesa da soberania: sistemas de satélite de pequena escala para serviços aeroespaciais para monitoramento e vigilância do território nacional".

<sup>4</sup> MsEng. Estudiante doctorado en Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8617-0558>.

Correo electrónico: gwrodriguez@unal.edu.co; german.rodriguez@fac.mil.co

<sup>5</sup> PhD. Profesor titular asociado al Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia.

Correo electrónico: jsfronye@unal.edu.co

**Resumen:** el presente artículo parte de la premisa complementaria entre sistemas satelitales de gran escala y sistemas en red de pequeña escala que puedan suplir los mismos servicios, por lo tanto, se presentan diferentes enfoques de trabajos desarrollados en torno a los aportes de sistemas de control en red, como fundamento al desarrollo de nuevas tecnologías en la operación de sistemas satelitales y de servicios aeroespaciales, los cuales se han convertido en un desafío permanente para diferentes disciplinas y países en vía de desarrollo alrededor del mundo. En este sentido, se realizó una revisión descriptiva organizada mediante tópicos y descriptores para la búsqueda de factores de diseño en relación con los sistemas de operación y control que han sido fuente de trabajo, tanto para la configuración de constelaciones como de clúster satelitales; logrando con esto identificar las tendencias y aportes que en materia de sistemas multiagente se han desarrollado, así como las pautas necesarias para la formulación de soluciones a las necesidades de coordinación de sistemas de bajo costo, que sean capaces de brindar alternativas sostenibles para países como Colombia frente a la democratización del espacio. Con esta revisión se obtienen como resultados diferentes lineamientos para la definición de requerimientos, la descripción de arquitecturas y modelos de referencia, así como algunos factores de uso en tecnologías comparadas, que en términos prácticos brindan las herramientas para la generación de alternativas de diseño de misión en aplicaciones de seguridad crítica y defensa, que pueden ser extendidas en enfoques de sistemas satelitales multiagente.

**Palabras clave:** sistemas multiagente, arquitecturas satelitales, constelaciones, control en red.

**Abstract:** This article starts from the complementary premise between large-scale satellite systems and small-scale network systems that can supply the same services. Therefore, different approaches to work developed around the contributions of network control systems are presented, as a basis for the development of new technologies in the operation of satellite systems and aerospace services, which have become a permanent challenge for different disciplines and developing countries around the world. In this sense, a descriptive review was organized by topics and descriptors for the search of design factors in relation to the operation and control systems that have been a source of work, both for the configuration of constellations and satellite clusters; achieving with this to identify the trends and contributions that have been developed in the field of multi-agent systems, as well as the necessary guidelines for the formulation of solutions to the coordination needs of low-cost systems, which are capable of providing sustainable alternatives for countries such as Colombia in the face of the democratization of space. With this review, different guidelines for the definition of requirements, the description of architectures and reference models are obtained, as well as some factors of use in comparative technologies, which in practical terms provide the tools for the generation of mission design alternatives. In critical security and defense applications, which can be extended in multi-agent satellite systems approaches.

**Keywords:** multi-agent systems, satellite architectures, constellations, network control.

**Resumo:** Este artigo é baseado na premissa de complementaridade entre os sistemas de satélite, sistemas de rede em grande escala pequena escala que podem fornecer os mesmos serviços, portanto, diferentes abordagens trabalho desenvolvido em torno da rede sistema de controle de entrada são apresentados, como base para o desenvolvimento de novas tecnologias na operação de sistemas de satélite e serviços aeroespaciais, que se tornaram um desafio permanente para diferentes disciplinas e países em desenvolvimento em todo o mundo. A este respeito, uma revisão descriptiva organizado por tópicos e palavras-chave para fatores de design da pesquisa relacionados com os sistemas de comando e controle que têm sido uma fonte de trabalho, tanto para a configuração de grupo de constelações de satélites foi feita; assim, conseguir identificar tendências e contribuições no campo de sistemas multi-agente, foram desenvolvidos e orientações necessárias para formular soluções para as necessidades de coordenação dos sistemas de baixo custo que são capazes de fornecer alternativas sustentáveis para países como a Colômbia contra a democratização do espaço. Com esta revisão são obtidos como resultado diretrizes diferentes para definição de requisitos, descrição de arquiteturas e modelos de referência, bem como alguns fatores utilizar tecnologias comparados, em termos práticos, fornecer ferramentas para a geração de missão alternativas de projeto em aplicações críticas de segurança e defesa, que podem ser extendidas em abordagens de sistemas de satélites multiagentes.

**Palavras-chave:** sistemas multiagentes, arquiteturas satelitais, constelações, controle de redes.

## Introducción

El artículo tiene como objeto la búsqueda de referentes para el diseño de soluciones de bajo costo como alternativa sustitutiva al uso de satélites monolíticos o de gran escala en la prestación de servicios aeroespaciales, de donde surge la necesidad de caracterizar configuraciones y métodos de operación de sistemas de control en red, que sirvan como fundamento para la identificación de soluciones en el uso de satélites de pequeña escala con capacidad de compartir recursos en aplicaciones específicas.

Para el caso particular, se toman como referencia los caminos recorridos e iniciativas que han abordado tanto universidades como entidades públicas o privadas, frente al reto espacial colombiano, así como los avances que en diferentes disciplinas como la robótica, posibilitan el uso de estrategias que puedan tomarse como referentes para los sistemas de control en red satelitales.

Casos particulares son las constelaciones de sistemas de posicionamiento global (GPS) o Iridium, las cuales se pueden considerar como un conjunto o grupo cooperativo de agentes interconectados en red, con características idénticas y en operación centralizada, o como el caso de los clúster, por ejemplo el sistema F6 de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa (DARPA), configurados con equipos heterogéneos en operaciones descentralizadas, con posibles configuraciones de formación en vuelo o enjambres según sea la necesidad de compartir recursos para operaciones tipo (Alvarez & Walls, 2016), como se ilustra en la figura 1, donde se presentan configuraciones básicas de nanosatélites dispuestos para la generación de protocolos de un sistema de control en red tipo clúster.

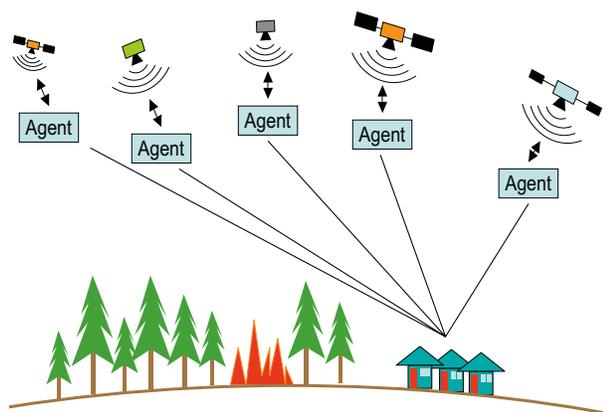


Figura 1. Pequeña comunidad de nanosatélites  
Fuente: Holmes et al, 2012.

En este sentido, el artículo aborda los sistemas en red desde un contexto general dispuesto en la segunda sección, donde se presentan los diferentes requerimientos, servicios y gestores aeroespaciales como base descriptiva de las primeras etapas de un diseño de misión, posteriormente en la sección tres se presentan las diferentes arquitecturas satelitales dentro de las cuales se puedan configurar las necesidades del servicio aeroespacial requerido, en la sección cuatro y cinco se refieren diferentes enfoques de modelos de sistemas en red, para observar las disposiciones y técnicas de configuración de agentes, que finalmente en las secciones seis y siete, se concretan en aplicaciones y tecnologías comparadas para la configuración de sistemas en red que pueden ser aplicados en sistemas satelitales multiagente.

El método de estructuración y análisis de la información se basa en una revisión descriptiva donde se definen tópicos, descriptores y se extraen los principales factores de diseño a ser tenidos en cuenta para la formulación del problema de configuración de los agentes en red que suplan los servicios de satélites de gran escala, como se muestra en la tabla 1, donde se enfatizan los factores de análisis útiles para la estructuración de parámetros y requerimientos de misión de proyectos específicos.

Tabla 1.  
Estructuración de la revisión descriptiva

Sección	Tópico	Descriptores	Factor de análisis
	Requerimientos del sistema en red	<ul style="list-style-type: none"> <li>Generales</li> <li>Logísticos</li> <li>Operacionales</li> </ul>	Diseño de misión y carga útil
II	Servicios y gestores aeroespaciales	<ul style="list-style-type: none"> <li>Segmentos de uso</li> <li>Prospectiva tecnológica</li> </ul>	Operación del sistema
III	Arquitecturas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sistemas</li> <li>Subsistemas</li> </ul>	Configuración del sistema
IV-V	Modelos de referencia – sistemas en red	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diseños de misión</li> <li>Formaciones</li> </ul>	Control del sistema
VI	Seguridad crítica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño orbital</li> <li>Sistemas de prueba</li> </ul>	Pruebas del sistema
VII	Tecnologías comparadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Robótica móvil</li> </ul>	Emulación de sistemas

Fuente: elaboración propia.



## Contexto general

### Requerimientos generales

El reto espacial colombiano demanda no solo la definición de necesidades en servicios aeroespaciales, sino también la búsqueda de arquitecturas, modelos estimados, perspectivas de uso, logística, operación e incluso tendencias tecnológicas, para el uso de pequeños satélites frente a los clásicos satélites monolíticos (Abbott, 2000). Como es el caso de la estimación de modelos matemáticos alternativos para las configuraciones de constelaciones, ya sea con topologías clásicas de sistemas y modelos de grafos, o modelos de cooperación, sistemas multiagente, incluso el uso de la fusión sensorica y el análisis de sistemas dinámicos distribuidos con configuraciones de agentes como líder seguidor, entre otros.

### Requerimientos logísticos

La disposición de los servicios aeroespaciales mediante el uso de constelaciones o clúster de pequeños satélites (Álvarez y Walls, 2016), demanda múltiples especificaciones, como el diseño de misión, los sistemas de control en tierra, la administración de los enlaces de comunicaciones, el control de la plataforma satelital, los recursos para la descarga y procesamiento de datos, el personal operativo y de soporte técnico para los movimientos, entre muchos otros requerimientos, según sea el diseño de misión establecido (Engelen, 2016).

### Requerimientos operacionales

El funcionamiento básico de los equipos en red requiere la operación y disponibilidad de recursos en línea 24\*7, con estaciones de trabajo en tierra, tanto para la descarga de datos como para el procesamiento y postprocesamiento, hardware, software, control y ajuste de los sensores a bordo, sistemas de potencia, navegación, propulsión y sistemas de control y determinación de actitud de cada satélite que en adelante se identificarán como los agentes o nodos específicos de las topologías de red y cooperación de recursos de ser necesario (Álvarez y Walls, 2016).

### Servicios aeroespaciales

Los servicios aeroespaciales cubren una amplia gama de necesidades de operación y aprovechamiento de los sistemas satelitales que se puedan estructurar para su implementación (Schilling, 2017), tales como el monitoreo rural o urbano, navegación, inteligencia, meteorología y predicción, vigilancia, adquisición de imágenes, reparación de satélites, observación, teledetección, exploración espacial, comunicaciones, fines científicos, productividad de cultivos, e incluso recolección de basuras espaciales y análisis de los ciclos del agua, la energía y el carbono, entre otros.

La figura 2, ilustra los diferentes segmentos de uso junto con algunas de las alternativas de satélites de pequeña escala, con tecnologías complementarias para su

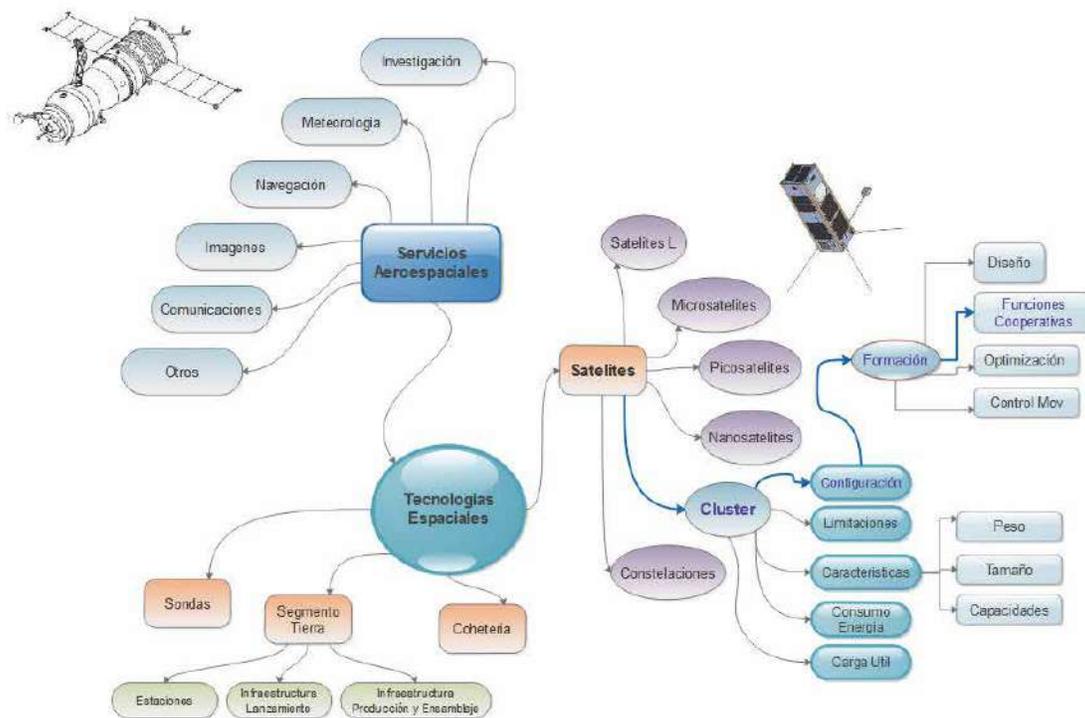


Figura 2. Segmentos de uso  
Fuente: elaboración propia.

puesta en órbita y operación, además de los descriptores requeridos para la configuración de los agentes en red (Poghosyan y Golkar, 2016).

En este sentido, el contexto general presenta no solo las necesidades a través de los servicios aeroespaciales requeridos, sino también algunas estrategias para su implementación e incluso algunos factores que evidencian la necesidad de uso de los sistemas satelitales en territorios de vulnerabilidad, como el caso de incidencia del conflicto armado, la deforestación, el monitoreo y vigilancia de infraestructura de gran escala y la actualización y formación catastral multipropósito, como mecanismos de referencia para el uso apropiado de las tecnologías satelitales (Bouwmeester y Guo, 2010).

En referencia al caso colombiano y abordando las necesidades identificadas de los servicios aeroespaciales, se tienen casos como los sistemas de acceso a teleeducación, telesalud, telemedicina en regiones rurales remotas con infraestructura limitada.

Donde se proyectaría un posible sistema espacial de observación de la tierra para su uso en agricultura de precisión, seguridad alimentaria, manejo sostenible de bosques y recursos hídricos, cambio climático, mitigación y manejo de desastres naturales, que entre otros, son los enfoques y necesidades de aprovechamiento del sistema en red, que han sido propuestos por la Dirección de Colciencias, en el marco de la "Ciencia y tecnología espacial para la paz y el desarrollo sostenible del país".

En esta perspectiva, el sistema de control en red requeriría como mínimo la operación de 8 satélites, capaces de proveer un servicio de contenidos educativos de calidad, a través de un centro de operaciones y contenidos (COC), donde se presten los servicios enlazados con nodos educativos dependientes (NED) e independientes (NEI-Pequeña-Rural) en zonas de alta vulnerabilidad socioeconómica, para

finalmente proveer dichos servicios a las escuelas y aulas, con contenidos, actividades y operaciones de clase mundial.

Estas necesidades están siendo cubiertas con ejemplos como el satélite de educación EDUSAT en la India, lanzado en 2004, con transmisiones de televisión en aproximadamente 31.000 aulas unidireccionales, TV interactiva, videoconferencia y conferencias e instrucción basada en web, con 4.000 aulas interactivas y transmisiones bidireccionales. Otras soluciones como la universidad virtual africana, con 15 estados miembros, 50 instituciones asociadas y 27 países africanos, a través del programa basado en satélite de educación a distancia y e-learning.

Adicional al caso africano, el operador satelital Intelsat en asocio con Mindset Network, intensificaron las operaciones satelitales en Sudáfrica, proporcionando acceso a un ancho de banda gratuito para contenido educativo en las áreas de mayor interés de la zona como VIH/SIDA, tuberculosis, ciencia, matemáticas, informática e inglés, tanto a profesores como estudiantes y trabajadores de la salud.

Por su parte, Brasil ha desarrollado activamente su programa de educación universitaria satelital desde el año 2003, proporcionando intercambio científico en educación, e-learning e información para búsqueda de oportunidades de formación, pasando de 950.000 usuarios desde el 2010 a 3.1 millones proyectados para el 2018.

Entre otros casos de éxito de la aplicación de estas tecnologías para necesidades de desarrollo sostenible, se tienen, la telemedicina en Mongolia, la teleconsulta especializada en Magdalene Islands, cuidado dermatológico en Bangladesh mediante transmisiones telemétricas, telepatología virtual en Egipto, telesiquiatría rural en Wagga Wagga, y telemedicina en Noruega, lo anterior teniendo en cuenta el esquema general de transmisión de datos, ilustrado en la figura 3, con sus respectivos equipos de soporte, tanto para recepción como para envío de información.

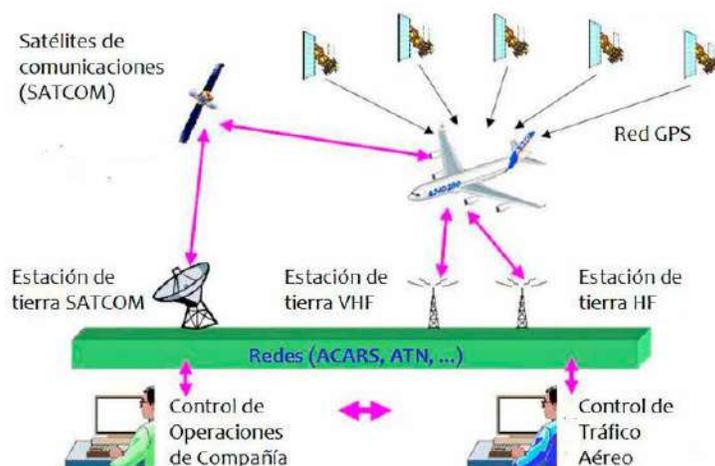


Figura 3. Configuración teleservicios  
Fuente: recuperado de [https://issuu.com/ingbriant/docs/conferencia\\_dr\\_ocampo\\_colciencias/2?ff=true&e=3426849/51545324](https://issuu.com/ingbriant/docs/conferencia_dr_ocampo_colciencias/2?ff=true&e=3426849/51545324)



Por su parte, el concepto de seguridad y defensa articulados con la fuerza pública y empresas con amplia experiencia en soluciones satelitales, plantean otras alternativas que pueden integrar las necesidades de país formuladas previamente.

En este sentido, se plantea una alternativa de uso representada en la disposición de una constelación multi-misión, con unidades de referencia, como se ilustra en la figura 4, con capacidad de 20 nanosatélites de configuración 6U, 14 para comunicaciones multibanda y tracking, 4 para imágenes 5m/pixel con modelo de síntesis de color y región espectral del infrarrojo cercano RGB+NIR y 2 nanosatélites para imágenes de 1m/pixel RGB+NIR, con cobertura continua, centro de integración y lanzamiento.

Con este propósito se buscaría una proyección en transferencia de tecnologías, tanto en gestión del progra-

ma como en diseño de misión, registro satelital, licencia de frecuencias, contratación del lanzador, ingeniería de sistemas, fabricación de componentes, integración, pruebas y campaña de lanzamiento, puesta a punto y operación de los equipos como es el caso de la coordinación de capacidades distribuidas en red respecto al protocolo general de integración de los segmentos de usuario, tierra y espacio.

En esta disposición se consideran todos y cada uno de los elementos requeridos para la operación y enlace general de datos del sistema.

## 2.5 Gestores de servicios aeroespaciales

El desarrollo satelital mundial ha tenido múltiples actores, dentro de los cuales figuran no solo los países líderes (figura 5) respecto al nivel de patentes y actividad inventiva en sistemas de satélites de pequeña escala, sino también los países en vía de desarrollo e incluso las alianzas que



Figura 4. Unidad de referencia tipo CubeSat 3U  
Fuente: GomSpace.

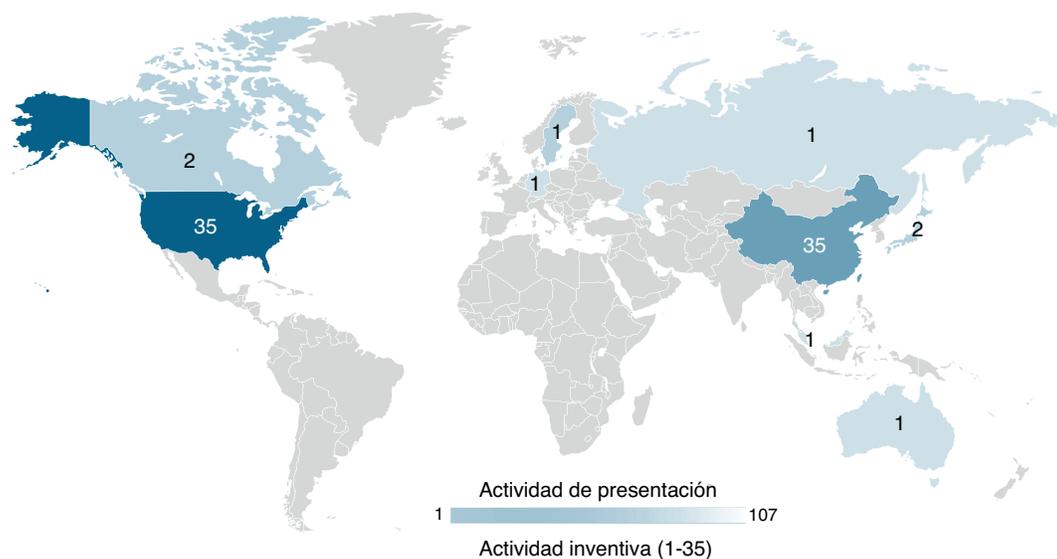


Figura 5. Países líderes según la actividad inventiva y de patentes  
Fuente: (Medina, 2017) Thomson Innovation, Espacenet, USPTO, Latipat, entre otras.

estos han generado para proyectar el concepto espacial tanto en la estrategia como en las capacidades operativas de los diferentes protagonistas.

De igual modo, se han consolidado las capacidades en diferentes agencias y a través de múltiples operadores o empresas gestores del sector aeroespacial como por ejemplo Boeing, Airbus, Space X, Gomspace, Kickstarter, Karten Space, Skycube, NanoRacks, Satellogic, PlanetLab, Wanweb, Terran Orbital, Ideatech, Secoia en la cuota colombiana, entre muchas otras a nivel mundial.

De igual manera en la figura 6, se presentan las diferentes entidades líderes en la generación e impacto de soluciones espaciales.

Con estos referentes de producción inventiva la generación de las cadenas de valor en el sector aeroespacial, han traído a colación la necesidad de evolucionar en todo

el concepto de operaciones y logística frente a la demanda de servicios. Con lo cual una de las tantas opciones que ha sido trazada, es la proyección de capacidades desde los pequeños sistemas satelitales, que de alguna manera posibiliten la búsqueda de servicios particularizados a sus clientes y que suplan la integración de nuevas tecnologías a la vanguardia del sector.

En el crecimiento y demanda del servicio radica el término de “democratización del espacio”, el cual está abriendo las puertas a múltiples posibilidades, con las que se están beneficiando nuevos actores dentro del escenario espacial, incluso la gestión industrial (figura 7), en la representación de productos y servicios requeridos para satélites de pequeña escala; logrando así, vincular diferentes contextos de operación como fabricantes de componentes, diseñadores de misión, gestores tecnológicos, entre otros recursos para la extensión del medio espacial tanto en su aprovechamiento como en su posicionamiento y gestión.

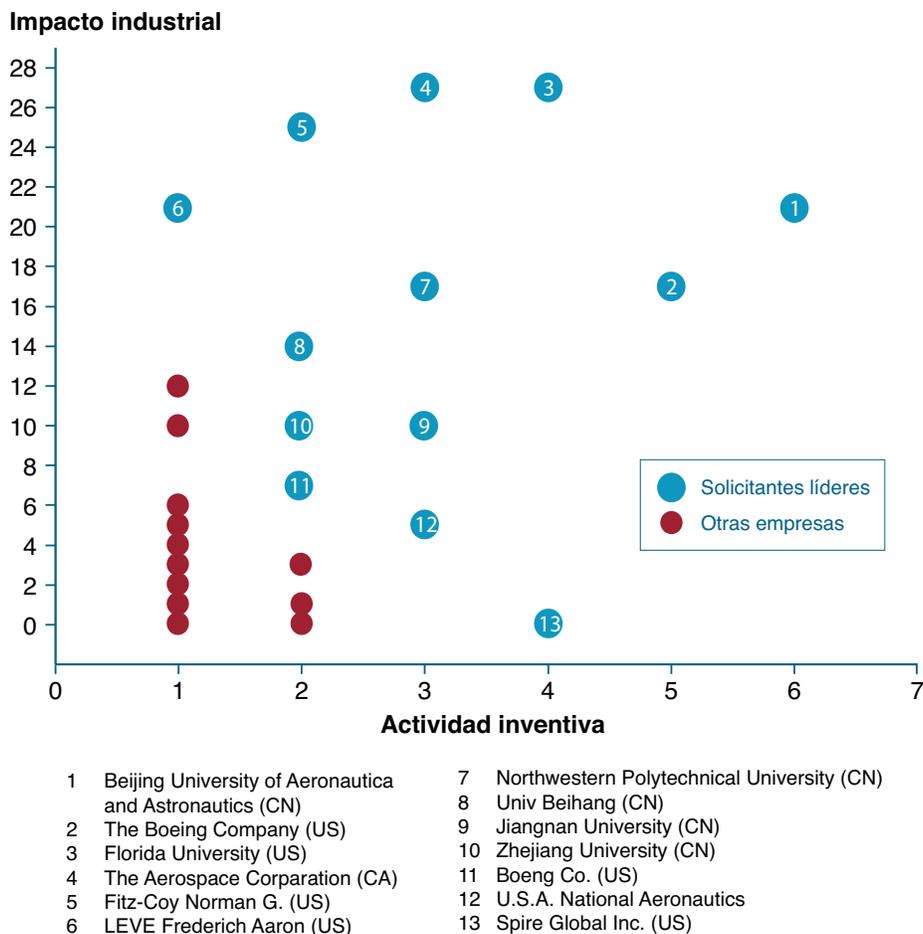


Figura 6. Solicitantes líderes identificados a partir de la relación entre actividad inventiva e impacto industrial

Fuente: Medina, 2017, Thomson Innovation, Espacenet, USPTO, Latipat, entre otras.

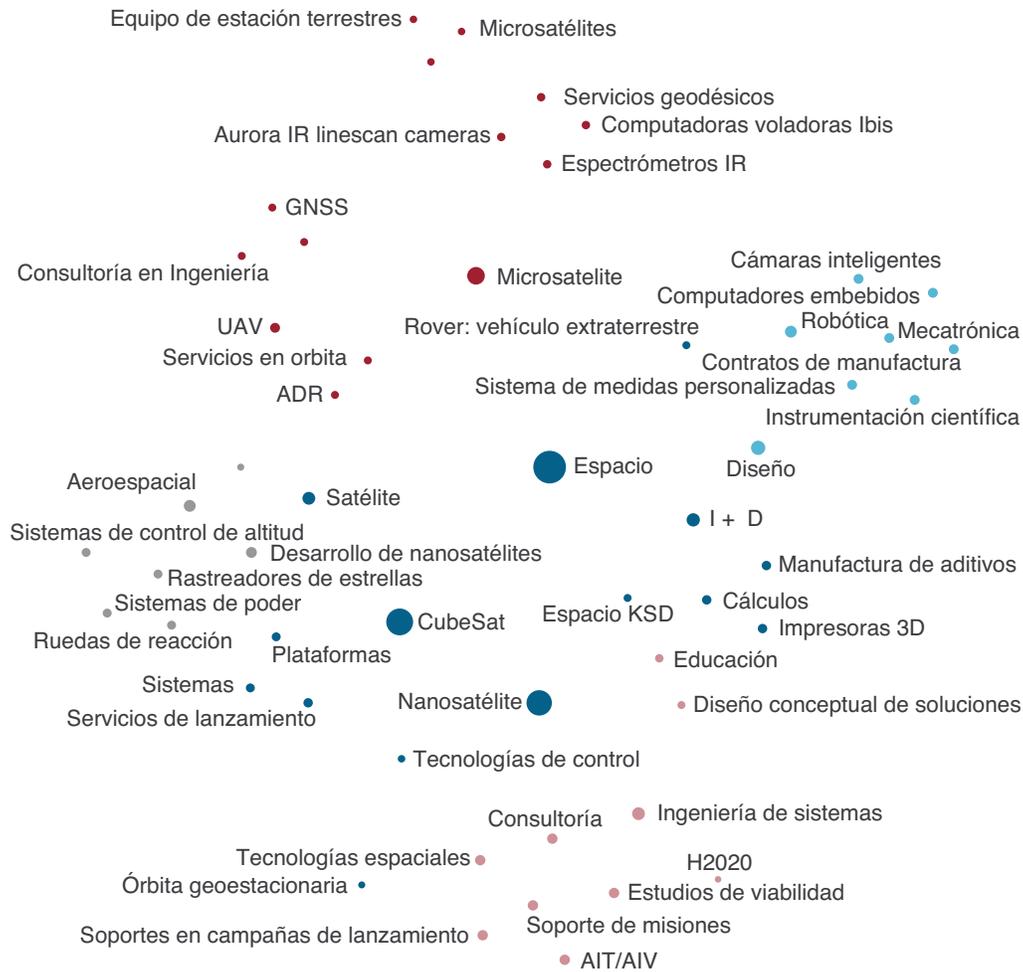


Figura 7. Productos y servicios en la industria de los nanosatélites  
Fuente: Medina, 2017.

Otras de las líneas de acción dentro del contexto de democratización del espacio se centran en el incremento de los lanzamientos, el uso de sistemas satelitales de pequeña escala y el incremento de las publicaciones y proyecciones de acuerdo a lo ilustrado en la figura 8.

En este sentido, es importante identificar diferentes tipos de tecnologías o artefactos aeroespaciales con los cuales se están supliendo los servicios en órbita, tipos de redes multiagente configuradas con dichos equipos, tipos de enlaces y bandas de operación de datos óptimos, formas de configuración en hardware y software, entre otros aspectos con las que se han respaldado los mencionados servicios en tiempo real, características de controladores,

modelos de control aplicados para el uso de recursos compartidos y finalmente las últimas tecnologías que aporten valor a las redes multiagente.

Si bien el desarrollo satelital y sus servicios asociados han tenido su mayor esplendor desde el siglo pasado, vale la pena destacar que hay una naciente industria dedicada a los propósitos de operar equipos con características físicas de reducido tamaño, de bajo impacto ambiental y lógicamente de alto rendimiento, como lo muestra la figura 9, respecto a la posibilidad de desarrollar líneas de producción o demás sistemas útiles para la gestión de servicios aeroespaciales en diferentes latitudes.

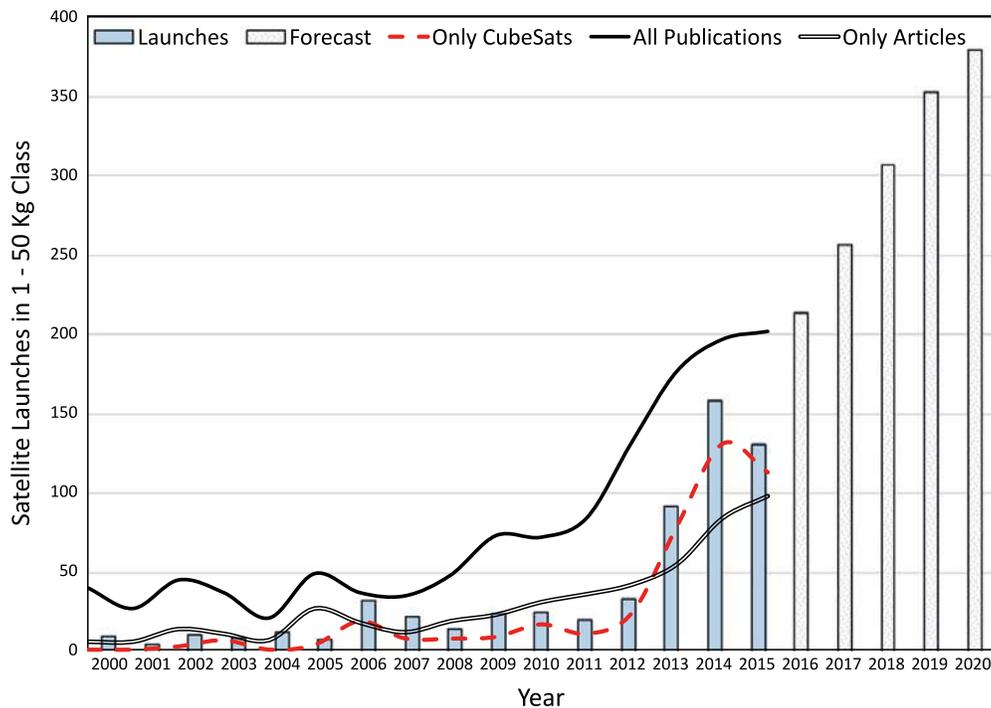


Figura 8. Descripción retro y prospectiva de las tecnologías espaciales  
 Fuente: Poghosyan y Golkar, 2016.



Figura 9. Línea de producción de microsátélites  
 Fuente: Álvarez y Walls, 2016.

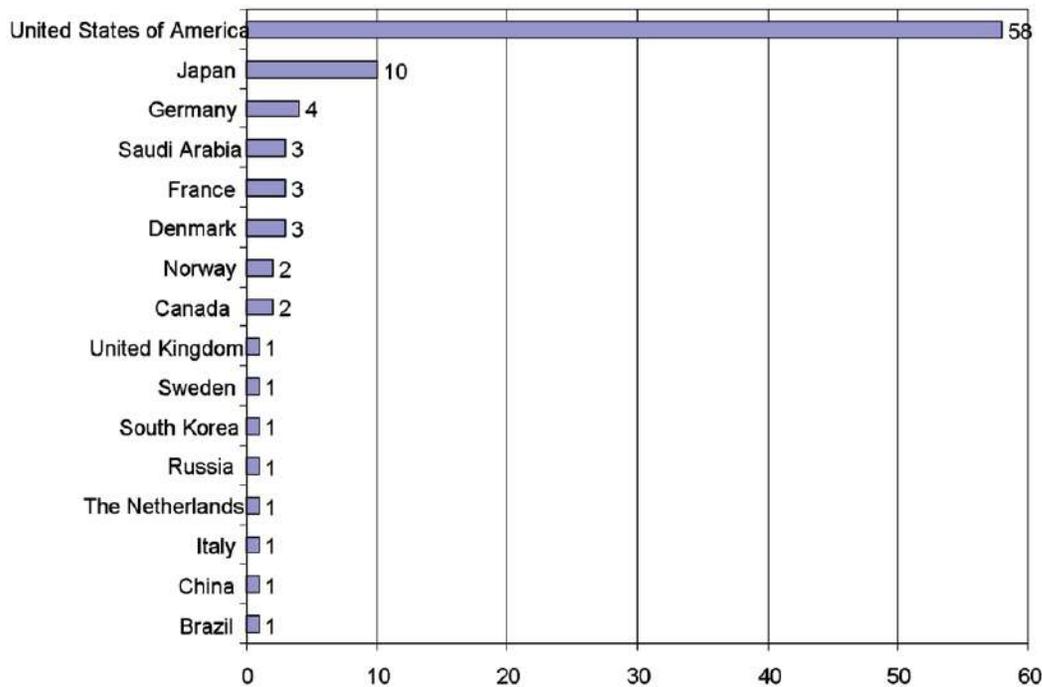


Figura 10. Distribución geográfica de desarrolladores de pico y nanosatélites  
Fuente: Bouwmeester y Guo, 2010.

En términos de los últimos desarrollos y tendencias que desde el punto de vista comercial están cobrando amplia significancia y participación de diferentes agencias, se encuentran los CubeSat como parte de las herramientas útiles para la configuración de sistemas en red con satélites de escala reducida (figura 10), respecto a la distribución geográfica de desarrolladores más significativa de proveedores de servicios, donde Estados Unidos lidera mayoritariamente en la participación de mercado.

Estos satélites fueron el resultado de un proyecto materializado con el nombre de CubeSat por parte de la Universidad Politécnica de California (Cal Poly) y desde 1999 con la Universidad de Stanford. Con el propósito de estandarizar los satélites de pequeña escala y aportar en el ahorro de costos y tiempos de desarrollo, quedando formalizado el estándar con el nombre de “CubeSat Design Specification”, correspondiente a la definición de un sistema modular de dimensiones cúbicas de 10 cm de lado y con una masa básica de 1.33 kg (tabla 2), donde los pico satélites representarían una categoría adicional de menos de 1 kg de masa, a pesar de poder tener el mismo dimensionamiento físico de una unidad de CubeSat o tamaños más reducidos, como se están generando actualmente en países como la India.

Tabla 2.  
Clasificación de pequeños satélites

Tipo de satélite	Masa
Minisatélite	500-100 kg
Microsatélite	100-10 kg
Nanosatélite (CubeSat)	10-1 kg

Fuente: Radhakrishnan et al., 2016.

Con base en estos desarrollos modulares, se puede apreciar en la figura 11 la diferencia estructural entre un tipo de satélite tradicional convencional de gran escala conocido como monolítico, con respecto a otros de pequeña escala que pueden ser configurados en infraestructuras modulares fraccionadas o desagregadas con la disposición de la misma carga útil, pero con elementos adicionales de configuración en red para suplir el servicio.

Por consiguiente, las líneas de producción trabajan con base a los requerimientos dimensionales de los satélites (figura 12), donde se pueden apreciar las diferentes configuraciones de tamaño y capacidad de equipos a bordo, desde la unidad básica cúbica 1U con dimensionamiento aproximado de 10 cm de lado, hasta el acoplamiento

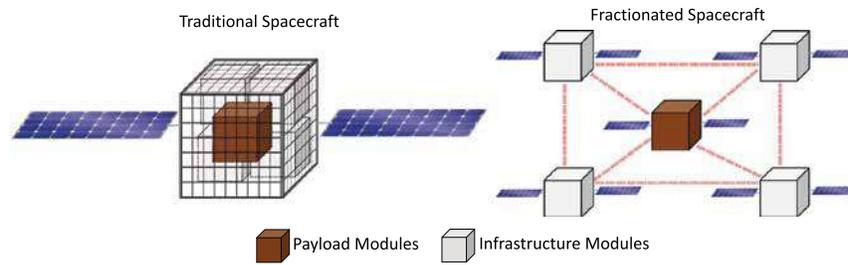


Figura 11. Diferencias artefactos espaciales  
Fuente: Poghosyan y Golkar, 2016.

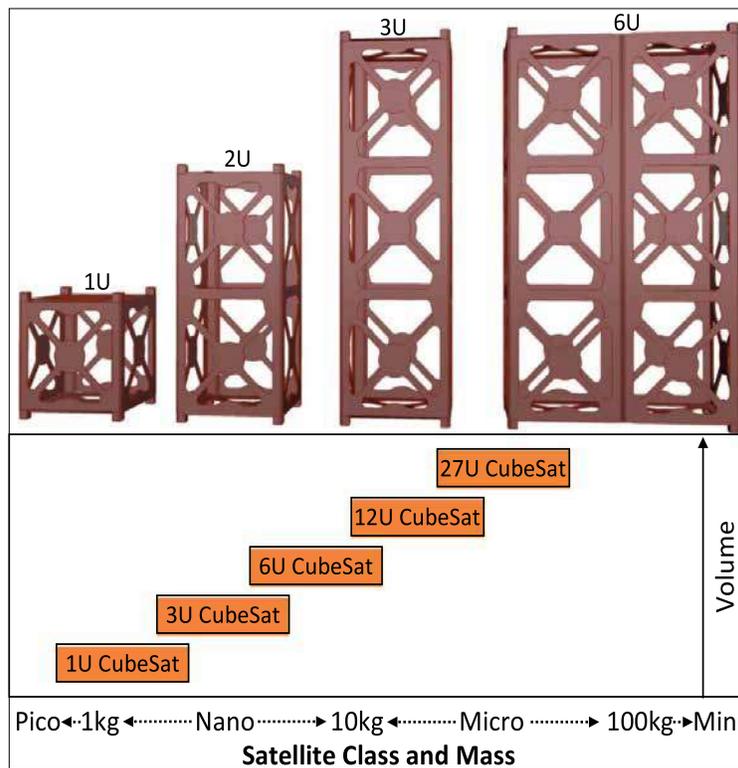


Figura 12. Configuraciones básicas de CubeSat  
Fuente: Poghosyan y Golkar, 2016.

modular 6U o 12U, según sea el caso de dispositivos y funciones particulares de cada misión.

Tomando como referencia dichas capacidades y dimensionamientos, en la figura 13 se puede apreciar el incremento en la tendencia de uso de la configuración 3U o de tres CubeSat integrados, la cual permite tener varios sistemas a bordo, especialmente el uso de cámaras multispectrales como carga útil especial para amplias aplicaciones.

Por otra parte la operación de sistemas y provisión de servicios esta enlazada a diferentes tecnologías con relación a las bandas VHF, UHF, Banda-S entre otras, con las que

operan los equipos en órbita (Bouwmeester y Guo, 2010), así como soluciones alternativas para sistemas de pruebas en tierra (Mier y Lozano, 2017), que en complemento con las bandas de operación de los sistemas satelitales viabilizan el procesamiento de datos para los diferentes servicios.

De igual manera, la operatividad de cualquier sistema satelital, requiere de un proceso de diseño de misión para la definición de requisitos y especificaciones de todos los subsistemas y segmentos de trabajo, como es el caso de identificar las diferentes bandas de entrada o de salida de comunicaciones con características de canal específicas y márgenes de trabajo de los enlaces de transmisión,

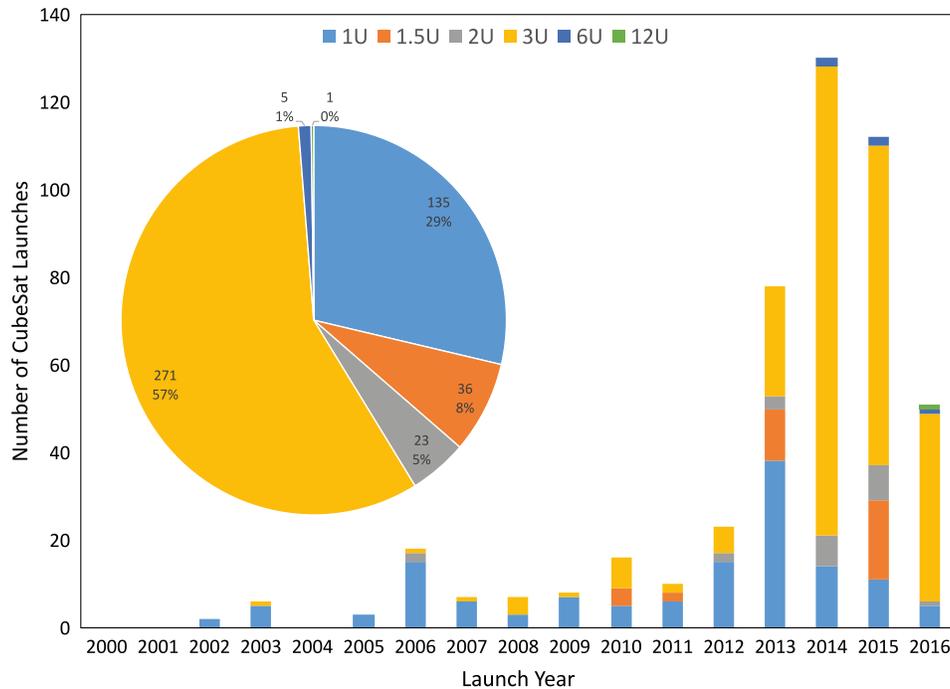


Figura 13. Lanzamientos de sistemas CubeSat  
Fuente: Poghosyan, y Golkar, 2016.

recepción y ruido del sistema en banda-S, banda Ka, entre otras (Álvarez y Walls, 2016).

Adicional al uso de frecuencias y su administración, es de resaltar que los procesos encaminados a la prestación de servicios aeroespaciales pueden planearse a partir de un diseño de misión del segmento espacial, con las especificaciones del segmento donde se realizarían las operaciones y con las posibilidades de participación de un sinnúmero de empresas dedicadas al acompañamiento y formulación de estrategias para la prestación de los servicios (Lowe y Macdonald, 2014).

Además de las estructuras modulares, el diseño de misión o las características de las bandas de comunicación requeridas en la configuración de sistemas satelitales en red, las agencias y proveedores de servicios aeroespaciales toman en cuenta los sistemas de referencia como el de la fundación para agentes físicos inteligentes (FIPA) (Chen, Linz y Cheng, 2008), y demás estándares de operación formalizados por las agencias de mayor impacto mundial como la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), la Agencia Espacial Europea (ESA), y actualmente la gestión significativa de países como India y China, en la administración de recursos espaciales y desarrollo de nuevas tecnologías y misiones de sistemas satelitales de pequeña escala (tabla 3), frente a los lanzamientos realizados o proyectados de sistemas en red.

Un ejemplo práctico del diseño de misión y de segmentos para la disposición de satélites en órbita es la configuración de arquitectura que identifica tendencias entre desempeño y costos de ciclo de vida con respecto a las variables de decisión, como lo son la inclinación y la altitud de la órbita para la operación de los satélites, todo mediante el diseño de un modelo rápido de diseño interdisciplinario para la misión de CubeSat (Lowe y Macdonald, 2014).

Como complemento a estas consideraciones, en Latinoamérica y en Colombia particularmente, también se han trazado búsquedas para la apropiación de estas tecnologías, con lo cual se han vinculado tanto la empresa privada como la pública, además de varias universidades, con equipos de trabajo en temas aeroespaciales.

Como la Universidad Sergio Arboleda con la estructuración y lanzamiento del proyecto Libertad 1, en el año 2007 y el diseño de misión del Libertad 2, o la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad Distrital, la Universidad del Valle o la Universidad Los Libertadores, entre otras, con sus grupos de coherencia y temas espaciales han trazado líneas de acción para la ruta espacial colombiana, como la empresa Secoia en su participación y aportes dentro del sector.

Por su parte, la institucionalidad pública aporta planes de desarrollo con la proyección de lanzamiento del primer

Tabla 3.  
Reporte de misiones múltiples de satélites pequeños

Mission name	Number of small satellites	Mass of small satellites (Kg)	Inter-satellite links	Inter-satellite communication approach	Launched/ Projected launch year
GRACE	2	480	Available	RF based (S-band)	2002
ESSAIM	2	120	Not available	Not available	2004
PRISMA	4	145,50	Available	RF based (UHF-band)	2010
ELISA	4	130	Not available	Not available	2011
EDSN	8	1.7	Available	RF based (UHF-band)	2015
QB-50	50	2,3	Available	RF based (S-band)	2016
PROBA- 3	2	320,180	Available	RF based (S-band)	2017
eLISA	3	To be determined	Available	Optical based (LASER)	2028
MAGNAS	28	210, 5	Available	RF based (UHF-band)	To be determined

Fuente: Radhakrishnan et al., 2016.

satélite de pequeña escala, formulado para el ejercicio de soberanía nacional, además del diseño de misión de una segunda fase, planeados como las bases de operación formal del sistema satelital colombiano, que demandaría la operación de satélites de pequeña escala y requerimientos de sistemas de control en red, con la necesidad específica de coordinar capacidades distribuidas en dichos satélites.

Al respecto se pueden considerar estudios puntuales como apoyo a la prospectiva del sistema satelital colombiano, tales como la determinación de actitud para un satélite tipo CubeSat realizado por la Universidad Distrital (Castellanos, Edith y Pico, 2014), donde se aplica el filtro de Kalman extendido, mediante el método de Runge-Kutta, a través de la matriz de transición de estados tradicional.

Así como los diseños de órbita para la disposición de soluciones satelitales al sistema colombiano, con enfoque a la integración de operaciones interagenciales y servicios complementarios (Poveda, 2016), siendo uno de los elementos fundamentales para el diseño de misión, en la cual se determinan los demás subsistemas y condiciones de vuelo y de lanzamiento de las plataformas satelitales, ya sea en alguna de las órbitas típicas, como se relacionan a continuación:

- Baja 100-1.500 km aprox.
- Media 1.500 10.000 km aprox.
- Geoestacionario.

En referencia a estas órbitas, se han ampliado los contextos para el uso de sensores de percepción remota

de diversa índole como carga útil factible a dichos servicios, referido específicamente al desarrollo de cámaras multispectrales como lo ilustra la Universidad Sergio Arboleda, (Alex, Viviana, Torres y Sebasti, 2014).

### Arquitecturas satelitales

Luego de las descripciones generales del estado actual de las tecnologías de pequeña escala, requerimientos, servicios y gestores aeroespaciales, a continuación se presentan varias de las arquitecturas con las que son configurados los satélites para diferentes tipos de misiones, destacando los componentes sobre los cuales se establecen las configuraciones de red y donde se formulan los diseños de topologías y control de agentes de la red.

### Estructura general satelital

Dentro de las arquitecturas de satélites más comunes y descritas de forma genérica, se relacionan los siguientes subsistemas:

- Estructura.
- Sistema de propulsión.
- Sistema de potencia o energía.
- Sistema de comunicaciones.
- Sistema de control.

De manera detallada donde se enlazan los subsistemas de la estructura básica de un satélite de pequeña escala, gráficamente se tiene como referencia la figura 14, donde se le da la relevancia a la carga útil como elemento

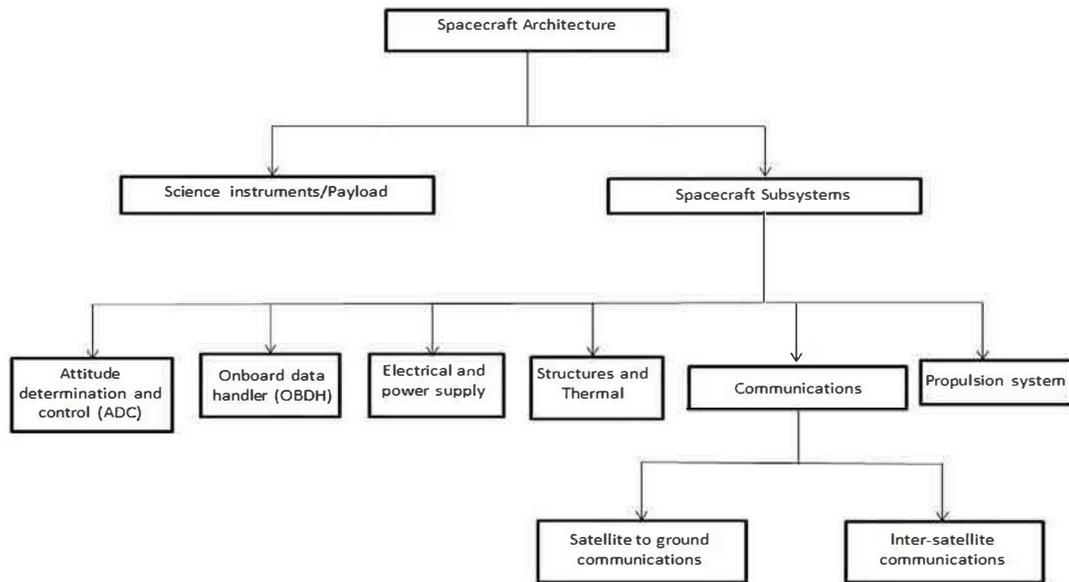


Figura 14. Arquitectura general de un equipo satelital  
Fuente: Radhakrishnan et al., 2016.

determinante de la arquitectura satelital, además de los subsistemas categorizados por funciones y dentro de estos el de comunicaciones, que determina formalmente la actuación de redes con equipos en tierra, o con equipos en constelaciones, o clúster con los se constituyen los sistemas de control en red.

### 3.2 Sistemas automatizados

En términos comparativos, los sistemas satelitales vinculan la integración de tres tópicos fundamentales, descritos de manera escalonada y comparada a los sistemas automatizados.

Como lo son los niveles de la automatización que involucran un primer nivel dedicado a los sistemas de actuación y sensado, donde se definen los subsistemas de medición, sensores, toma de señales, protocolos de comunicación, entre otros. Un segundo nivel descrito por las capacidades de control y supervisión con las configuraciones para el uso de los sistemas de actuación, junto con los esquemas y modos de verificación y monitoreo de estos. Un tercer nivel descrito por los sistemas de planeación, gestión logística y operativa, que buscan garantizar la programación y ejecución efectiva de las misiones.

En primer lugar, se tiene el diseño y análisis de capacidades y equipos a bordo de cada satélite o agente, con lo cual se logra la identificación, caracterización y actuación de cargas útiles y configuración de sensores, donde la fusión sensorica cobra significado frente a la estimación de errores, planificación de trayectorias y seguimiento a pa-

rámetros de operación, teniendo en cuenta la estimación de estados de acuerdo a las últimas actualizaciones del sistema. Así como, las señales de comando generadas en las interfaces y de forma integral la estimación de respuesta de los demás subsistemas relacionados con la estabilidad de los agentes.

En este sentido, la fusión sensorica combina las observaciones y mediciones de diferentes sensores que configurados, según la misión de vuelo, proveen los recursos necesarios para la toma de decisiones y asignación de tareas en los resultados finales de la coordinación de los agentes.

En segundo lugar, el diseño de controladores específicos para sistemas homogéneos y heterogéneos conectados en red, puesto que la necesidad de suplir los servicios con múltiples equipos requiere la capacidad de controlar cada agente con sus propios recursos, así como la capacidad de coordinar los agentes entre ellos, ya sea que tengan homogeneidad en su configuración o sean heterogéneos en la disposición de sus recursos de vuelo.

Las configuraciones o topologías de red son la base para el planteamiento de nuevos sistemas de control, donde precisamente se centraría la propuesta respecto al diseño de controladores capaces de coordinar agentes con diferentes capacidades y misiones de vuelo.

Finalmente, se tiene el tercer tópico, el cual involucra la definición de los sistemas según la planeación y estimación logística de los agentes, buscando así la estructuración

de la red satelital, la gestión de recursos y la definición del sistema de control requerido para la misión asignada del clúster o la constelación, tales como lograr la definición del servicio aeroespacial del sistema multiagente, para la toma de imágenes, comunicaciones, monitoreo, entre otras posibilidades disponibles según sea la necesidad de la red multiagente, como el caso de la definición de parámetros para la ingeniería de potencia (Moradi, Razini y Hosseinian, 2016).

### Tendencias de las configuraciones satelitales

De acuerdo a los reportes identificados en las bases de datos de producción y tendencias en el desarrollo aeroespacial (Medina, 2017), las configuraciones satelitales de pequeña escala apuntan a tres tópicos diferenciados entre sí, como lo son las comunicaciones, el control electrónico y la estructura y propulsión, con los subsistemas como se relaciona a continuación.

#### Comunicaciones:

- Sistemas de carga útil y sensores.
- Sistemas de almacenamiento y procesamiento de datos.
- Sistemas de comunicación y telemetría.

#### Control electrónico:

- Sistemas de control de navegación.
- Sistemas de control electrónico.
- Sistemas de alimentación eléctrica.

#### Estructura y propulsión:

- Sistemas de control térmico.
- Sistemas de propulsión.
- Sistemas de estructuras espaciales.

En la figura 15 se puede observar la dinámica tecnológica de las tendencias en actividades de inventiva dentro

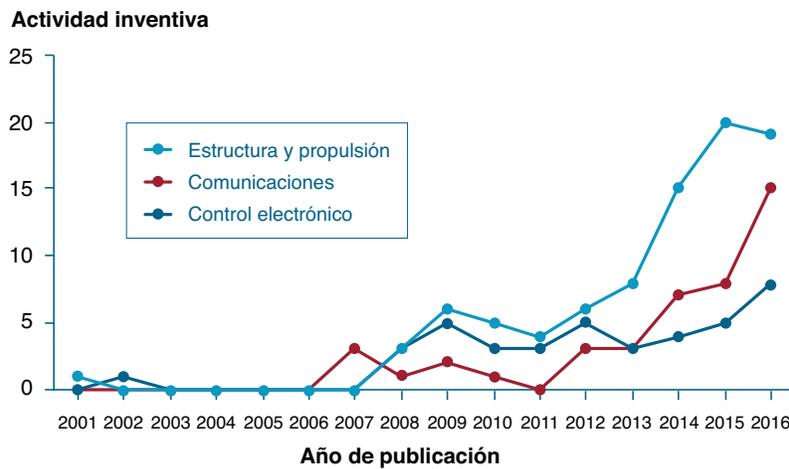


Figura 15. Dinámica tecnológica de las tendencias identificadas  
Fuente: Medina, 2017, tomada de Thomson Innovation, Espacenet, USPTO, Latipat, entre otras.

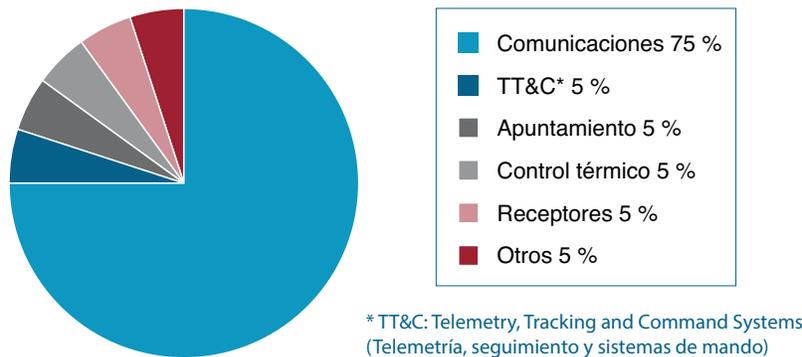


Figura 16. Consumo promedio de energía eléctrica de un satélite  
Fuente: Medina, 2017.



de las tres configuraciones, en las cuales los estudios de estructura y propulsión representan el mayor porcentaje de producción científica, aunque la tendencia de los estudios en comunicaciones representa una mayor pendiente de interés que hacia los próximos años puede superar las actividades de invención.

Se puede apreciar en la figura 16, que los sistemas de comunicación son los que más demandan consumo de energía a bordo, razón por la cual se puede correlacionar la

tendencia en el incremento de las invenciones en subsistemas de comunicaciones que logren mayor eficiencia y que extiendan la vida útil de los demás subsistemas.

### Sensores y actuadores

De forma particular en las figuras 17 y 18 se pueden observar los diferentes actuadores o estabilizadores a bordo como los posibles sensores a ser configurados en cada satélite, según sean sus funciones específicas de operación.

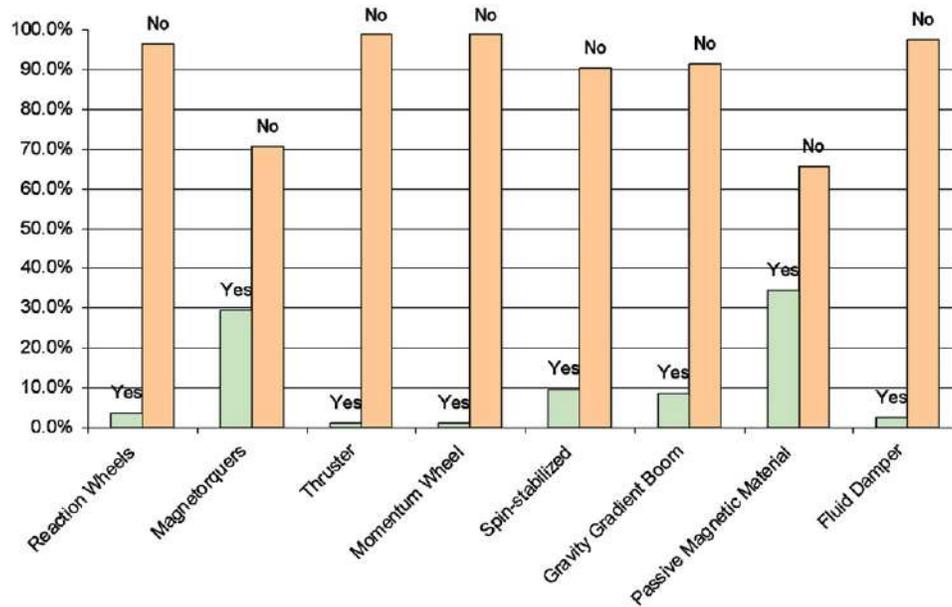


Figura 17. Actuadores o estabilizadores a bordo  
Fuente: Bouwmeester y Guo, 2010.

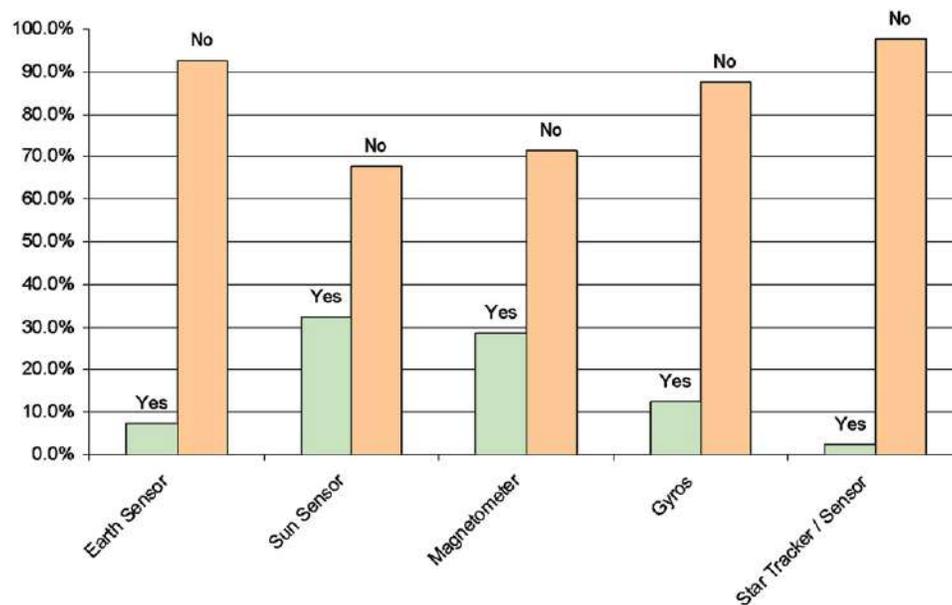


Figura 18. Sensores de actitud a bordo  
Fuente: Bouwmeester y Guo, 2010.

Como aplicación particular de los sensores en sistemas de control en red, se han trabajado sistemas de micronavegación GPS y sistemas de comunicación para clúster de micro y nanosatélites, donde plantean las configuraciones de técnica doble completa y técnica simple para transmisión y recepción en el acceso múltiple de datos (Zenick y Kohlhepp, 2001).

Por su parte, en el concepto de las comunicaciones entre satélites pequeños, según la figura 19, se ha integrado la ingeniería de sistemas a través del modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI) con el diseño receptivo

y formal (RFD), como se relaciona a continuación con el marco de referencia general.

Adicionalmente en la figura 20, se ilustra una arquitectura y esquema de orientación integrada de navegación y control, para la interconectividad de agentes dentro de una red.

Retomando entonces los diferentes componentes de un sistema satelital, se puede abordar la configuración de cada agente junto con los requerimientos propios de la red, según sea el grafo de conectividad o las misiones tipo que sean solicitadas desde la estación en tierra.

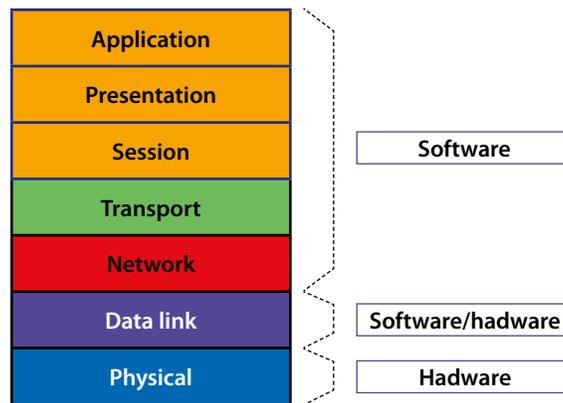


Figura 19. Marco de referencia de las comunicaciones intersatelitales  
Fuente: Radhakrishnan et al., 2016.

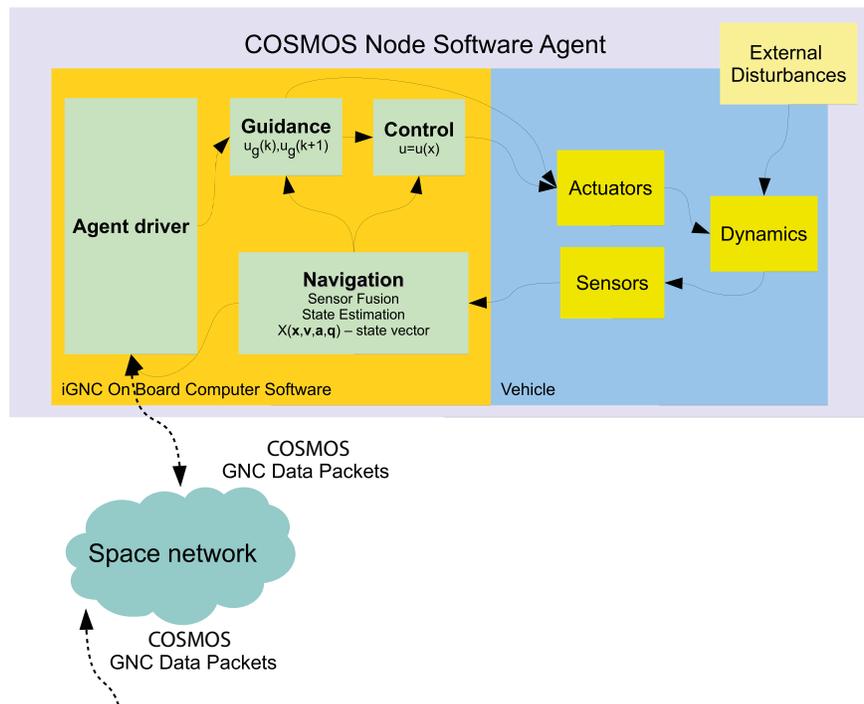


Figura 20. Esquema de orientación integrada de navegación y control  
Fuente: Sorensen, 2014.



## Modelos de referencia

Posterior a la descripción de arquitecturas con las que se define la capacidad del diseño de misión de múltiples satélites en red, se requiere la identificación de modelos sobre los cuales se estructure la topología de red, la coordinación de funciones y delegación de tareas de la red, entre otras especificaciones útiles para el diseño y control de esta.

Uno de los puntos de interés para el desarrollo de modelos matemáticos, es la concepción del problema de consenso, a partir del cual se establecen condiciones para la coordinación de sistemas multiagente, considerando el control de formación, el control de actitud y el comportamiento de encuentro en términos de velocidades, conectividad y puntos de acuerdo, referidos con la dinámica multiagente y los algoritmos de consenso, descritos en topologías y dinámica compleja de problemas en red (Taylor, Wang, Gao, Alsaadi y Hayat, 2014).

Varios de los aspectos relevantes para el control de actitud de los satélites se ilustran en la figura 21, donde la coordinación y adecuada formulación del modelo de los sistemas de instrumentación, comunicaciones con la estación en tierra, sistemas de almacenamiento de energía y hasta los medios de rotación del satélite, que implican la integración de técnicas de control capaces de administrar los recursos a bordo y lógicamente mantener la conectividad de la red con la operación de todos sus agentes y sus recursos.

Otro enfoque del problema de consenso en sistemas multiagente, refiere la descripción matemática como primer interés, los protocolos de consenso, el análisis y velocidad de convergencia, el equilibrio de estado, el problema de consenso en redes complejas, el filtro de consenso, las configuraciones de enjambre y puntos de encuentro de los sistemas multiagente hasta el control de formación de estos (Ren, Beard, Atkins y Theory, 2005).

Un modelo en tiempo discreto para  $n$  agentes, consiste en la actualización de las reglas locales de los vecinos más cercanos dentro de una red, con lo cual se logra una coordinación centralizada al comportamiento de los agentes cercanos. Mediante el método de Vicsek para la estabilidad de sistemas lineales conmutables, (Jadbabaie, Lin y Morse, 2003)

El modelo anterior es también aplicado al problema de consenso con la formulación de un modelo de alta fidelidad de linealización para el factor de achatamiento en los polos de la tierra (J2) en formaciones de satélites (Sedwick, Supervisor, Miller y Velde, 2001), con el uso de la ecuación de Hill como ecuación de movimiento (Sorensen, 2014), mediante el uso de la matriz de transición de estado discreta basada en la ecuación que es usada para obtener el sistema dinámico linealizado como un estado linealizado de propagación, tomando como referencia el proyecto TechSat21 (Martín, 1997), con la geometría y control de formación satelital.

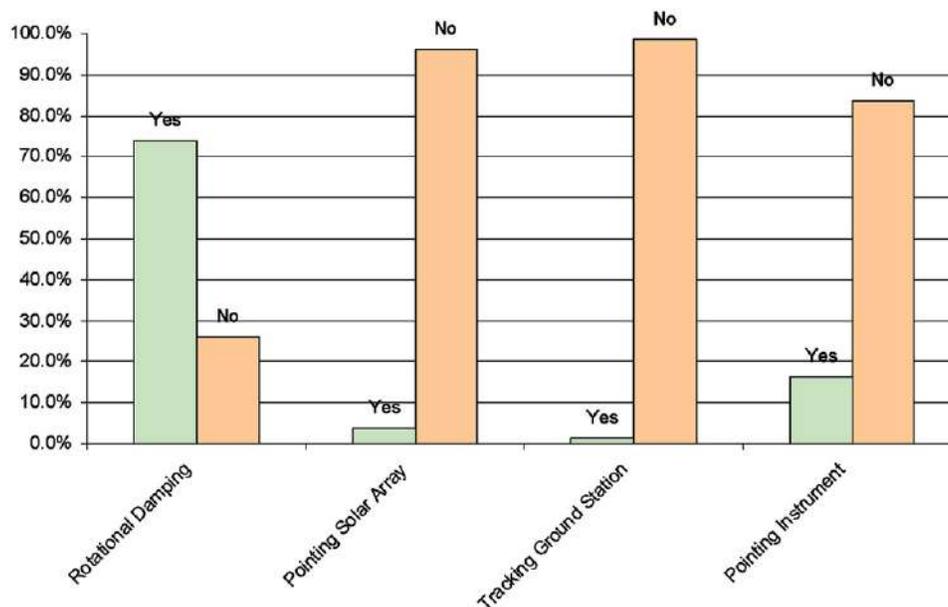


Figura 21. Objetivos de control de actitud  
Fuente: Bouwmeester y Guo, 2010.

Para la órbita LEO, se considera el movimiento relativo descrito afectado por el factor también llamado de población de la tierra  $J_2$ , con el modelamiento de los ejes  $x$ ,  $y$ , y  $z$  del satélite en función del tiempo.

Por otra parte, se aplica el regulador cuadrático lineal (LQR) para llegar al modelo generalizado, vinculando la simulación de posición y rendimiento de las maniobras por redzvovs (Sorensen, 2014).

Otros desarrollos propuestos para el control de constelaciones se basa en el método de optimización por algoritmos genéticos, para observación de la tierra, con la estimación de parámetros por decodificación de estados (Nunes, 2015). Este algoritmo se basa en el método de penalización de la función a través de multiplicadores de Lagrange, donde se busca la optimización del sistema con la minimización de los siguientes parámetros:

- Número de planos orbitales entre los grupos de satélites.
- Número de satélites por plano orbital.
- Número de grupos de satélites.
- Ángulo de separación entre planos orbitales de grupos.
- Ángulo de separación entre satélites.
- Ángulo de separación de primeros satélites en cada clúster.

Llegando así a un valor de la función objetivo que optimiza el número de satélites frente a una misión específica de funciones.

Una alternativa planteada de solución para formaciones satelitales basada en la ecuación de Hill, se fundamenta en superficies geométricas simples, tomando como base un satélite líder en una órbita circular determinada por la intersección de planos para el ajuste de dispositivos de sensado (Yeh, Sparks y Force, 2000). De tal manera que ante las perturbaciones puedan reposicionarse en la formación, quedando incluidos los términos de fuerza y distorsiones, con trayectorias de referencia específicas.

Otro modo de control resultante del análisis de misiones satelitales, es el control electromagnético de las ruedas de reacción en una formación de dos o más satélites dentro de un arreglo, con parámetros de actualización, masa, energía, eficiencia, encendido, entre otros, que conducen hacia la función de rotación de cada satélite, para optimizar el sistema de propulsión en consumo para la formación, (Yeh et al., 2000; Kong et al., 2004).

Un ejemplo de control de formaciones mediante fuerzas electromagnéticas, muestra el concepto de misiones interferométricas, para la cooperación de los miembros del sistema multisatélite (Wawrzaszek y Banaszkiwicz, 2007), con lo cual se controlan los sistemas respecto a las fuerzas requeridas para la actuación de valores de reconfiguración de la red, suficientes para activar la propulsión de uso disponible manteniendo la seguridad de la red.

Como resultado de las interacciones entre satélites como agentes de una red, también se han planteado algoritmos de consenso y cooperación en redes de sistemas multiagente, donde se privilegia el papel del flujo de información en la red y se proponen topologías de red, para retardos de tiempo, nodos o enlaces con fallas, con el fin de garantizar el desempeño de conectividad del sistema multiagente.

En estos trabajos se vinculan soluciones para el problema de consenso, a partir de las teorías de control, grafos y variables de estado, para proponer interacciones de sistemas distribuidos con vecinos cercanos y disponibilidad de flujos de información en diferentes localidades de la red (Olfati, Fax y Murray, 2007).

### Sistemas de control en redes satelitales

Habiendo revisado los modelos de referencia para los satélites y sus posibles configuraciones en red de forma general, a continuación se relacionan aplicaciones puntuales a los sistemas de formación satelital, tomando como base el modelo de referencia ilustrado en la figura 22, donde se presenta la arquitectura general de los sistemas de control en red, a partir de la conectividad de agentes, con diferentes procesos de interacción, fusión sensorica y control basado en optimización para la operación entre agentes.

En este sentido, se toman como referencia diferentes diseños de misión, a partir de los cuales se buscó la integración de agentes y funciones de control en red.

### Diseños de misión de redes

Desde el año 1999 la NASA proyectó alternativas de bajo costo respecto a plataformas de control distribuido sobre arquitecturas virtuales de pequeños satélites en red, las cuales son caracterizadas por la cooperación y los comportamientos comunes entre satélites, tanto en constelaciones como en formaciones.

Es decir, se han considerado atributos colectivos y capacidades individuales dispuestas en red como lo ilustra la figura 23, desde las que se visualizaron las ventajas de explotación de uso y aprovechamiento de estas redes, tanto en la NASA como en el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. (Weidow, Bristow y Weidow, 1999).

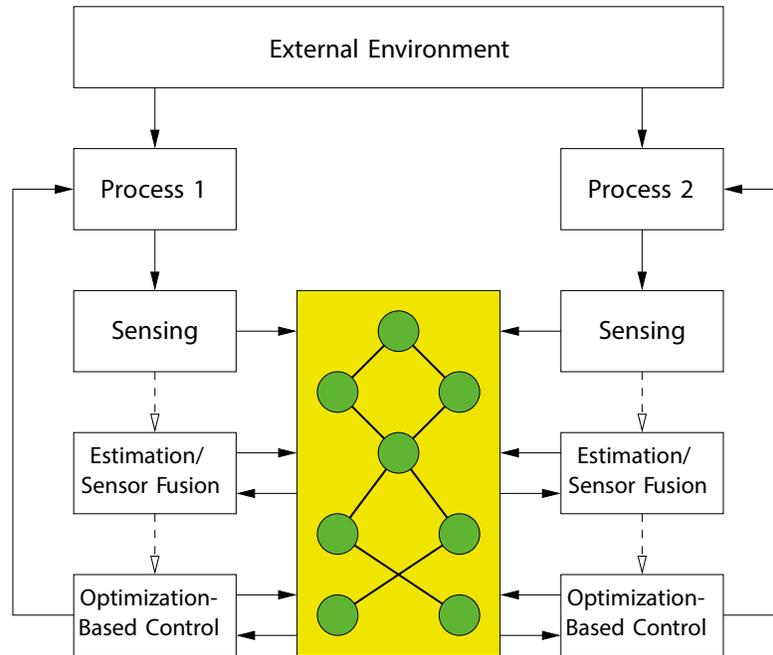


Figura 22. Arquitectura de control para sistemas de control en red  
Fuente: Murray, 2016.

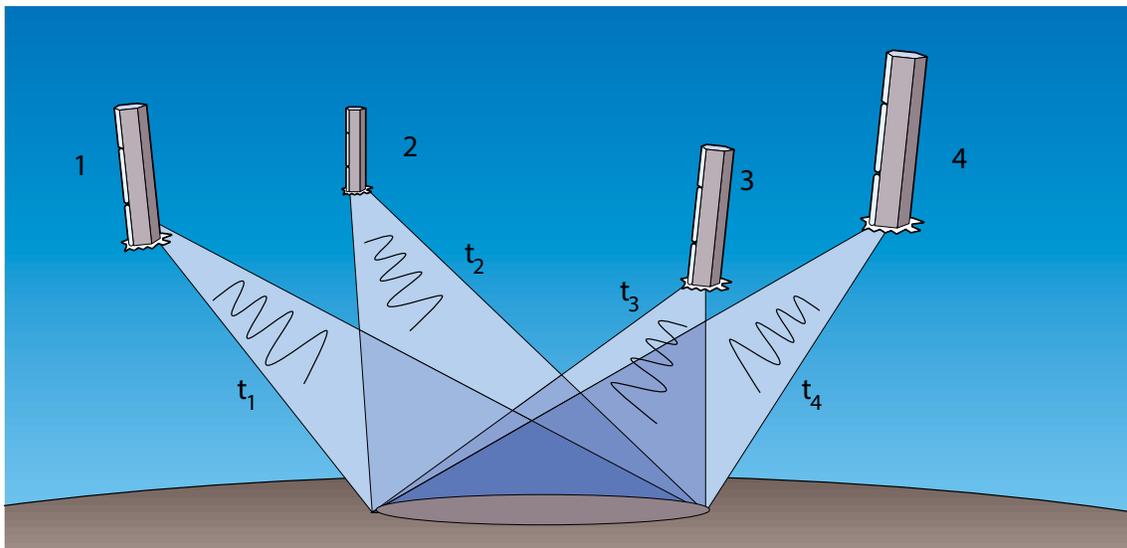


Figura 23. Matriz de escasa apertura  
Fuente: Zetocha et al. 2000.

Especialmente el laboratorio de investigaciones de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos por medio de su programa TechSat21 (Martín, 1997), junto con la empresa DARPA y otras 10 universidades americanas, trabajaron en el desarrollo del concepto de nanosatélites desde el año 1997, con lo cual se realizó el lanzamiento de los 10 nanosatélites proyectados en el 2001, a partir de un diseño

de misión en cuatro pasos, con referencia de la estación en tierra (figura 24).

El primero relacionado con la unión de las universidades y los equipos de trabajo del Departamento de Defensa y la NASA, el segundo se enfocaba al desarrollo de los sistemas de comunicación entre satélites, el tercero introducía

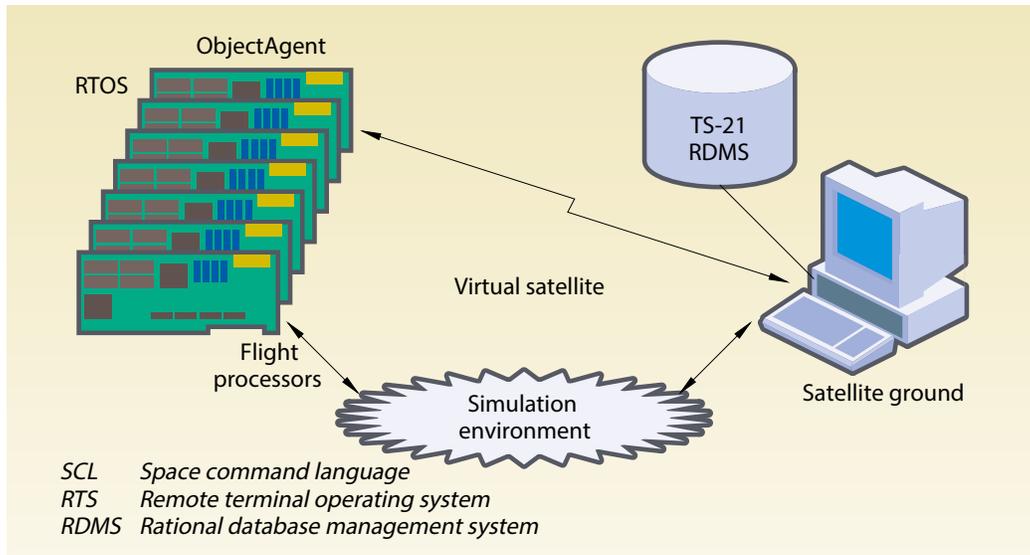


Figura 24. Esquema estación en tierra TechSat21  
Fuente: Zetocha et al., 2002.

el sistema de navegación y un cuarto paso referido al desarrollo de sistemas de control de formación, fueron básicamente los primeros pasos en el abordaje de estos conceptos respecto a su utilización en sistemas satelitales de pequeña escala, incluyendo dentro de estas aplicaciones el concepto de pruebas y validaciones de manera paralela. (Weidow et al., 1999).

Una aplicación adicional es la operación del FormSat (Braukhane *et al.*, 2010) mediante la cual se plantea un modelo de negocio en torno a la operación de servicios satelitales y de manufactura de estos, con los cuales se dispongan diferentes cargas útiles para cada servicio, o el proyecto SAMSON, mediante el cual se presenta un modelo de vuelo de clústeres satelitales con la geolocalización de tres nanosatélites dentro de un segmento espacial, segmento de tierra, segmento de usuario y segmento de lanzamiento (Gurfil, Herscovitz, Pariente, 2014),

Por otra parte, se presentan avances como la red espacial QB50 con capacidades de hasta 50 nanosatélites y formación de vuelo equipados con carga útil para estudios científicos, en desempeño multipunto y mediciones *in situ* en la termosfera baja, buscando con esto la compensación de la resistencia diferencial y el control relativo del vector de excentricidad e inclinación de la formación satelital, (Gill, Sundaramoorthy, Bouwmeester, Zandbergen y Reinhard, 2013).

Adicional al control de capacidades de carga útil, se han desarrollado controles cíclicos *on off* para vuelo de clústeres satelitales, donde se ajusta la operación de los sistemas de propulsión para mantener las distancias de re-

ferencia de los satélites dentro de una formación descrita con topologías de red en anillo (Zhang y Gurfil, 2015).

Otra aplicación de los clúster de nanosatélites se presenta con los estudios de múltiples satélites en la región de aceleración auroral, donde los focos de estudio son las propiedades quasi estáticas, características espacio-temporales, estructuras del potencial eléctrico, entre otras que mediante la fusión sensorica a bordo en los satélites provean la información necesario con alta redundancia y consistencia de datos, con clúster de 6 a 12 CubeSat, que en periodos cortos de tiempo pueden tomar la información requerida o ajustar el concepto de misión (Sadeghi y Emami, 2017).

De manera complementaria también se han descrito las necesidades que demandan las formaciones de vuelo satelitales, tanto para la integración de capacidades en comunicaciones como el rango de operación, y la precisión de ajuste entre las constelaciones, como es el caso de sistemas de sensado y potencia integrados y de bajo costo para responder a la demanda de los servicios actuales, con sistemas de comunicación y navegación en micro GPS (Zenick y Kohlhepp, 2001).

Incluso ejemplos de modelos para mantener la formación autónoma de satélites geoestacionarios con dinámica de navegación regional, desarrollada con modelos de aceleración y modelos de empuje (Kumar, 2017).

### Formaciones satelitales

Los sistemas de control en red aplicados a los sistemas satelitales, reúnen configuraciones como las constelaciones



ciones y los clústeres, de ahí que han sido referidos a lo largo del análisis, en razón a la necesidad de disponer de múltiples agentes en red que por su reducido tamaño no tienen las capacidades físicas suficientes para incorporar demasiados equipos a bordo y por lo tanto requieren ser interconectados para mantener funciones conjuntas a misiones particulares.

En este sentido, se toman como referencia los diferentes niveles de coordinación para múltiples satélites (figura 25), pasando por la configuración en enjambre, las constelaciones, las formaciones de vuelo, las reconfiguraciones de cada formación y hasta el nivel superior relacionado con la definición de acuerdo o consensos para niveles de control descentralizados de alta precisión y nivel de autonomía de los agentes.

Uno de los ejemplos de formaciones satelitales es generado mediante control por modos deslizantes en sistemas de segundo orden, aplicado a una formación de picosatélites de bajo empuje como sistemas no lineales tipo MIMO (Li, Pan y Kumar, 2010), y otros avances como el sistema de control de actitud (ACS) con tolerancia a fallos para satélites pequeños, usando algoritmos de control adaptativo no lineal basado en el control por modos deslizantes en terminales singulares satelitales (Cao, Chen y Sheng, 2013).

O el planteamiento de tres algoritmos de control por modos deslizantes para optimizar el consumo de potencia en las diferentes configuraciones de vuelo de pequeños satélites para navegación y control libre de colisiones (Saaj, Bandyopadhyay & Bandyopadhyay, 2010).

Alternativas adicionales como los algoritmos de planificación de tareas dinámicas cooperativas y distribuidas, para múltiples satélites basados en aprendizaje híbrido multiagente, son opciones de trabajo para los sistemas en red (Wang, Li, Jing, Wang y Chen, 2011)

Incluso el control de retroalimentación de error mínimo por modos deslizantes para evitar colisiones mediante el control de perturbaciones inciertas con linealización de ecuaciones del movimiento de los pequeños satélites (Cao y Chen, 2016).

Otro de los problemas complementarios al de consenso en las formaciones de satélites, son los dispuestos para la distribución de recursos compartidos en red, en particular para constelaciones de CubeSat, dentro de las cuales el concepto de agente es asignado individualmente a cada CubeSat. En esta los recursos pueden quedar dispuestos de forma descentralizada dentro de la red, de acuerdo a la demanda del servicio asignado de cada misión, configurando

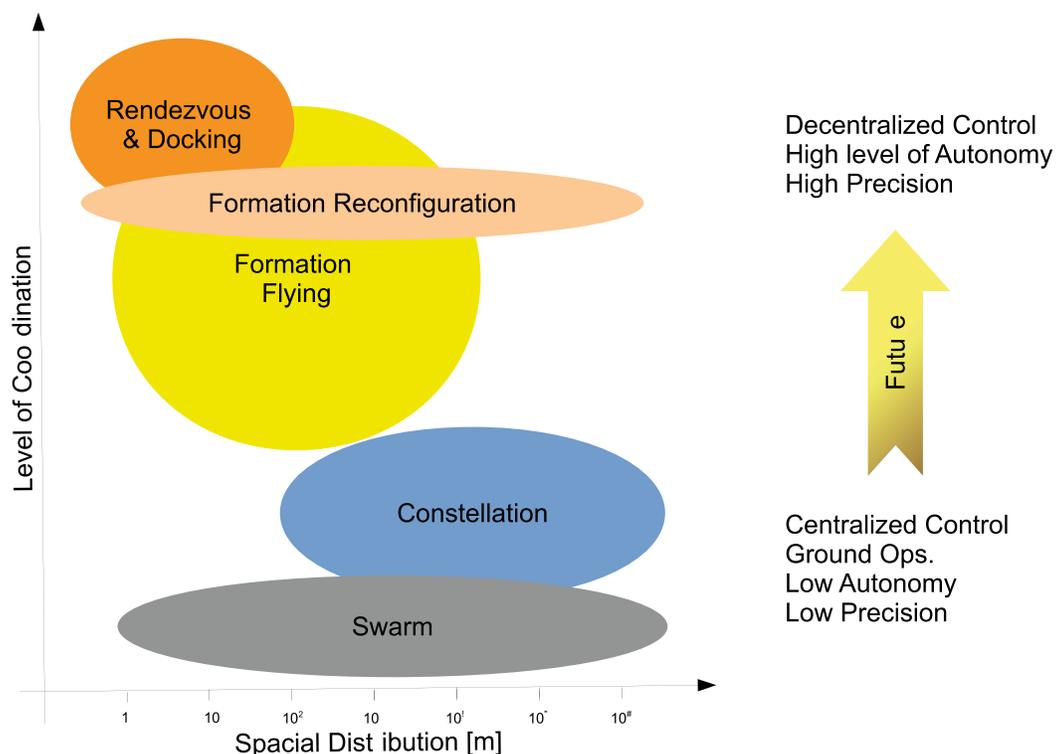


Figura 25. Niveles cualitativos de coordinación para múltiples satélites  
Fuente: Sorensen, 2014, adaptado de Radhakrishnan et al.

así la disposición de técnicas multiagente como simples algoritmos de asignación manual o el método de agentes evolutivos, (Agogino, HolmesParker y Tuner, 2012).

Sistema de control de órbita y actitud de satélites pequeños (AOCS) (Guerman, Ovchinnikov, Smirnov y Trofimov, 2012), proponen el control de dos satélites en formación, mediante la ecuación lineal de Schweighart-Sedwick, junto con los efectos del factor  $J_2$ , con el fin de buscar la estabilización de la actitud magnética pasiva y la estabilización del spin, respecto a todas las posiciones y velocidades iniciales correspondientes al hecho de poder mantener el movimiento relativo periódico entre los dos satélites.

Otro desarrollo para mantener la formación de satélites es el uso de un elevador diferencial y el arrastre bajo el efecto  $J_2$ , dispuesto para una órbita circular cercana LEO, basado en una ley de control por retroalimentación con la función de Lyapunov, con las cuales se controla cada satélite (Shao, Song, Wang, Zhang y Chen, 2017). Además de la determinación de un proceso de control cooperativo mediante ecuaciones de variación de Gauss, para el control de posicionamiento en la órbita dentro de un clúster de satélites, utilizando la dinámica de sistemas multiagente (Zhang y Gurfil, 2016). O la dinámica de interacción de grafos para el control coordinado distribuido con el fin de preservar la conectividad en sistemas multiagente (Ji, Member, Egerstedt y Member, 2007), buscando aplicar las maniobras rendezvous o encuentro de vehículos espaciales mediante el control de posición y velocidad, así como el análisis de problemas en formación para actuar sobre la dinámica e interacción de grafos, con la adición de pesos en los bordes de los grafos para garantizar así la conectividad de la red.

Otras formas clásicas de control se utilizan también como el control robusto para un sistema lineal y no lineal (Xu, Fitz-coy, Lind y Tatch, 2007), a través de un diseño de controlador  $\mu$  para el vuelo de satélites en formación en una misión nominal de 800 km de altitud, dentro de una órbita de referencia circular, el cual se caracteriza por brindar un control robusto a las incertidumbres, satisfaciendo los requerimientos de consumo de combustible en misiones no nominales de 0.1 a 7.978 km con órbitas de referencia elípticas, para las cuales se logra mantener la formación con los niveles de velocidad proyectados (43.86 m/s/año) así como con las misiones nominales con (39.65 m/s/año).

Como complemento se logra establecer un comparativo entre el controlador  $\mu$ , el control por modos deslizantes (SMC) y el regulador cuadrático lineal (LQR) con un controlador robusto no lineal en una formación de satélites (Xu et al., 2007).

Otros algoritmos de control de vuelo de clústeres satelitales, plantean la arquitectura para el ajuste de distancias dinámicas entre cada satélite, incluyendo restricciones y constantes de empuje mínimo para la operación suficiente del propelente requerido para los desplazamientos de cada satélite dentro del clúster, (Mazal y Gurfil, 2014). En este sentido, se complementan aspectos como la planeación de trayectorias colectivas para enjambres en presencia de fuerzas electromagnéticas entre los satélites, logrando con esto la capacidad de maniobra, que de acuerdo a la velocidad y comportamientos entre las interacciones del enjambre, posibilitan la operación híbrida de sistemas y el empuje coordinado dentro del enjambre, (Huang, Yang, Zhu Y Zhang, 2014) sistemas de vuelo en formación para misiones militares y no militares, desde el planteamiento de ecuaciones relativas no lineales, basadas en un modelo de incertidumbre del factor  $J_2$  ligado a los niveles de precisión de sensores para el control de requerimientos en el consumo de combustible de los satélites (Xu et al., 2007).

Por otra parte, se han desarrollado tres enfoques diferentes de control para formaciones de satélites pequeños, considerando la primera en términos de los algoritmos de líder seguidor, la segunda aplicada al enfoque conductual con el cual se direccionan los agentes de acuerdo al comportamiento deseado del promedio ponderado de los satélites (Lawton y Beard, 2002), sin embargo, la matemática aplicada es compleja y un tercer enfoque dado por estructuras virtuales a partir de la cual se trata la formación como un solo cuerpo rígido a ser controlado (Wang, 1996), logrando orientarla a medida que va evolucionando como un todo y manteniendo una geometría rígida entre los múltiples agentes (Beard, 2002), adicional a otras perspectivas donde se toma el líder con un marco referencial rígido también (Ren y Beard, 2004).

Una alternativa deducida de los enfoques anteriores se traduce en la descentralización del sistema, la retroalimentación y las maniobras con arquitecturas como el control de formaciones comparado (Ren y Beard, 2004), entre una arquitectura centralizada basada en el enfoque de estructura virtual y arquitecturas descentralizadas.

De tal manera que se establece una localización instantánea del vector de dirección y coordinación, en cada uno de los satélites de la formación (figura 26), donde se ilustran las posiciones en metros en sus tres ejes coordenados y son sincronizadas las comunicaciones bajo un ancho de banda a través de una topología de anillo bidireccional entre nueve satélites de 150 kg y uno central de 1.500 kg aprox. en un diámetro aproximado de trabajo de 1 km con distancias equivalentes entre los satélites.

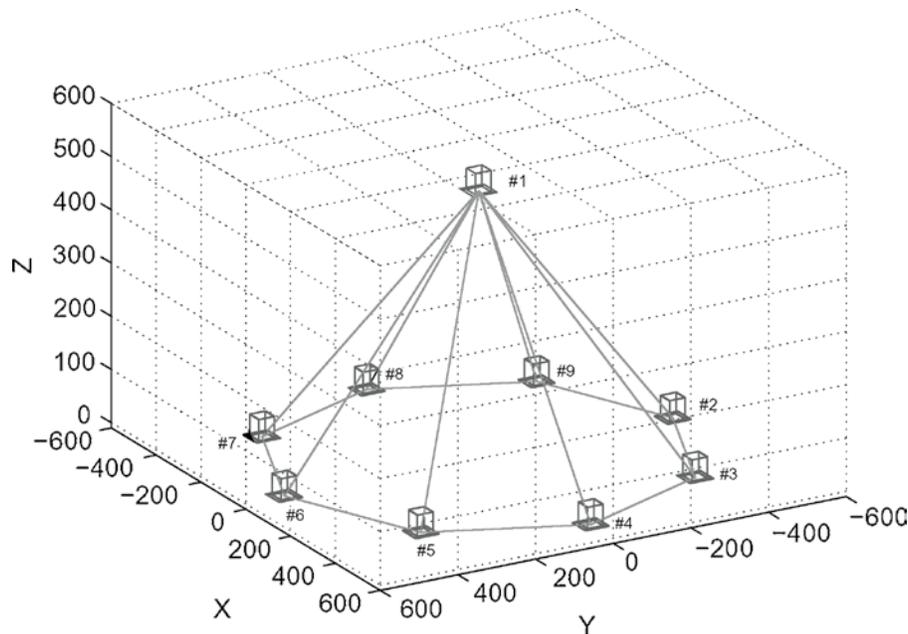


Figura 26. Configuración geométrica de nueve satélites  
Fuente: Ren y Beard, 2004.

Con esta topología se logra la sincronización y posterior actualización de los estados deseados de cada satélite dentro de la formación con el enfoque de una estructura virtual.

En los últimos avances respecto a los modelos con agentes, se han desarrollado alternativas que incluso son propuestas para ser aplicadas en sistemas multiagente no lineales, como las formaciones de satélites en vuelo, o el caso de protocolos de consenso global no lineal con la estrategia de líder seguidor y con entradas de saturación, obtenidos en modelos de simulación de sistemas industriales con el enfoque de retroalimentación de ganancia alta-baja (Wang, Wang, Zhang y Li, 2016).

En comparación con estas opciones de consenso, se han presentado incluso alternativas para aplicar la inteligencia artificial distribuida (IAD), a los diferentes subsistemas de un satélite tipo CubeSat, con lo cual se formalice el paradigma de agentes de software. Aunque se deja abierta la necesidad de implementar y validar estas propuestas con simulación a modelos de ingeniería de un satélite (Dhios, 2013), retomando principios básicos de la inteligencia artificial para agentes, como los límites de comunicación, la heterogeneidad de los agentes y la dinámica tanto de los ambientes como de los problemas de carga y recursos, previamente estudiados como sistemas multiagente (Lesser, 1995).

Se han generado propuestas para interconexión de satélites pequeños, como es el caso de la optimización por colonia de hormigas (ACO), con la cual se plantea el manejo de sistemas de satélites distribuidos, basada en enjambres inteligentes que se adaptan para intercomunicarse y reconfigurarse dentro de la red requerida (Chen y Zeng, 2013).

Similar a la formulación planteada como modelos formales de protocolos de control en red basado en la generación estocástica de redes Petri, configurando reglas de mapeo y protocolos de patrones para el control de flujo de información entre los satélites (Zhu, Yang, Huang y Lu, 2015).

Una alternativa de los diseños de misión para formaciones es la posibilidad de desarrollar los software de simulación para los agentes en vuelo, como se ilustra en la figura 27, donde se han implementado controles de dirección PD para el esquema de maniobra rendezvous consistente en las maniobras orbitales y de trayectoria para acercar los agentes uno de otro (Sorensen, 2014).

Para reducción de costos en misiones de vuelo en el desempeño de nuevas tecnologías como los satélites pequeños, se planteó el sistema de operaciones en tierra de luces apagadas (LOGOS), y las pruebas del concepto de agentes (ACT), para demostrar la capacidad de autonomía de las misiones de vuelo de dos sistemas en red, como comunidades interconectadas a través de una arquitectura

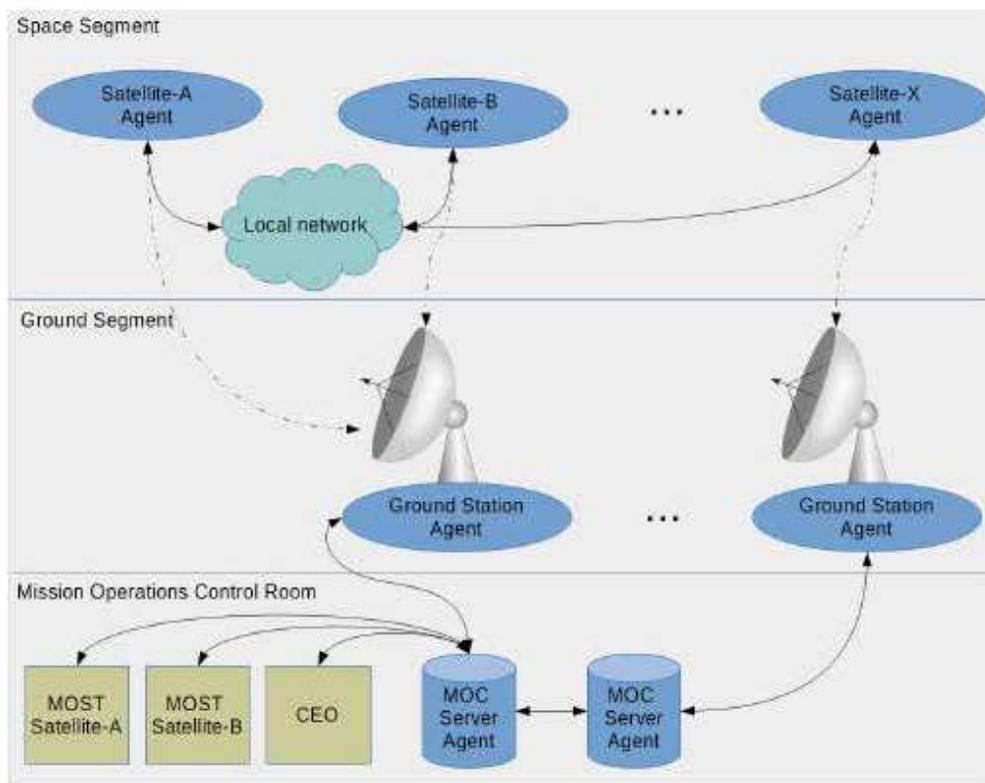


Figura 27. Diagrama de flujo de datos COSMOS  
Fuente: Sorensen, 2014.

y un software propios para dicha aplicación (Truskowski, Rash, Rouff y Hinchey, 2004).

### Otras aplicaciones de sistemas de control en red

Algunas tendencias marcadas en términos de los sistemas de control en red se basan en la categorización de las redes, flujos de datos en la red, eficiencia y uso de recursos, para lo cual se implementan estrategias de retroalimentación adaptadas a redes con enlaces de comunicación poco fiables, para poder controlar los acuerdos de los sistemas multiagente entendiendo el comportamiento individual de los agentes frente a su desempeño global o grupal (Zampieri, 2008).

Sistemas de control de complejidad reducidos, donde se presentan controladores de estado finitos que pueden ser aplicados en sistemas robóticos autónomos, para observar el papel de la retroalimentación en la simplificación de trayectorias aplicadas a las reglas básicas de autómatas de estado finito, proponiendo un tipo de controlador de estado finito aleatorio para reducir la complejidad del control (Brockett, 2008).

El problema de consenso en las redes de agentes incluye también las topologías de conmutación y retardos de tiempo, con las cuales se proponen topologías fijas o

conmutables para redes directas y topologías fijas con retardo de tiempo y comunicación para redes indirectas, todo esto mediante protocolos de consenso para sistemas multiagente, enlazados con conectividad algebraica y uso de grafos y dígrafos.

De igual modo se plantea la función de Lyapunov como función desagregada para redes dinámicas desagregadas, considerando los problemas de consenso y la dirección del flujo de información desde la teoría de grafos (Olfati y Murray, 2004).

Otras aplicaciones que se han planteado incluyen tecnologías multiagente bioinspiradas para la gestión de recursos corporativos en el modelamiento de diferentes procesos de carga, con soluciones inteligentes integradas y apoyadas vía satélite con comportamientos en tiempo real sobre dispositivos móviles de seguimiento (Tsarev, 2013).

De otro modo, las aplicaciones en términos de organizaciones también han cubierto el concepto de agentes modelando los diferentes módulos de la gestión empresarial como los proveedores, los clientes, entre otros, como agentes dentro del término metamodelos con sus respectivas interacciones (Villaplana, 2008).



Una mirada diferente para considerar sistemas multiagente es como equipos independientes de un mismo sistema, el cual ha sido también la configuración que se da a los componentes internos de un sistema como agentes independientes, es decir que los subsistemas como la interfaz de comunicaciones, la conexión de red o la unidad de procesamiento central, entre otros, pueden considerarse agentes y a su vez la operación entre estos ser considerada un sistema multiagente (Rouff, 2000).

El desarrollo de sistemas multiagente ha tenido una amplia aplicación en los sistemas informáticos y de computación, a la hora de formular técnicas y herramientas para el desarrollo de software, traducidos en metodologías de diseño y desarrollo de algoritmos, como orientación de objetos, rediseño de arquitecturas de software, entre otras, enfocadas al análisis y diseño de agentes, sus características y métodos de uso, descritos en algoritmos de bajo y alto nivel, como es el caso final de aplicación de los sistemas multiagente en los sistemas informáticos (Julián y Botti, 2003).

De otro modo, el foco de los sistemas multiagente se ha soportado en referentes computacionales que vinculan tanto los principios como los modelos, para la interacción efectiva de agentes semiautónomos, e inteligentes en el logro de sus objetivos, (Lesser, 1999). En contraste con conceptos de trabajo de sistemas multiagente basados en minería de datos para la identificación de patrones y clasificación de imágenes de terreno (De Freitas, Filho, De Moura y Silva, 2016).

Actualmente se están desarrollando alternativas de sistemas multiagente, donde se llevan situaciones de sistemas industriales con el modelamiento de las plantas, en términos de la optimización en tiempo real de la producción, teniendo en cuenta tanto sus diferentes subsistemas como el comportamiento general de la planta industrial, el flujo de información y la cooperación entre cada subsistema, que para el caso particular se aplican los resultados al diseño de una formación de satélites a ser analizada posteriormente (Wang et al., 2016).

## Seguridad crítica

Luego de identificar las diferentes formas de uso de los sistemas de control en red para satélites de pequeña escala, es importante considerar otros elementos fundamentales en su operación, como lo son el cálculo y diseño de órbita, todo lo relacionado con la fusión sensorica y detalles de la carga útil, sistemas de prueba y el enfoque de operaciones hacia la seguridad crítica.

## Diseño orbital

El diseño de órbita es una de las tareas implícitas en el diseño de misión, por medio de la cual se establecen no solo

el diseño en el proceso de lanzamiento, sino también los tiempos y cubrimientos que han de tener los satélites sobre un área específica.

En este sentido, se parte de su cálculo para determinar y definir el segmento en tierra, los requerimientos en el segmento de usuario y lógicamente el segmento espacial donde se define la tecnología de los satélites que estarán interconectados y capacidades a bordo de cada uno de ellos como agentes dentro de la red (figura 28), donde se representan las distancias intersatelitales y los puntos de referencia del seguimiento de trayectorias en órbita.

Por otra parte, se deben definir las distancias hacia las estaciones en tierra, los tiempos de cobertura y exposición de sensores y cargas útiles para su aprovechamiento desde tierra, según sean las misiones particulares que cumplan dichos equipos.

En términos prácticos, y para el caso colombiano, se han generado estudios para el diseño de órbita según sean los servicios que se quieran obtener de los satélites (Poveda, 2016).

Sin embargo, se han desarrollado trabajos con alturas por debajo de órbita, pero que buscan suplir servicios sin el uso de equipos satelitales. Como lo muestra la figura 29, se puede observar una propuesta de diseño para vehículos no tripulados que sean capaces de llevar cargas útiles a diferentes altitudes sin plataformas de lanzamiento, y que puedan permanecer en ubicaciones específicas mientras cumplen alguna tarea en particular.

Actualmente, otro caso representativo son los globos de Google (figura 30), mediante los cuales se pretende suplir el servicio de internet de forma complementaria a las redes actuales.

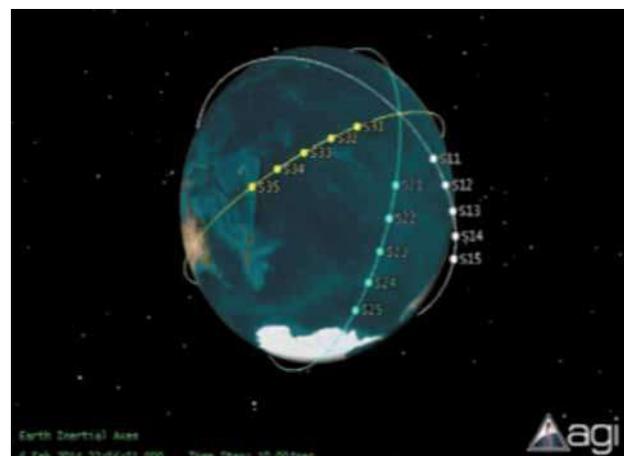


Figura 28. Patrón de vuelo de una constelación en formación  
Fuente. Radhakrishnan et al., 2016



Figura 29. Globo sonda  
Fuente: Forero y Libertadores, 2015.

### Fusión sensorica y sistemas de pruebas

El concepto de fusión sensorica aplicado a los sistemas de control en red, implica la coordinación completa de los sensores a bordo de cada agente como el uso de cámaras multispectrales (Díaz González, Quintero Torres, Triana Correa & Morón Hernández, 2014), con las que se espera la obtención de un número representativo de datos.

La fusión sensorica es un aspecto relevante a la hora de establecer los protocolos de trabajo entre sistemas multi-agente, en razón a los efectos y ventajas que presentan los sistemas con tecnologías de dispositivos microelectromecánicos (MEMS), desarrollados especialmente para aplicaciones de estructuras pequeñas de bajo costo y de bajo consumo, como es el caso de los satélites de escala reducida.

En este sentido, es importante identificar los protocolos de sincronización y operación de las redes de sensores utilizados sobre las plataformas multiagente, de tal manera que se provean características operaciones de precisión, bajo costo, exactitud y complejidad adecuadas para el soporte de las redes (Sundaraman, Buy y Kshemkalyani, 2005).

Así como la generación de algoritmos escalables de control para redes dinámicas de sensores y fusión sensorica distribuida, mediante sistemas de filtrado y niveles de consenso, diseñados para ajustar los parámetros de medición según un promedio de los diferentes nodos de la red de sensores (Olfati y Shamma, 2005).

Los sistemas a bordo tienen múltiples protocolos de prueba, requeridos para identificar el comportamiento de materiales, estructuras, conectividad, entre otros, como los sistemas de propulsión y bancos de prueba para nanosatélites en tierra (Mier y Lozano, 2017), ilustrado en la figura 31, donde se prueban los sistemas de control y determinación de actitud, propulsión, navegación e incluso campos magnéticos asociados a su operación.

Por otra parte, se han trabajado sistemas de control de actitud para satélites basados en la descentralización de sus componentes, con lo cual se evidencia un sistema control con redundancia en los puntos de falla para el respaldo operacional de las ruedas de reacción (De Arboleya y Moreno, 2012).

Un concepto adicional es el de hardware in the loop (HIL) aplicado al control de formación de vuelo de pequeños satélites para pruebas de diferentes algoritmos de control (Scharnagl et al., 2016), adicional a las pruebas se proyectan las capacidades de propulsión como alternativas de consumo de potencia para los clústeres de nanosatélites, dispuestos en sistemas de propulsión eléctrica miniaturizada (EP) para mantener las capacidades de orbita requeri-

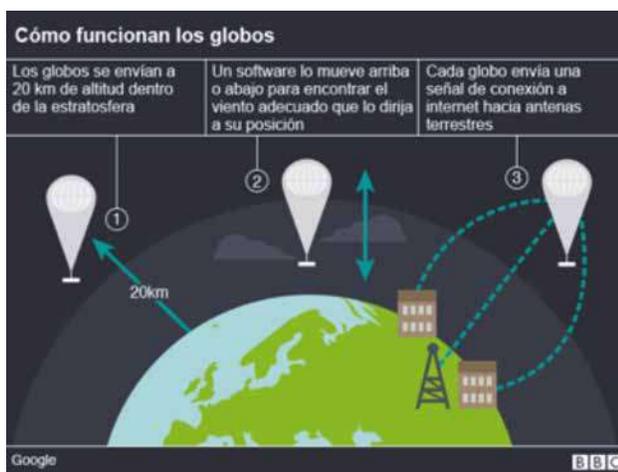


Figura 30. Proyecto Loon Google  
Fuente: Proyecto Loon Google.

En términos generales, cuando se habla de soluciones satelitales, la tarea en el diseño de órbita es prioritaria y demanda amplios requerimientos de cálculo e integración con todos los sistemas, lo cual implicaría el diseño de misión de la red de agentes.

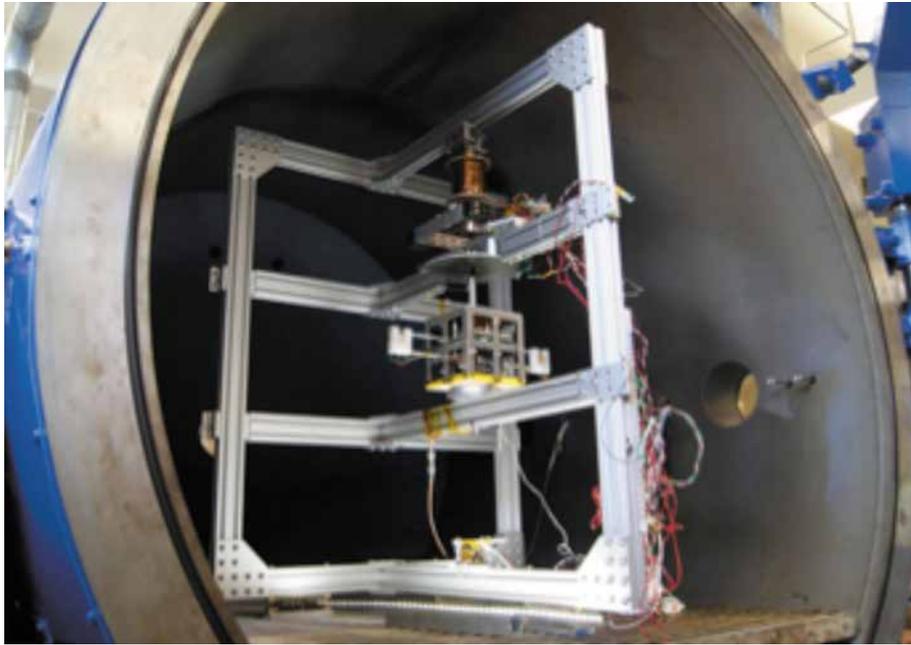


Figura 31. Sistema de pruebas CubeSat  
Fuente: Mier y Lozano, 2017.

das, todo mediante un controlador de empuje cíclico para cada nanosatelite (Edlerman & Kronhaus, 2016).

### Seguridad crítica

En los nuevos problemas operacionales y de acuerdo a los escenarios de aplicación de sistemas militares, se traen a colación interacciones centralizadas y descentralizadas que demandan la coordinación de acciones en conectividad y comunicaciones, que requieren vuelos en formación, clasificación y ataques cooperativos y supervivencia, hasta combinación de múltiples sistemas (Murray, 2007).

Como se ilustra en la figura 32, además de otras aplicaciones como redes de sensores móviles, sistemas de transporte con autopistas inteligentes, control de tráfico aéreo, sistemas coordinados de UAV, entre otros.

Un aspecto relevante frente a la disposición de agentes en la seguridad crítica, es la necesidad de interacción entre tipos de emergencias de gran escala que son tratadas mediante la simulación basada en agentes, logrando la evaluación de impactos desde efectos locales hasta catastróficos, incluyendo tipologías de reacción en diferentes tipos de terrenos o cartografías que son determinadas por la movilidad y capacidad de respuesta de los agentes vinculados según sea clasificada el nivel de impacto y las interacciones requeridas para la generación de respuestas óptimas, gene-

ralizadas o específicas en la reacción a los eventos y estructuras modeladas (Hawe, Coates, Wilson y Crouch, 2012).

Dentro de la seguridad crítica también se encuentra el uso de equipos UAV, que soporten la toma de imágenes y video, frente a una situación de riesgo en operaciones de combate donde el apoyo satelital y la red de equipos complementan las misiones con información visual crítica (Skinemoen, 2014).

En el concepto de seguridad crítica también se aplican modelos como el control de riesgo adaptativo y mecanismos de gestión de la seguridad (ARCSM), para garantizar la minimización del riesgo cuanto sea posible, tomando para esto el control por retroalimentación con algoritmos adaptativos desarrollados para cada nodo, logrando así el monitoreo permanente de estos con una arquitectura de control retroalimentada y distribuida (Jiang, Sang y Zhang, 2012) there are some growing critical challenges of security management and risk control. For the unpredicted and especially unsecured environments, such security-critical distributed real-time embedded systems need to enforce security on multiple nodes in order to against the potential threats as well as satisfying the real-time requirements. Unlike the traditional ad hoc static

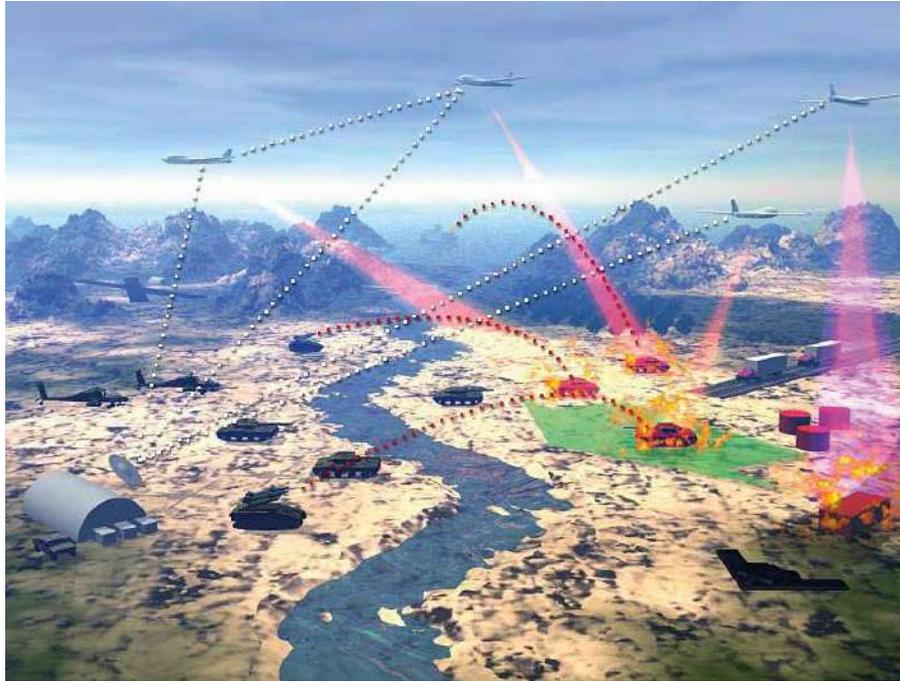


Figura 32. Ilustración de un comando y control distribuido  
Fuente: DARPA, Murray, 2016.

designing approaches, based on feedback theory, this paper proposes an Adaptive Risk Control and Security Management (ARCSM).

En términos de defensa satelital se ha diseñado un sistema de razonamiento autónomo multiagente (MAARS), con el cual se planean escenarios de riesgo frente a ataques sobre los satélites y se generan estrategias de control con modelos de incertidumbre, para la toma de decisiones por parte de los agentes, (Kwak, Scerri, Tambe, Sert y Freedy, 2011).

### Tecnologías comparadas

Los sistemas de control en red han tenido amplios enfoques, donde se incluye el concepto de interacción entre agentes (González, 2012), en aplicaciones de la robótica cooperativa como las relacionadas a continuación:

- Simulación de juegos.
- Búsqueda y rescate.
- Cubrimiento de regiones o exploración de terrenos desconocidos y hostiles.
- Simulación de sistemas biológicos.
  - Cardúmenes de peces.
  - Aves.
  - Colonias de hormigas.
  - Ecosistemas de presas y cazadores.

- Enjambres.
- Formaciones y coreografías.

Entre otros usos, como redes de energía, sistemas sociales, redes financieras, sistemas complejos y demás formas de interacción entre agentes, de donde se pueden buscar soluciones aplicables a los sistemas satelitales.

### Aplicaciones en robótica móvil

Estados del arte relacionados con la robótica, reúnen múltiples conceptos por medio de los cuales se abordan las necesidades de estudio en sistemas en red, como lo son; sistemas multirobot divididos en arquitecturas, comunicaciones y redes de sensores, inteligencia y robótica de enjambres y sistemas cooperativos, como lo muestran Zhu y Yang (2010), donde se concreta el interés de estudio en redes de sensores y enjambres robóticos.

En robótica cooperativa se han aplicado los principios de sistemas en red, como en el caso de lograr determinar algoritmos de consenso para control cooperativo multivehículo (Ren, Chao, Member, Bourgeois y Member, 2008), con el cual se validan los movimientos y desplazamientos de robots dentro de un área específica y con múltiples parámetros de control.

Como la aplicación de algoritmos de consenso distribuido con maniobras rendezvous o la aplicación de alineación de ejes. Que desde sus inicios consideraban la



tolerancia de fallos, la confiabilidad del sistema y la cooperación debida a situaciones de competitividad entre robots móviles (Cao, Fukunaga, Kahng y Meng, 1997).

Se ha trabajado en la dinámica de sistemas distribuidos para múltiples vehículos en red, analizando el comportamiento colectivo de los grupos desde el punto de vista de las interacciones locales que se puedan presentar, es decir mediante la aproximación a sistemas de administración de recursos computacionales embebidos en múltiples vehículos, con el fin de subsanar operaciones de búsqueda y rescate, sistemas de reconocimiento, supervivencia, combate, entre otros, como lo describen tácitamente Wei, Randal y Beard (2007).

Otro caso de aplicación de la teoría *redes* se muestra en el control de tiempos y sincronización de tareas realizado en un ejemplo de misiones con múltiples UAV, considerando las capacidades para llegar a un objetivo de manera simultánea, para lo cual se desarrolla la gestión de punto de encuentro *redes* a través del diseño de máquina de estados y un control cooperativo con enfoque de descomposición aplicado a requerimientos de sistemas de vehículos múltiples (McLain, Chandler, Rasmussen y Pachter, 2001).

De manera complementaria se han realizado amplios trabajos en materia de sistemas multiagente con aplicaciones en detección de objetos, habilidades básicas de movimiento, configuraciones multicapa, aprendizajes multiagente, manejo de acciones, control de movimiento y control de colisiones, explícitos en la dinámica del fútbol de robots (Ortega, 2006).

Los sistemas de múltiples UAV aplican también algoritmos de control de caza, tales como la búsqueda de objetivos, mediante intercambio de información de sensores en ambientes desconocidos con algoritmos de aprendizaje en línea, para la cooperación y coordinación en regiones subdivididas según el número de UAV.

Alianzas dinámicas con algoritmos de asignación de tareas de control inteligente de presa y cazador, con coordinación y banderas de estado, seguimiento con modelos geométricos determinados por método gráfico o método de espacio libre, seguimiento con campos potenciales artificiales y el gradiente de dirección, persecución basada en inteligencia artificial como redes neuronales, algoritmos genéticos, lógica difusa, algoritmos evolutivos, entre otros, y de manera complementaria algoritmos para captura de objetivos basada en predicción dinámica de presa y cazador (Xiang y Daqi, 2013).

En los sistemas de control cooperativos se describe también el modelo Kripke, respecto al análisis de máquinas de

estado finito, utilizado para el control y monitoreo de ruta de múltiples UAV, aplicando el árbol de lógica computacional (CTL), con la exploración exhaustiva del espacio de estados y del comportamiento del sistema, para definir tanto número de equipos en vuelo como condiciones y selección de ruta para estos (Sirigneedi, Tsourdos, White y Zbikowski, 2011)

Se tienen aplicaciones con UAV donde el mapeo de territorios hostiles, las operaciones de supervivencia y rescate y los retardos en las comunicaciones, son capacidades desarrolladas para la inclusión del control distribuido ante estrategias de comunicación y redes con sistemas de navegación y visión en tiempo real, mediante la inclusión de arquitecturas como el control de iniciativa mixta para equipos de autómatas, (MICA), con la cual se integran soluciones para UAV con determinación de ambientes desconocidos, jerarquías, tareas modulares y adaptaciones a sensores y estrategias de misión diversas (Ryan, Zennaro, Howell, Sengupta y Hedrick, 2004).

Una de las configuraciones complementarias que enlaza la robótica con el control de sistemas en red satelital, es el control remoto de robots, mediante el sostenimiento de la órbita de una formación de satélites pequeños, con la cual se mantiene la distancia y proyección de comunicaciones entre satélites con línea de cobertura hacia los robots en la superficie de la tierra (Padron, Nebylov y Kn-yazhsky, 2017), siendo así una aplicación de integración de uso de redes satelitales con redes terrestres activas.

Se han desarrollado algunos algoritmos de consenso medio para control distribuido, con el fin de mantener el consenso promedio preservando la privacidad de la red, mediante algoritmos de consenso con la derivada de la covarianza y caracterización de la convergencia del sistema, para no dejar información fuera de la red (Mo y Murray, 2017), todos estos aplicados a control de sistemas multiagente.

En términos de consensos promedio, se han desarrollado sistemas multiagente neuronales en redes no dirigidas con ajuste y conmutación de topología para la estabilización en términos de los eigenvalores del Laplaciano, junto con el método de desigualdad de la matriz lineal del sistema (Sun, 2012).

Un algoritmo de consenso para formación en vuelo con control líder seguidor, planteado mediante modelos con dinámica de segundo orden, manteniendo un flujo de información unidireccional, incluso en caso de no presentarse liderazgo centralizado de la red, aplicando ajustes al algoritmo para abordar problemas previo a la identificación clara de los estados (Ren, 2006). Adicional a esto se han planteado modelos de control conductual para formaciones de robots con topologías de anillo (Lawton, 1999).

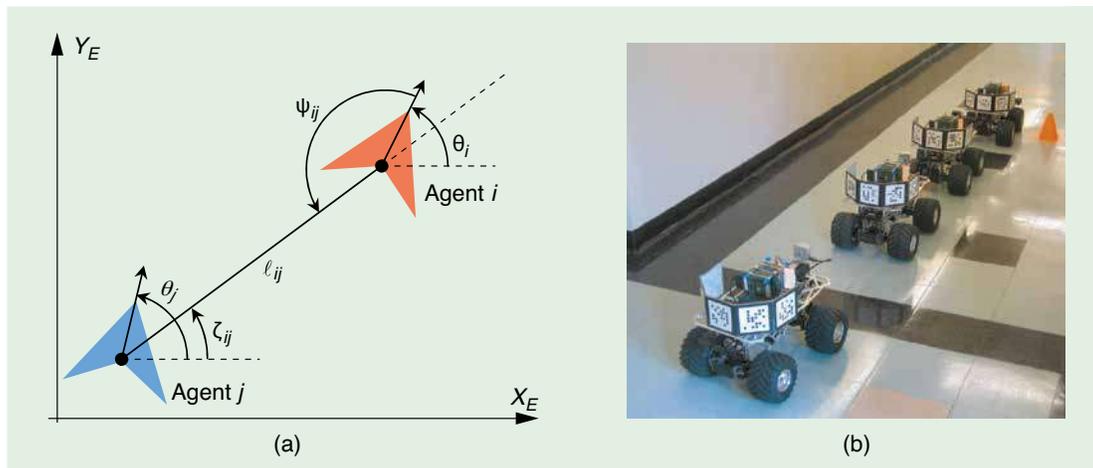


Figura 33. Experimento de líder seguidor en agentes  
Fuente: Cruz et al., 2007.

En la figura 33, se muestra la aplicación del control cooperativo descentralizado en el aprovechamiento de los sistemas embebidos junto con las redes de sensores en robots móviles, a través de una plataforma de pruebas de sistemas multivehículos (COMET), con implementación de control PID y simulación con GAZEBO (Cruz et al., 2007).

Otro trabajo complementario es el modelamiento y configuración de robots móviles para el análisis de topologías controladas según la posición de los móviles y la velocidad resultante luego de la conmutación de red en anillo, estrella y cadena, como lo muestra la figura 34, refiriendo cada robot como una masa puntual y donde todo lo anterior es realizado bajo una estrategia de control distribuido con formaciones homogéneas (Martínez, 2015).

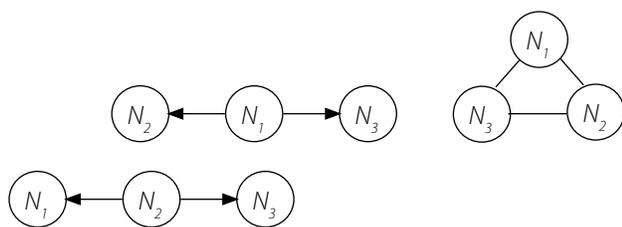


Figura 34. Topologías de red estrella, anillo en formación y cadena  
Fuente: Martínez, 2015.

Con estas configuraciones fue necesario formular cada eje de los robots por separado, con lo cual resultan leyes de control para cada eje, sin embargo, los resultados dan el paso a inclusiones de nuevas trayectorias y nuevas topologías para trabajos posteriores, en caso de diseñar el sistema para evitar colisiones (Martínez, 2015).

Dentro de las propuestas de trabajo de sistemas relacionados con el desarrollo de la fusión sensorica, se tienen avances en la implementación de filtros de consenso para

redes de sensores y distribución operativa de la fusión sensorica (Ögren, Fiorelli, Leonard y Member, 2004), así como el desarrollo de redes distribuidas de sensores aplicadas a control cooperativo en escenarios de comunicación y redes de múltiples vehículos aéreos, para la defensa en operaciones marítimas, considerando la disposición de nodos de retardo múltiples y el diseño de controladores de autoajuste extremo, en redes de sensores distribuidos y conectados de forma inalámbrica (Richard, 2009).

La disposición de sistemas en enjambre de robots, vincula el diseño de arquitectura, la formalización de redes de sensores y comunicaciones, disponiendo de enjambres inteligentes y cooperación entre los robots de la red, basados en la aplicación del filtro de Kalman, extendido con un estimador de estados o sistemas para la localización de nodos en redes de sensores con tolerancia de retardos funcionales (Zhu y Yang, 2010), por otra parte, se proponen sistemas de optimización de partículas en enjambre, basados en los estados de la vecindad o funciones de neuronas virtuales con componentes de percepción, comunicador, reflector y reconocimiento en las redes homologas a los sistemas biológicos.

Se han desarrollado técnicas de control bioinspiradas, como la optimización de las colonias de hormigas, con las cuales se formulan los grafos característicos, incluyendo estocástica y modificaciones de datos dinámicas en múltiples objetivos (Dorigo, Birattari y Stutzle, 2006).

Recientemente el concepto de optimización aplicado al control de estructuras en red, se identifica con el uso de algoritmos para optimización adaptativa distribuida, con la cual se evalúan los pesos y restricciones de la red, mediante la teoría de grafos y posteriormente se hace la esti-



mación del gradiente como base al consenso distribuido de la red (Kempton, Herrmann y Di Bernardo, 2016), por otra parte, estas investigaciones han trascendido a la estimación de eigenvalores del laplaciano del grafo, utilizado ahora para la configuración de consenso robusto a través de estrategias multicapa adaptativas, (Kempton, Herrmann y Di Bernardo, 2017).

## Conclusiones

La revisión y búsqueda de antecedentes del concepto de sistemas de control en red como base para la configuración y diseño de misión de sistemas satelitales de pequeña escala, se logró sintetizar mediante la descripción de los diferentes tópicos y descriptores con los que se estructura la revisión documental, alcanzando con esto la identificación y muestra de los factores de análisis, con los que se ilustran diferentes escenarios de trabajo para la generación de soluciones a sistemas satelitales alternativos al uso de satélites de gran escala.

A través del análisis de los factores de diseño de misión, carga útil, operación, configuración, control, pruebas y emulación de sistemas, se ilustraron diferentes escenarios de trabajo básicos para el desarrollo de sistemas de control en red, con el fin de ser dispuestos para ser aplicados a modelos de integración de tecnologías y desarrollo de capacidades en la prestación de servicios aeroespaciales.

Se identificaron las necesidades y referentes de interés, tanto de países líderes en el sector espacial, como países en vía de desarrollo, para el diseño de estrategias de bajo costo y de configuración de sistemas multiagente, mediante la descripción de experiencias y requerimientos de uso en diferentes tipos de proyectos de equipos de pequeña escala, así como de modelos aplicados en robótica móvil y en particular sobre plataformas de sistemas de aeronaves no tripuladas.

Se recopilaron los requerimientos logísticos, operativos y se describieron las tendencias en las investigaciones y producción de empresas de los gestores de servicios aeroespaciales, para cada una de las estructuras y componentes de la arquitectura genérica de las plataformas satelitales, con las que se presentaron los mecanismos de prueba, los sistemas de la fusión sensorica y el concepto de diseño de misión, como eje articulador de los propósitos espaciales.

De igual modo, se presentaron diferentes modos de configuración para el control de actitud, distribución de recursos en red, así como diferentes tendencias en la programación de redes basadas en agentes, pasando por algoritmos adaptativos y robustos de la robótica móvil hasta configuraciones de inteligencia artificial distribuida como apoyo a la administración de recursos en red.

En términos generales, el requerimiento de configuración de satélites de pequeña escala mediante sistemas de control en red, está apoyado de procesos para la definición de requisitos de misión como primera medida, diseño de órbita, diseño de sensores a bordo, sistemas de propulsión, métodos de consenso, algoritmos para el seguimiento de trayectorias y definición de formaciones para la cooperación de recursos en red.

Finalmente se dejan abiertas las posibilidades para el uso de los factores de análisis, a fin de abordar propuestas de operación de sistemas satelitales multiagente, que sirvan como medio para el ejercicio de la defensa y la soberanía en el uso del espacio con soluciones de bajo costo que implican sistemas de control en red, y que demandan nuevas configuraciones por la limitada capacidad de recursos de los satélites de pequeña escala.

## Referencias

- Abbott, M. (2000). *The Role of Small Satellites in NASA and NOAA Earth Observation Programs*, 41-50. <https://doi.org/10.17226/9819>
- Agogino, A., HolmesParker, C. & Tuner, K. (2012). Evolving distributed resource sharing for cubesat constellations. *GECCO'12 - Proceedings of the 14th International Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 1015–1022. <https://doi.org/10.1145/2330163.2330305>
- Alvarez, J., & Walls, B. (2016). *Constellations, Clusters, and Communication Technology: Expanding Small Satellite Access to Space*.
- Beard, R. W. (2002). Virtual structure based spacecraft formation control with formation feedback. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 1-8. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/3946/b500a-d05a2d9f6c0a9519054e0b7c82e9f77.pdf>
- Bouwmeester, J., & Guo, J. (2010). Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica*, 67(7–8), 854–862. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.06.004>
- Braukhane, A., Arza, M., Bacher, M., Calaprice, M., Fiedler, H., Koehne, V., ... Rivera, J. J. (2010). FormSat, a scalable formation flying communication satellite system. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, (1). <https://doi.org/10.1109/AERO.2010.5446999>
- Brockett, R. W. (2008). *Reduced Complexity Control Systems?? IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 41). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00001>
- Cao, L., & Chen, X. (2016). Minimum sliding mode error feedback control for inner-formation satellite system with J 2 and small eccentricity. *59(July)*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11432-016-5573-1>
- Cao, L., Chen, X., & Sheng, T. (2013). Fault tolerant small satellite attitude control using adaptive non-singular terminal sli-

- ding mode. *Advances in Space Research*, 51(12), 2374–2393. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.02.004>
- Cao, Y. U., Fukunaga, A. S., Kahng, A. B., & Meng, F. (1997). Cooperative mobile robotics: antecedents and directions. *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, 1, 226–234. <https://doi.org/10.1109/IROS.1995.525801>
- Castellanos, C. A. y Aparicio, L. E. (2014). Diseño y Simulación de un Sistema de Determinación de Actitud basado en el Filtro Extendido de Kalman para el Cubesat Colombia I. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 70, 146-154
- Chen, B., Linz, D. D., & Cheng, H. H. (2008). XML-based agent communication , migration and computation in mobile agent systems, 81, 1364–1376. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2007.10.026>
- Chen, Z., & Zeng, Y. (2013). A Swarm Intelligence Networking Framework for Small Satellite Systems. *Communications and Network*, 5(September), 171–175.
- Cruz, D., McClintock, J., Perteet, B., Orqueda, O. A. A., Cao, Y., & Fierro, R. (2007). Decentralized cooperative control. *IEEE Control Systems Magazine*, (June), 58–78.
- De Arboleya, J. L. G., & Moreno, J. S. (2012). Multiagent attitude control system for satellites based in momentum wheels and event-driven synchronization. *Journal of the Astronautical Sciences*, 59(4), 726–746. <https://doi.org/10.1007/s40295-014-0010-4>
- De Freitas, N. C. A., Filho, P. P. R., De Moura, C. D. G., & Silva, M. P. S. (2016). AgentGeo: Multi-Agent System of Satellite Images Mining. *IEEE Latin America Transactions*, 14(3), 1343–1351. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7459619>
- Dhios, R. A. (2013). *Paradigma de "Agentes de Software" aplicado al desarrollo de satélites amateurs.*, 1–5. VII Congreso Argentino de Tecnología Espacial. Mayo 15-17, 2013. Mendoza, Argentina.
- Díaz González, F. A., Quintero Torres, S. V., Triana Correa, J. S. & Morón Hernández. D. C. (2014). *Aproximación a los sistemas de percepción remota en satélites pequeños.*
- Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), 28–39. <https://doi.org/10.1109/MCI.2006.329691>
- Elderman, E., & Kronhaus, I. (2016). Analysis of electric propulsion capabilities in establishment and. March 2016, Conference: 6th International Conference on Astrodynamics Tools and Techniques, [https://www.researchgate.net/publication/304800017\\_](https://www.researchgate.net/publication/304800017_)
- Engelen, S. (2016). *Swarm Satellites: Design, Characteristics and Applications. TU Delft University (Vol. 91). Doi: 10.4233/uuid:a5dbc5f7-039b-431b-8f32-d3394e690348, https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a5dbc5f7-039b-431b-8f32-d3394e690348?collection=research*
- Forero, D. R., & Libertadores, F. U. L. (2015). aerodinámica de un globo sonda recuperable y reutilizable 1.
- Gill, E., Sundaramoorthy, P., Bouwmeester, J., Zandbergen, B., & Reinhard, R. (2013). Acta Astronautica Formation flying within a constellation of nano-satellites : The QB50 mission. *Acta Astronautica*, 82(1), 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.04.029>
- Guerman, A., Ovchinnikov, M., Smirnov, G., & Trofimov, S. (2012). Closed Relative Trajectories for Formation Flying with Single-Input Control, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/967248>
- Gurfil, P., Herscovitz, J., & Pariente, M. (2014). SSC12-VII-2 The SAMSON Project – Cluster Flight and Geolocation with Three Autonomous Nano-satellites.
- Hawe, G. I., Coates, G., Wilson, D. T., & Crouch, R. S. (2012). Agent-Based Simulation for Large-Scale Emergency Response : A Survey of Usage and Implementation, 45(1). <https://doi.org/10.1145/2379776.2379784>
- Huang, H., Yang, L., Zhu, Y., & Zhang, Y. (2014). Acta Astronautica Collective trajectory planning for satellite swarm using inter-satellite electromagnetic force. *Acta Astronautica*, 104(1), 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.07.032>
- Jadbabaie, A., Lin, J., & Morse, A. S. (2003). Coordination of Groups of Mobile Autonomous Agents Using Nearest Neighbor Rules, 48(6), 988–1001.
- Ji, M., Member, S., Egerstedt, M., & Member, S. (2007). Distributed Coordination Control of Multiagent Systems While Preserving Connectedness, 23(4), 693–703.
- Julián, V., & Botti, V. (2003). Estudio de métodos de desarrollo de sistemas multiagente. Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, 7(18), 65-80. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92501806>
- Kempton, L. C., Herrmann, G., & di Bernardo, M. (2017). Distributed optimisation and control of graph Laplacian eigenvalues for robust consensus via an adaptive multilayer strategy. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1–9. <https://doi.org/10.1002/rnc.3808>
- Kempton, L., Herrmann, G., & di Bernardo, M. (2016). Distributed adaptive optimization and control of network structures. *2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*, (Cdc), 5839–5844. <https://doi.org/10.1109/CDC.2016.7799167>
- Kong, E. M. C., Kwon, D. W., Schweighart, S. A., Elias, L. M., Sedwick, R. J., Miller, D. W., & Case, T. (2004). Electromagnetic Formation Flight for Multisatellite Arrays, 41(4).
- Kumar, V. (2017). Autonomous Formation Keeping of Geostationary Satellites with Regional Navigation Satellites and Dynamics. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1–21. <https://doi.org/10.2514/1.G001652>
- Kwak, J., Scerri, P., Tambe, M., Sert, O., & Freedy, A. (2011). Towards a Robust MultiAgent Autonomous Reasoning System (MA-



- ARS): An Initial Simulation Study for Satellite Defense. *AIAA Infotech at Aerospace*, (March), 1–17.
- J.R.T. Lawton & B.J. Young. (1999). Decentralized approach to elementary formation maneuvers. <http://www.et.byu.edu/~beard/papers/library/lawton-tra99.pdf>
- Lawton, J. R., & Beard, R. W. (2002). Synchronized multiple spacecraft rotations, *38*, 1359–1364.
- Lesser, V. R. (1995). *Systems : An Emerging Subdiscipline of AI*, 27(3).
- Lesser, V. R. (1999). Cooperative multiagent systems: a personal view of the state of the art. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 11(1), 133–142. <https://doi.org/10.1109/69.755622>
- Li, J., Pan, Y., & Kumar, K. D. (2010). Formation Flying Control of Small Satellites, (August), 1–25. <https://doi.org/10.2514/6.2010-8296>
- Lowe, C. J., & Macdonald, M. (2014). Acta Astronautica Rapid model-based inter-disciplinary design of a CubeSat mission. *Acta Astronautica*, 105(1), 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.10.002>
- Ma, Y., Jiang, W., Sang, N., & Zhang, X. (2012). ARCSM: A distributed feedback control mechanism for security-critical real-time system. *Proceedings of the 2012 10th IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications, ISPA 2012*, (2), 379–386. <https://doi.org/10.1109/ISPA.2012.56>
- Martin, M., Klupar, P., Kilberg, S. & Winter, J. (1997). TechSat 21 and revolutionizing space missions using microsatellites. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. 1–10. <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2001/All2001/3/>
- Martinez, R. (2015). Diseño de un controlador para la formación de grupos de robots móviles, Conference: XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA At: Cancún, Quintana Roo, México, <https://www.researchgate.net/publication/280946697>.
- Mazal, L., & Gurfil, P. (2014). Acta Astronautica Closed-loop distance-keeping for long-term satellite cluster flight. *Acta Astronautica*, 94(1), 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.08.002>
- Mclainl, T. W., Chandler, P. R., Rasmussen, S., & Pachter, M. (2001). Cooperative Control of UAV Rendezvous.
- Medina, C. (2017). Nanosatélites.
- Mier-hicks, F., & Lozano, P. C. (2017). Spacecraft Charging and Attitude Control Characterization of Electro-spray Thrusters on a Magnetically Levitated Testbed, (February).
- Mo, Y., & Murray, R. M. (2017). Privacy Preserving Average Consensus, 62(2), 753–765.
- Moradi, M. H., Razini, S., & Hosseini, S. M. (2016). State of art of multiagent systems in power engineering : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 814–824. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.339>
- Murray, R. M. (2007). Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 129, 571–583. <https://doi.org/10.1115/1.2766721>,
- Nunes, M (2015). Satellite Constellation Optimization Method for Future Earth Observation Missions Using Small Satellites. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/272161831>
- Ögren, P., Fiorelli, E., Leonard, N. E., & Member, S. (2004). Cooperative Control of Mobile Sensor Networks : Adaptive Gradient Climbing in a Distributed Environment, 49(8), 1292–1302.
- Olfati-saber, B. R., Fax, J. A., & Murray, R. M. (2007). Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems, 95(1), 215–233.
- Olfati-saber, R., & Murray, R. M. (2004). Consensus Problems in Networks of Agents With Switching Topology and Time-Delays, 49(9), 1520–1533.
- Olfati-saber, R., & Shamma, J. S. (2005). Consensus Filters for Sensor Networks and, (0), 6698–6703.
- Ortega, F. (2006). Sistemas Multiagente y Fútbol de robots : Estado del Arte, 1–7. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/similar?doi=10.1.1.83.5889&type=cc>
- Padron, A. M., Nebylov, A. & Knyazhsky, A. (2017). Verification of the Precise Orbital Holding of Small Satellite Formation for Remote Control of Robots on a Planet Surface, 360–363.
- Poghosyan, A., & Golkar, A. (2016). Progress in Aerospace Sciences CubeSat evolution : Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. *Progress in Aerospace Sciences*, (September), 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.11.002>
- Poveda G, O. S. (2016). Integración de satélites en el desarrollo de operaciones militares aéreas en Colombia según su órbita.
- Radhakrishnan, R., Edmonson, W. W., Afghah, F., Rodriguez-osorio, R. M., Pinto, F. & Burleigh, S. C. (2016). Survey of Inter-Satellite Communication for Small Satellite Systems: Physical Layer to Network Layer View.
- Ren, W. (2006). Consensus Based Formation Control Strategies for Multi-vehicle Systems. *American Control Conference Minneapolis*, 4237–4242
- Ren, W. & Beard, R. W. (2004). Decentralized Scheme for Spacecraft Formation Flying via the Virtual Structure Approach, 27(1), 73–82.
- Ren, W., Beard, R. W., Atkins, E. M. & Theory, A. G. (2005). A Survey of Consensus Problems in Multi-agent Coordination, 1859–1864.
- Ren, W., Chao, H., Member, S., Bourgeois, W. & Member, S. (2008). Experimental Validation of Consensus Algorithms for Multi-vehicle Cooperative Control, 16(4), 745–752.
- Richard, M. (2009). Cooperative control of distributed autonomous systems with applications to wireless sensor networks.

- Rouff, C. (2000). Process for Introducing Agent Technology into Space Missions. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2743–2750. DOI: 10.1109/AERO.2001.931295, Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/931295/>
- Ryan, A., Zennaro, M., Howell, A., Sengupta, R. & Hedrick, J. K. (2004). An overview of emerging results in cooperative UAV control. *Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference On*, 1, 602–607 Vol.1. <https://doi.org/10.1109/CDC.2004.1428700>
- Saaj, C. M., Bandyopadhyay, S. & Bandyopadhyay, B. (2010). Robust Control And Path Planning Algorithms For Small Satellite Formation Flying Missions. *IAC-09-B4.*, 1–7. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/6d71/290b5ffde8e9d326dbd6499ae9a7cbf709d4.pdf>
- Sadeghi, S. & Emami, M. R. (2017). ScienceDirect Multi-spacecraft studies of the auroral acceleration region : From cluster to nanosatellites. *Advances in Space Research*, 59(5), 1173–1188. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.037>
- Scharnagl, J., Scharnagl, J., Schilling, K., Schilling, K., Scharnagl, J. & Schilling, K. (2016). ScienceDirect Hardware-in-the-Loop Hardware-in-the-Loop Hardware-in-the-Loop Mobile Based on on Mobile Mobile Robot Platforms. *IFAC-PapersOnLine*, 49(30), 65–70. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.127>
- Schilling, K. (2017). Perspectives for miniaturized, distributed, networked cooperating systems for space exploration. *Robotics and Autonomous Systems*, 90, 118–124. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.10.007>
- Sedwick, R. J., Supervisor, T., Miller, D. W. & Velde, W. E. Vander. (2001). Development and Analysis of a High Fidelity Linearized J2 Model for Satellite Formation Flying.
- Shao, X., Song, M., Wang, J., Zhang, D. & Chen, J. (2017). Satellite formation keeping using differential lift and drag under J2 perturbation. Doi: <https://doi.org/10.1108/AEAT-06-2015-0168>
- Sirigineedi, G., Tsourdos, A., White, B. A. & Zbikowski, R. (2011). Kripke modelling and verification of temporal specifications of a multiple UAV system, 31–52. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10472-011-9270-x>
- Skinemoen, H. (2014). UAV & Satellite Communications. *IEEE, Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES)*, 12–19.
- Sorensen, T. (junio, 2014). Cooperative Control of Multiple Small Satellites using the Comprehensive Open-architecture Space Mission Operations System Cooperative Control Of Multiple Small Open-Architecture Space Mission Operations.
- Sun, Y. (2012). Average consensus in networks of dynamic agents with uncertain topologies and time-varying delays. *Journal of the Franklin Institute*, 349(3), 1061–1073. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.franklin.2011.12.007>
- Sundararaman, B., Buy, U. & Kshemkalyani, A. D. (2005). Clock synchronization for wireless sensor networks : a survey, 3, 281–323. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2005.01.002>
- Taylor, P., Wang, Q., Gao, H., Alsaadi, F. & Hayat, T. (octubre, 2014). Systems Science & Control Engineering : An Open An overview of consensus problems in constrained multi-agent coordination, 37–41. Doi: <https://doi.org/10.1080/21642583.2014.897658>
- Truszkowski, W., Rash, J., Rouff, C. & Hinchey, M. (2004). Some autonomic properties of two legacy multi-agent systems - LOGOS and ACT. *Proceedings - 11th IEEE International Conference and Workshop on the Engineering of Computer-Based Systems, ECBS 2004*, 490–498. Doi: <https://doi.org/10.1109/ECBS.2004.1316738>
- Tsarev, A. (2013). Smart Solutions: Multi-Agent Technology for Real-Time Enterprise Resource Management. *IEEE/ACIS 12th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, 1–6. Doi: 10.1109/ICIS.2013.6607827. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6607827/>
- Villaplana, E. (2008). Gormas: guías para el desarrollo de sistemas multiagente abiertos basados en organizaciones. Tesis Doctorado en informática *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Wang, B., Wang, J., Zhang, B., S. & Li, X. (2016). *Global Cooperative Control Framework for Multiagent Systems Subject to Actuator Saturation With Industrial Applications*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 1–14. Doi: 10.1109/TSMC.2016.2573584
- Wang, C., Li, J., Jing, N., Wang, J., & Chen, H. (2011). A distributed cooperative dynamic task planning algorithm for multiple satellites based on multi-agent hybrid learning. *Chinese Journal of Aeronautics*, 24(4), 493–505. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60057-5](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60057-5)
- Wang, P. (septiembre, 1996). Coordination and control of multiple microspacecraft moving in formation.
- Wawrzaszek, R. & Banaszekiewicz, M. (2007). Control and reconfiguration of satellite formations by electromagnetic forces. *Journal of Telecommunications and Information Technology*. 1, 54-58. Recuperado de <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BAT8-0005-0012>
- Wei Ren, Randal W. Beard, & E. M. A. (abril, 2007). Information Consensus in Multivehicle Cooperative Control. *IEEE Control Systems Magazine*, 71–82.
- Weidow, D., Bristow, J. & Weidow, D. A. (1999). NASA/DoD University Nano-Satellites for Distributed Spacecraft Control.
- Xiang, C. A. O. & Daqi, Z. H. U. (julio, 2013). *A Survey of cooperative hunting control algorithms for multi-AUV systems*. Conferencia presentada en Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 5791-5795. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6640452/>
- Xu, Y., Fitz-Coy, N., Lind, R. & Tatsch, A. (enero, 2007).  $\mu$  Control for Satellites Formation Flying. *Journal of Aerospace Engineering*, 20(1). Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2007\)20:1\(10\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2007)20:1(10))



- Yeh, H., Sparks, A. & Force, A. (junio, 2000). *Geometry and Control of Satellite Formations*. Conferencia presentada en Proceedings of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.00CH36334) Doi: 10.1109/ACC.2000.878926, 384–388. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/878926/>
- Zampieri, S. (2008). *Trends in Networked Control Systems. IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 41). IFAC. Doi: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00486>
- Zenick, R. G. & Kohlhepp, K. (2001). *GPS Micro Navigation and Communication System for Clusters of Micro and Nanosatellites*. Conferencia presentada en 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No.01TH8542), doi: 10.1109/AERO.2001.931212. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/931212/>
- Zetocha, P., Self, L., Wainwright, R. & Burns, R., Brito, M. & Surka, D. (2000). Commanding and controlling satellite clusters. *IEEE Intelligent Systems*, 15(6), 8-13. doi:10.1109/5254.895850. Recuperado de <https://www.computer.org/csdl/mags/ex/2000/06/x6008-abs.html>
- Zhang, H. & Gurfil, P. (2015). Acta Astronautica Satellite cluster flight using on-off cyclic control. *Acta Astronautica*, 106, 1–12. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.10.004>
- Zhang, H. & Gurfil, P. (2016). *Cooperative Control of Multiple Satellites via Consensus*. Conferencia presentada en 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 1102–1107. Doi: 10.1109/MED.2016.7536011. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7536011/>
- Zhu, A. & Yang, S. X. (2010). *A Survey on Intelligent Interaction and Cooperative Control of Multi-robot Systems*. Conferencia presentada en IEEE ICCA 2010. 1812–1817. Doi: 10.1109/ICCA.2010.5524132. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5524132/>
- Zhu, J., Yang, Q., Huang, W. & Lu, R. (2015). A formal model of satellite communication system network control protocol based on generalized stochastic Petri nets. *2015 IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 340–346. Doi: <https://doi.org/10.1109/CompComm.2015.7387593>



## INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DA FRAÇÃO FINA PROVENIENTE DO AGREGADO GRAÚDO NO DESEMPENHO DE CONCRETO PERMEÁVEL<sup>1</sup>

INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE LA FRACCIÓN FINA DEL AGREGADO GRUESO EN EL DESEMPEÑO DEL CONCRETO PERMEABLE<sup>2</sup>

INFLUENCE OF PERCENTAGE OF FINE FRACTION OF COARSE AGGREGATE ON PERMEABLE CONCRETE PERFORMANCE<sup>3</sup>

Gersson Fernando Barreto Sandoval<sup>4</sup>

Nicole Schwantes-Cezario<sup>5</sup>

Geovana Souza Nogueira<sup>6</sup>

Berenice Martins Toralles<sup>7</sup>

---

### CIENCIA Y PODER AÉREO

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-9468 / Volumen 13 / Número 2 / julio-diciembre de 2018 / Colombia /pp. 126-136

Recibido: 18/04/2018

Aprobado por evaluador: 17/09/2018

Doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.605



#### Para citar este artículo:

Barreto Sandoval, G. F. Schwantes-Cezario, N. Souza Nogueira, G. Martins Toralles, B. (2018). Influência da porcentagem da fração fina proveniente do agregado graúdo no desempenho de concreto permeável. *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(2), 124-136. doi: 10.18667/cienciaypoderaero.605

<sup>1</sup> Artigo de pesquisa do projeto de mestrado: *Desempenho do Concreto Permeável com agregados sustentáveis*.

<sup>2</sup> Artículo de investigación asociado al proyecto: *Desempeño del Concreto Permeable con agregados sostenibles*.

<sup>3</sup> Research article associated with the project: *Performance of Permeable Concrete with sustainable aggregates*.

<sup>4</sup> Engenheiro Civil formado, pela Universidade Santo Tomás de Bogotá (2011), Colômbia. Especialista em geotecnia e pavimentação da Universidade Santo Tomás de Tunja (2012), Colômbia. Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estatal de Londrina (2014) e aluno de doutorado em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, Brasil. ORCID: 0000-0002-8702-8844. E-mail: gerson.barreto@gmail.com.

<sup>5</sup> Engenheira Civil formada pela Faculdade Assis Gurgacz, Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estatal de Londrina (2017) e aluno de doutorado em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, Brasil. ORCID: 0000-0002-3254-6396. E-mail: nicoleschwantes@hotmail.com

<sup>6</sup> Formada em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina (2016) e Técnica em Edificações. Aluna de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina. ORCID: 0000-0002-7059-257X. E-mail: geovanasouzanogueira@gmail.com

<sup>7</sup> Professor associado da Universidade Estadual de Londrina. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Materiais e Componentes de Construção, atuando principalmente nos seguintes temas: concretos e argamassas especiais; patologia das construções; materiais sustentáveis e habitações de interesse social. ORCID: 0000-0001-8828-7250. E-mail: betoralles@gmail.com

**Resumo:** O concreto permeável (CoPe) é um dos materiais com maior importância no campo da pesquisa atual. Este material possui uma permeabilidade elevada, dada pelo seu alto índice de vazios que varia de 15-35%. A distribuição dos vazios e a permeabilidade estão diretamente ligadas a granulometria do agregado graúdo utilizado, sendo que podem ser utilizadas granulometrias, uniformes, contínuas e descontínuas. A escolha de cada uma delas vai depender da solicitação em termos hidráulicos e mecânicos que sejam requeridos no material. Porém ainda existem grandes questionamentos relacionados com a influência de agregados menores de 4,8 mm no desempenho do material, já que estes agregados são oriundos do próprio agregado graúdo. Por tanto este estudo analisa a influência da porcentagem de fração fina proveniente do agregado graúdo nas propriedades mecânicas e hidráulicas do CoPe fabricado com britas de 19 mm (B1), 9,5 mm (B0) e uma mistura 50/50 (50B0/50B1) das duas britas mencionadas. Os resultados mostram que o CoPe 50B0/50B1 foi o melhor em termos de resistência alcançando 19 Mpa e em termos hidráulicos a B1 apresentou o maior coeficiente de permeabilidade de 4,27 mm/s em termos de resistência a alçando em média um valor de 10 Mpa e finalmente a B0 com permeabilidade de aproximadamente 3 mm/s e resistência mecânica de 9,5 Mpa. A melhoria no arranjo dos grãos e da fração fina própria do agregado explica os melhores resultados mecânicos. É interessante ressaltar que a baixa resistência dos CoPe's normalmente se dá pela fragilidade da interface entre os agregados.

**Palavras-chave:** concreto permeável, índice de vazios, permeabilidade, granulometria.

**Resumen:** El concreto permeable (CoPe) es uno de los materiales con mayor importancia en el campo de la investigación actual. Este material posee una permeabilidad elevada, dada por su alto índice de vacíos que varía de 15 a 35 %. La distribución de los vacíos y la permeabilidad están directamente ligadas a la granulometría del agregado grueso utilizado, siendo que pueden ser utilizadas granulometría, uniformes, contínuas y discontinuas. La elección de cada una de ellas dependerá de la solicitud en términos hidráulicos y mecánicos que se requieran en el material. Pero todavía existen grandes cuestionamientos relacionados con la influencia de agregados menores de 4,8 mm en el desempeño del material, ya que estos agregados proceden del propio agregado grueso. Por tanto, este estudio analiza la influencia del porcentaje de fracción fina proveniente del agregado grueso en las propiedades mecánicas e hidráulicas del CoPe fabricado con agregados gruesos de 19 mm (B1), 9,5 mm (B0) y una mezcla 50/50 (50B0/50B1) de los dos agregados mencionados mencionadas. Los resultados demuestran que el CoPe 50B0/50B1 fue el mejor en términos de resistencia alcanzando 19 MPa, y en términos hidráulicos la B1 presentó el mayor coeficiente de permeabilidad de 4,27 mm/s en términos de resistencia a alzar en promedio un valor de 10 MPa, finalmente la B0 con permeabilidad de aproximadamente 3 mm/seg resistencia mecánica de 9,5 MPa. La mejora en el arreglo de los granos y de la fracción fina propia del agregado explica los mejores resultados mecánicos. Es interesante resaltar que la baja resistencia de los CoPe normalmente se da por la fragilidad de la interfaz entre los agregados.

**Palabras clave:** concreto permeable, índice de vacíos, permeabilidad, granulometría.

**Abstract:** Permeable concrete (CoPe) is one of the most important materials in the field of current research. This material has a high permeability due to its high void rate ranging from 15 to 35%. The distribution of voids and permeability are directly linked to the granulometry of the coarse aggregate used, being that granulometry, uniform, continuous and discontinuous can be used. The choice of each of them will depend on the request hydraulic and mechanical terms that are required in the material. However, there are still major questions related to the influence of aggregates smaller than 4.8 mm on the performance of the material, since these aggregates come from the own aggregate itself. Therefore, this study analyzes the influence of the percentage of fine fraction coming from the coarse aggregate on the mechanical and hydraulic properties of the CoPe manufactured with 19 mm (B1), 9.5 mm (B0) and 50/50 (50B0/50B1) mixture of the two British mentioned. The results show that the CoPe 50B0/50B1 was the best in terms of resistance reaching 19 MPa and in hydraulic terms the B1 presented the highest coefficient of permeability of 4.27 mm/s in terms of resistance to raise in average a value of 10 MPa and finally the B0 with permeability of approximately 3 mm / when mechanical resistance of 9.5 MPa. The improvement in the arrangement of the grains and the fine fraction of the aggregate itself explains the best mechanical results. It is interesting to note that the low resistance of CoPe's is usually due to the fragility of the interface between the aggregates.

**Keywords:** Pervious concrete, void index, permeability, granulometry.

## Introdução

O concreto permeável (CoPe) surgiu como uma possível solução para a otimização da gestão das águas derivadas do escoamento superficial. A partir do crescimento do desenvolvimento urbano e do uso de materiais impermeáveis, a água encontra empecilhos para infiltrar no solo, acarretando em mudança no ciclo hidrológico (Value, Li, Ssha & War, 1973; Leming, Michael, Malcom & Rooney, 2007).

A intensificação do desenvolvimento urbano gerou graves problemas ao gerenciamento de águas pluviais nas cidades, devido à alteração do padrão de uso e ocupação do solo, que provocou um aumento de áreas urbanas impermeáveis. Como consequência, a probabilidade de incidências de alagamentos aumentou, pois, a infiltração de água no solo foi prejudicada. Dessa maneira, o concreto permeável (CoPe) surgiu como uma possível solução para a melhoria da gestão das águas derivadas do escoamento superficial (Value, Li, Ssha & War, 1973; Chandrappa & Biligiri, 2016).

Estudos e pesquisas sobre o CoPe vem sendo desenvolvidos nos Estados Unidos, Europa e Japão, porém, apenas na última década o tema despertou interesse na América do Sul, onde o Brasil vem se destacando no desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao desempenho desse material (Value, Li, Ssha & War, 1973; Yang & Jiang, 2003; Barreto, 2014).

O CoPe é considerado como um concreto especial e tem como principal característica a elevada permeabilidade, permitindo a percolação de água através do mesmo, que é decorrente do elevado índice de vazios, entre 15 a 30% (Neithalath, Weiss & Olek, 2006; Chandrappa & Biligiri, 2016; Yang & Jiang, 2003; Tennis, Leming & Akers, 2004; Martin & Putman, 2016).

Esse concreto, geralmente, é conhecido por não conter agregados miúdos, o que permite uma maior formação de vazios interconectados, contribuindo para o aumento da permeabilidade. Sendo assim, o CoPe é basicamente constituído por um aglomerante (cimento Portland), agregados graúdos e água potável, com uma relação água/cimento (*a/c*) inferior a 0,35 (Value, Li, Ssha & War, 1973; Chindaprasirt *et al.*, 2008; Ćosić, Korat & Ducman, 2015; Tennis, Leming & Akers, 2004; Zhang, Zhang, Yan & Liu, 2017; Chandrappa & Biligiri, 2016).

A composição granulométrica dos agregados graúdos, o procedimento de compactação e o consumo de cimento, estão diretamente relacionados ao índice de vazios do CoPe, pois esses fatores definem a porcentagem de vazios

interconectados e consequentemente a permeabilidade do material. Sendo assim, seus estudos são indispensáveis, tanto para a elaboração do CoPe, quanto para assegurar o desempenho do material (Chindaprasirt *et al.*, 2008; Yang, Shen & Zhuo, 2008; Mahboub *et al.*, 2009; Deo & Neithalath, 2011; Martin, Kave & Putman, 2014).

Quanto à escolha da granulometria do agregado graúdo, alguns estudos indicam a granulometria uniforme como ideal, pois agregados com tamanhos iguais formam vazios maiores, permitindo uma maior drenagem de água em um menor intervalo de tempo (Barreto, 2014). Em contrapartida, quando se procura ganhar resistência, é recomendado o uso de granulometrias contínuas, pois agregados com diferentes tamanhos aumentam os pontos de contato entre as partículas, gerando uma melhor distribuição de esforços, e consequentemente aumentam a resistência do material (Mahboub *et al.*, 2009; Lian, Zhuge & Beecham, 2011; Kim & Lee, 2010; Mrakovčić, Ceh & Jugovac, 2014).

Outra possível alternativa para elevar o desempenho mecânico do material é a incorporação de agregado miúdo, visando melhorar a distribuição granulométrica, e consequentemente aumentar a resistência mecânica do material em termos de tração na flexão (Ćosić *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2016). Segundo Yang *et al.* (2008) o incremento de agregados de tamanhos menores que 4,75 mm acarreta no aumento de pontos de contato entre os agregados, contribuindo na formação de pontes de aderência e melhorando o empacotamento entre as partículas do material que, por conseguinte, aumenta o desempenho mecânico.

Entretanto, ainda existem lacunas do conhecimento sobre a influência da composição granulométrica do agregado graúdo no CoPe. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo estabelecer a influência da fração fina do agregado graúdo (tamanhos de grão < 4,8 mm) no desempenho do CoPe. Para tanto foram estudados três CoPe's com agregados de diferentes porcentagens de frações finas e granulometrias distintas, sendo um com brita 9.5mm (B0), outro com brita 19mm (B1) e uma composição com 50% de cada um desses agregados (50B0/50B1).

## Materiais e programa experimental

### Materiais

Para a confecção dos CoPe's foram utilizados os seguintes materiais: Cimento Portland CP II F-32, brita basáltica e água potável. Os agregados graúdos de basalto, foram adquiridos na região de Londrina/PR, e apresentaram diâmetro máximo característico de 9.5 mm e 19 mm, para a Brita 0 (B0) e a Brita 1 (B1), respectivamente.



## Caracterização do agregado

Na tabela 1 pode-se observar as composições granulométrias da B0, B1 e da combinação 50B0/50B1, sendo que se considerou como fração fina todo material passante na peneira com abertura de 4.8 mm e retido no fundo. Além disso, os agregados foram verificados a dimensão máxima ( $D_{m\acute{a}x}$ ) e módulo de finura (MF), conforme prevê a NBR NM 248/2003 (2003).

Tabela 1. Granulometria dos agregados utilizados

Nomenclatura dos agregados	B0	B1	50B0/50B1
Abertura da peneira (mm)	Percentual retido (%)	Percentual retido (%)	Percentual retido (%)
37.5	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00
19	0,00	1.00	0.83
9.5	0.17	87.68	46.10
4.8	50.35	11.00	29.34
2.4	44.59	0.09	21.81
1.2	2.27	0.00	0.88
0.6	0.40	0.01	0.14
0.3	0.23	0.01	0.08
0.15	0.25	0.01	0.08
0.075	0.71	0.03	0,29
FUNDO	1.03	0.16	0,45
<b>% Fração fina</b>	49.49	0.32	23.72
<b><math>D_{m\acute{a}x}</math>(mm)</b>	9,5	19.0	19.0
<b>MF</b>	6.36	7.88	7.18

Fonte: Elaboração própria

De acordo com a tabela 1, verificou-se que a B0 possui uma granulometria com predominância em dois tamanhos de grãos, de 4.8 mm e 2.4 mm, com um percentual de fração fina de 49.5%, sendo considerada de granulometria descontínua. A B1 também foi considerada com uma granulometria uniforme, pois 90% dos seus grãos tinham tamanho de 9.5mm, sendo que a porcentagem de fração fina foi de 0.3%. Na composição 50B0/50B1, por outro lado, verificou-se uma melhoria na distribuição dos grãos, com tendência continua sendo que está composição apresentou uma porcentagem de fração fina de 23.7%.

Na sequência, foram realizados ensaios quanto a caracterização dos agregados graúdos de acordo com as normas NBR 7251/1982 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 9776, 1987), NBR NM 46/2003 (2003) e NBR NM 53/2003, os quais estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Caracterização agregados

Nomenclatura dos agregados	Massa Específica ( $g/cm^3$ )	Massa Unitária ( $g/cm^3$ )	Teor de material pulverulento (%)	Absorção de água (%)
B0	2.8	1.5	4.15	1.20
B1	2.8	1.6	2.55	1.42
50B0/50B1	2.8	1.6	3.35	1.31

Fonte: Elaboração própria

Verificou-se que a B0 apresentou maior porcentagem de material pulverulento (4.15%), quando comparada com as outras duas granulometrias utilizadas. Em termos de absorção de água os agregados não apresentaram diferenças significativas entre si, com absorção em torno de 1.4%, que são resultados condizentes com agregados de origem basáltica (Mehta & Monteiro, 2006).

## Elaboração dos concretos

O traço adotado para a confecção dos CoPe's foi de 1:3.26 (cimento: agregado graúdo), em massa, com uma relação água/cimento (a/c) de 0.34, de acordo com a pesquisa de Vélez (2010). A proporção dos materiais utilizados pode ser visualizada na tabela 3, sendo que o consumo de cimento foi de  $420 kg/m^3$ , condizente com o apresentado na literatura, na qual os consumos de cimento variam entre 350 a  $550 kg/m^3$  (Tennis, Leming & Akers, 2004; Chandrappa & Biligiri, 2016; Kia, Wong & Cheeseman, 2017).

Tabela 3. Consumo de materiais utilizados por  $m^3$

Materiais	$Kg/m^3$
Cimento	420.0
Agregado graúdo	1369.2
Água	136.0

Fonte: Elaboração própria

Após o cálculo do consumo dos materiais os concretos foram confeccionados, sendo que a mistura dos mesmos foi realizada em betoneira, com duração de 5 minutos. Primeiramente adicionou-se a brita e metade da água, em seguida colocou-se o cimento e a betoneira foi acionada até que a mistura estivesse homogênea e, por fim, adicionou-se o restante da água.

## Ensaio em estado fresco

No estado fresco os concretos foram ensaiados quanto ao índice de consistência (*slump test*), afim de verificar a plasticidade do material. Cabe salientar que nos CoPe's o

abatimento normalmente é zero. Na figura 1 podem-se visualizar os resultados do abatimento, em (a) está ilustrado o concreto com B0, em (b) com B1 e em (c) com a composição 50B0/50B1.

De acordo com a figura 1(a), verificou-se que devido ao tamanho do agregado o concreto com brita 0 (B0) e à porcentagem de fração fina (49.5%) apresentou abatimento 0. Quando o concreto foi confeccionado com a B1 a mistura apresentou-se mais plástica, provavelmente pelos grãos terem aproximadamente o mesmo tamanho e uma baixa porcentagem de fração fina (0.3%), fazendo com que a pasta tivesse capacidade de escorregar pela superfície dos grãos. Por fim, o CoPe com a composição 50B0/50B1 mostrou-se com uma mistura mais seca, sem excesso de água.

Após o ensaio de consistência, os corpos de prova de 100mm de diâmetro e 200mm de altura foram moldados

na mesa de consistência, como visualizado na figura 2(a). Para garantir a maior compactação dos concretos, testou-se a compactação com diferentes números de golpes em duas camadas, verificando em cada uma das compactações as massas unitárias dos concretos estudados, conforme pode-se visualizar na figura 2(b).

A partir da análise da figura 2b, verificou-se que para os concretos com as três granulometrias estudadas (B0, B1 e 50B0/50B1) a maior massa unitária foi atingida quando os mesmos foram compactados com 20 golpes em cada camada, por tanto esse número de golpes foi escolhido na compactação final dos corpos de prova.

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram mantidos dentro do molde durante 24 horas em câmara úmida com umidade relativa de 98%, após esse período foram desmoldados e imersos em tanques de água saturada com cal até as idades de ensaio.



Figura 1. Ensaio do Slump no CoPe com agregado (a) B0, (b) B1 e (c) 50B0/50B1  
Fonte: Elaboração própria

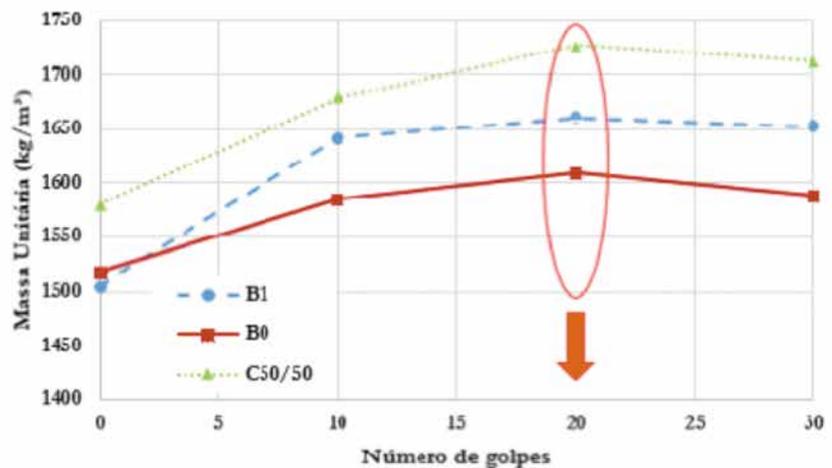


Figura 2. Adensamento dos corpos de prova. Em (a) podemos visualizar um corpo de prova sendo adensado na mesa de consistência e em (b) tem-se o gráfico que relaciona a massa unitária com o número de golpes por camada  
Fonte: Elaboração própria



### Ensaio no estado endurecido

Foram realizados ensaios de massa específica, desempenho mecânico (resistência à compressão, resistência à tração na flexão) e de desempenho hidráulico (índice de vazios e permeabilidade a carga variável). Na tabela 4 pode-se visualizar os ensaios realizados, os tipos de corpos de prova, suas dimensões, o número de amostras por idade e as normas que regem os ensaios.

O ensaio de permeabilidade segue a lei de Darcy, e trabalha com o princípio da carga variável, este foi realizado de acordo com a norma NBR 14545/2000 (NBR 14545, 2000), adaptada para solos finos. Neste ensaio, foi utilizado um permeâmetro onde são coletados dados do tempo e de volume de água que entra no corpo de prova, depois que o mesmo está saturado. O volume é quantificado a partir de um tubo de carga graduado e o tempo por meio de um cronômetro. Além disso, a temperatura da água no instante do ensaio deve ser quantificada para corrigir os resultados com relação à temperatura de 20 °C, padronizada para este ensaio.

### Resultados e discussões

#### Massa específica

Na figura 3 pode-se verificar os valores de massa específica dos CoPe's no estado endurecido, em que as barras de erros representam os desvios padrão (n=7).

A partir da análise da figura 3, observou-se que os CoPe's confeccionados com a B0 e a B1 apresentaram massas específicas similares, possivelmente devido a descontinuidade e uniformidade da granulometria dos agregados. Por sua vez, o concreto 50B0/50B1 apresentou o maior valor de massa específica, tal fato ocorreu pela granulometria do agregado ser mais contínua que as demais, tendendo a melhorar a composição granulométrica e aprimorar o empacotamento da estrutura do concreto como corroborando com o estudo de Ćosić *et al.* (2015).

Na composição 50B0/50B1, por sua vez, verificou-se uma melhoria da composição granulométrica, que se apresentou de forma contínua, acarretando em uma maior massa específica e consecutivamente em uma melhor

Tabela 4. Planejamento experimental utilizado

Ensaio	Tipo de corpo de prova	Dimensão Corpo de Prova (mm)	Amostras por idade 28 dias	Método
Massa específica	Cilíndrico	100x200	7	NBR 9778/2003
Resistência à compressão	Cilíndrico	100x200	7	NBR 5739/1994
Resistência à flexo-tração	Placa	750x250x50	4	NBR 15805/2010
Índice de vazios	Cilíndrico	100x200	3	Método Empírico
Permeabilidade	Cilíndrico	100x120	-	NBR 14545/2000

Fonte: Elaboração própria

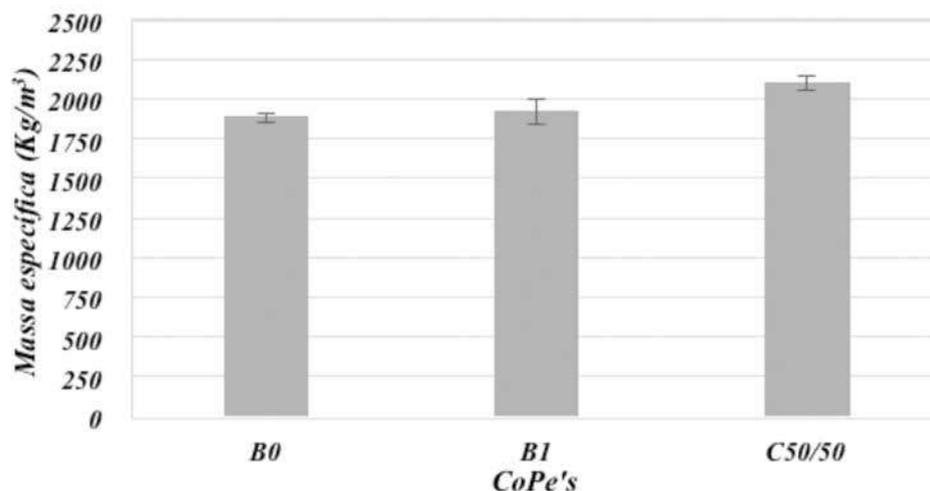


Figura 3. Massa específica dos CoPe's

Fonte: Elaboração própria

compacidade, corroborando com os estudos apresentados por Ćosić, Korat & Ducman (2015). No sentido da fração fina esta não influencia neste resultado e sim a distribuição dos grãos do material.

### Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de idade estão apresentados na figura 4, assim como os desvios padrão (n=7) representados pelas barras de erros.

A partir da análise dos resultados, observou-se que os CoPe's com agregados de granulometria descontínua (B0 e B1) obtiveram menores valores de resistência à compressão, decorrente do contato pontual entre os agregados, sendo mais fracos quanto à aplicação de uma carga axial.

De acordo com Torres *et al.* (2015), a união entre as partículas de agregado são os pontos fracos dos concretos permeáveis, em termos de resistência. Além disso, o concreto com o agregado composto (50B0/50B1) foi o único que se diferiu significativamente dos demais, apresentando a maior resistência à compressão aos 28 dias. Tal fato provavelmente ocorreu pela melhoria na distribuição granulométrica do agregado, que conseqüentemente aumenta os pontos de contato entre as partículas de cimento e os grãos do agregado, resultando em uma melhor distribuição de esforços frente à aplicação de carga (Kia, Wong & Cheeseman, 2017).

Em termos de coeficientes de variação, observou-se que as menores variabilidades foram encontradas nos CoPe's com agregados de B0 e o com a composição

50B0/50B1. É interessante ressaltar que essas duas granulometrias de agregados continham uma fração fina de 49.5% e 23.7%, respectivamente. Com isso, verificou-se que a porcentagem de fração fina pode ajudar na homogeneização e distribuição os pontos de contato entre o agregado e a pasta de cimento, podendo diminuir o erro na medição desta propriedade. Além disso, a maior variabilidade foi encontrada no CoPe com B1, o qual tinha uma fração fina, de apenas 0.3%.

### Resistência à flexo-tração

A resistência à flexo-tração foi ensaiada aos 28 dias de cura (n=4), seus resultados estão apresentados na figura 4.

Com base na figura 4, constatou-se que a maior resistência à flexo-tração foi obtida no CoPe contendo a combinação dos agregados (50B0/50B1), podendo se justificar pelo melhor arranjo dos grãos e conseqüente diminuição do diâmetro dos poros internos. Cabe ressaltar que este concreto também apresentou a maior massa específica (figura 3). Como a composição 50B0/50B1 foi constituída por grãos de diferentes tamanhos, os mesmos tendem a aumentar o travamento do concreto, resultando na melhoria da distribuição de cargas na flexão. Os CoPe's confeccionados com a B0 e a B1 tiveram resultados similares, correspondendo em média a 10% da resistência à compressão, o que é condizente com o apresentado na literatura (Ćosić, Korat & Ducman, 2015).

### Índice de vazios

A medição do índice de vazios no estado endurecido foi realizada em corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Para este ensaio, os corpos

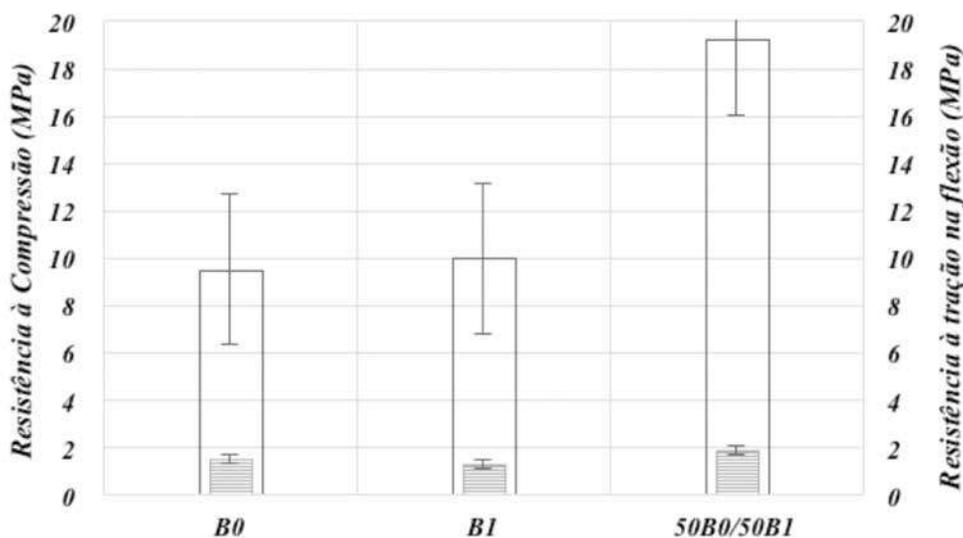


Figura 4. Resistência à compressão (n=7) e a tração na flexão (n=4) dos CoPe's aos 28 dias  
 Fonte: Elaboração própria



de prova estavam em condição saturada com superfície seca para que não houvesse absorção da água. Os corpos de prova foram envoltos com filme plástico de PVC, na superfície lateral e pela face inferior. Em seguida, foram introduzidos em um molde metálico cilíndrico, com as mesmas medidas do corpo de prova, para garantir que o filme de PVC não sofresse deformações.

Posteriormente, os moldes com os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão e, por fim, adicionou-se água até preencher os vazios internos do material, quando a água aflorava na superfície tomou-se a medida da sua massa.

Este ensaio foi utilizado porque foi um proposta nas pesquisas realizadas por Neithalath *et al.* (2006); Deo & Neithalath (2011); Sumanasooriya & Neithalath (2011); Neithalath *et al.* (2006). Os resultados do mesmo estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Índice de vazios dos CoPe's (n=3)

Parâmetro	Índice de vazios		
	B0	B1	50B0/50B1
Média	19,42	19,10	13,05
DP	0,32	1,39	0,32
CV%	1,64	7,26	2,44

Fonte: Elaboração própria

Como era de se esperar, o concreto contendo a composição 50B0/50B1 obteve uma redução na sua porcentagem de vazios, quando comparado aos demais. Tal fato pode ser explicado pela granulometria mais contínua do agregado graúdo e pelo arranjo dos grãos depois do processo de compactação (Ćosić, Korat & Ducman, 2015; Neptune, Putman, 2010; Brake, Allahdadi & Adam, 2016).

De acordo com Mehta & Monteiro (2014) em materiais cimentícios a porosidade e a resistência de um material são grandezas inversamente proporcionais. Nesse sentido, buscou-se uma relação entre a resistência e o índice de vazios dos CoPe's (figura 5), afim de verificar como essa relação se comportava.

A partir dos dados da figura 5, observou-se que a menor porcentagem de vazios corresponde ao concreto com a maior resistência a compressão, sendo que o CoPe confeccionado com a composição granulométrica 50B0/50B1 apresentou os melhores resultados, corroborando com o apresentado por Kevern *et al.* (2009) que afirma que com o aumento dos vazios no CoPe há uma diminuição dos pontos de contato entre as partículas, por tanto quando uma carga é aplicada a distribuição de esforços não é homogênea.

#### Coefficiente de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade a carga variável foi realizado aos 28 dias de cura, o resultado deste ensaio nos fornece o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), que pode ser calculado

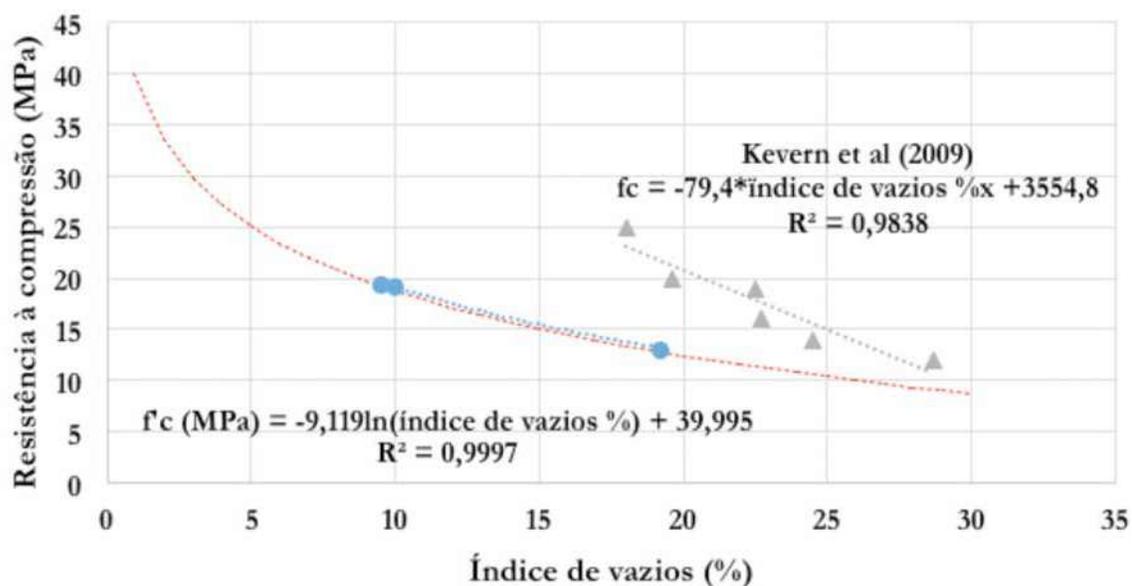


Figura 5. Correlação da resistência a compressão e o índice de vazios (%)

Fonte: Elaboração própria

a partir da Equação 1 e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 6 (Chandrappa y Biligiri, 2016).

$$k_f = \frac{a \cdot l}{A \cdot t} \ln \frac{h_1}{h_2} \tag{1}$$

Tabela 6. Coeficiente de permeabilidade dos CoPe's

Parâmetro	Permeabilidade k (mm/s)		
	B0	B1	50B0/50B1
Média (mm/s)	2.89	4.27	2.36
Desvio Padrão (mm/s)	0.58	1.05	0.6
CV (%)	20.05	24.57	25.35

Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar na tabela 6 que os coeficientes de permeabilidade cumprem o valor mínimo de 1.35mm/s, de acordo com norma americana ACI 522R-10 (American Concrete Institute (ACI), 2010).

Notou-se a partir da tabela 6 que a combinação 50B0/50B1 obteve o menor coeficiente de permeabilidade de quando comparado com as outras duas granulometrias utilizadas (B0 e B1). Acredita-se que pela B1 apresentar uma baixa porcentagem de fração fina (0.3%) e ter grãos de tamanho maior formam-se vazios maiores, aumentando o coeficiente de permeabilidade do material, concordando com os valores obtidos no índice de vazios.

Com o intuito de verificar a influência da fração fina nas propriedades hidráulicas dos CoPe's, na figura 6 foi correlacionado o coeficiente de permeabilidade (k) com a porcentagem de fração fina presente no próprio agregado.

Como pode-se verificar na figura 6, a porcentagem de fração fina do próprio agregado graúdo influencia o coeficiente de permeabilidade. Primeiramente observou-se que a carência de areia e/ou finos na granulometria aumenta o coeficiente de permeabilidade do material. No caso do CoPe com a B1 o coeficiente de permeabilidade foi 4.27 mm/s (sendo aproximado ao K da brita em estado natural (Das Braja, 2013), neste caso a B1 apresentou uma porcentagem de fração fina de 0.3%, mostrando que esses dois parâmetros são inversamente proporcionais. Por outro lado, o excesso de finos pode proporcionar o fechamento dos poros, diminuindo a permeabilidade. Neste sentido, torna-se necessário um estudo para verificação de uma porcentagem ótima de fração fina, que auxilie nas propriedades mecânicas, melhorando a interface entre os agregados e não prejudicando as características hidráulicas do CoPe. O ensaio de permeabilidade foi realizado de acordo com a norma NBR 14545/2000, adaptada para o CoPe.

### Conclusões

- O Concreto Permeável (CoPe) 50B0/50B1, apresentou maiores resistências, tanto a compressão quanto a flexo-tração. Isso pode ser decorrente da melhoria no arranjo dos grãos e da fração fina própria do agregado que neste caso estava na faixa média das 3 granulometrias.

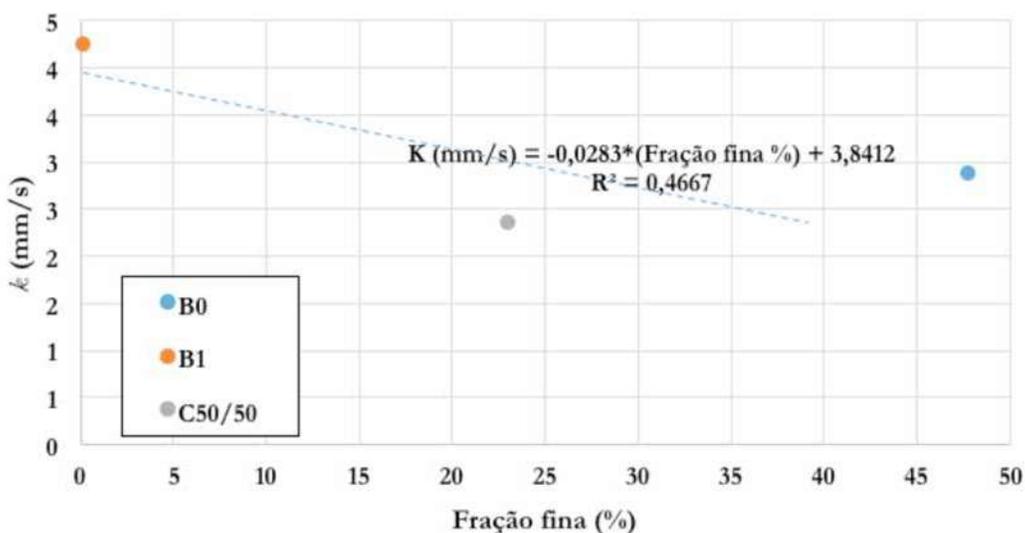


Figura 6. Correlação entre o coeficiente de permeabilidade (K) e a porcentagem de fração fina do agregado graúdo

Fonte: Elaboração própria



metrias utilizadas. É interessante ressaltar que a baixa resistência dos CoPe's normalmente se dá pela fragilidade da interface entre os agregados.

- Os coeficientes de permeabilidade encontrados em todos os concretos estudados cumprem com os parâmetros mínimos da norma ACI 522R-10, que estabelece que para um concreto ser considerado permeável, seu coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) deve ser de pelo menos de  $1.35 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  ou  $4821 \text{ mm/h}$ .
- O acúmulo de pasta no CoPe confeccionado com B1 se deve à falta de materiais finos, o que acarretou em uma pasta muito fluida. Fazendo com que a pasta preenchesse os vazios, levando a uma queda na permeabilidade.
- Para melhorar o desempenho dos CoPe's tanto nas propriedades mecânicas quanto em suas características hidráulicas, seria necessário estudar mais a fundo sobre a porcentagem de fração fina ótima a ser utilizada, de modo que nem o desempenho mecânico e nem o hidráulico seja prejudicado.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento do Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Londrina (UEL) e ao seu Laboratório de Materiais de Construção. Além disso, o primeiro autor agradece ao apoio econômico proporcionado pelos estudos de doutorado da Capes.

## Referências

- ABNT, NBR NM 248. (2003). *Composição Granulométrica dos Agregados*, (p. 1-3).
- ABNT, NBR NM 46. (2003). *Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75  $\mu\text{m}$ , por lavagem*, Abnt Nbr Nm 462003, (p. 6).
- American Concrete Institute (ACI). (2010). *Report on Pervious Concrete (ACI 522-R10)*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 9776. (1987). *Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco*. Rio de Janeiro. Disponível em <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17827/material/NBR%20NM%2052%20-.pdf>
- Barreto, G. F. (2014). *Desempenho do concreto poroso com*. Universidade Estadual de Londrina. Disponível em <http://www.uel.br/pos/enges/porta/pages/arquivos/dissertacao/GERSON%20BARRETO%20SANDOVAL%202013-1.pdf>
- Brake, N. A., Allahdadi, H., & Adam, F. (2016). Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, *113*, 536-543. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.045.
- Ćosić, K., Korat, L., Ducman, V., Netinger, I. (2015). Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, *78*, 69-76. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073.
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2016). Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. *Constr. Build. Mater.* *123*, 627-637. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.035.
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, P. K. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. *Constr. Build. Mater.*, *111*, 262-274. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054.
- Chindaprasirt, P., Hatanaka, S., Chareerat, T., Mishima, N., & Yuasa, Y. (2008). Cement paste characteristics and porous concrete properties. *Constr. Build. Mater.*, *22*, 894-901. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.007.
- Das Braja. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, (p. 658). doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Deo, O., & Neithalath, N. (2011). Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. *Constr. Build. Mater.*, *25*, 4181-4189. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.055.
- Haselbach, L. M., Valavala, S., & Montes, F. (2006). Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *J. Environ. Manage.*, *81*, 42-49. doi:10.1016/j.jenvman.2005.09.019.
- Kevern, J. T., Schaefer, V. R., & Wang, K. (2009). *Predicting Performance of Pervious Concrete using Fresh Unit Weight*. J. T. Kevern 1, V.R. Schaefer 2, and K. Wang 3.
- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, S. R. (2017). Clogging in permeable concrete: A review. *J. Environ. Manage.*, *193*, 221-233. doi:10.1016/j.jenvman.2017.02.018.
- Kim, H. K., & Lee, H. K. (2010). Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. *Appl. Acoust.*, *71*, 607-615. doi:10.1016/j.apacoust.2010.02.001.
- Leming, P. D., Michael, L., & Malcom, H. (2007). *Rooney; Tennis, Hydrologic Design of Pervious Concrete*. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). The relationship between porosity and strength for porous concrete. *Constr. Build. Mater.*, *25*, 4294-4298. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.05.005.
- Mahboub, K. C., Canler, J., Rathbone, R., Robi, T., Davis, B., Robl, T., & Davis, B. (2009). Pervious concrete: Compaction and aggregate gradation. *ACI Mater. J.*, *106*, 523-528.
- Martin, W. D., & Putman, B. J. (2016). Comparison of methods for measuring porosity of porous paving mixtures. *Constr. Build. Mater.*, *125*, 299-305. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.038.

- Martin, W. D. Kaye, N. B., & Putman, B. J. (2014). Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete. *Constr. Build. Mater.*, 59, 78-84. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. doi:10.1036/0071462899.
- Montes, F., & Haselbach, L. (2006). Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete, *Environ. Eng. Sci.*, 23, 960-969. doi:10.1089/ees.2006.23.960.
- Mrakovčić, S., Čeh, N., & Jugovac, V. (2014). Effect of aggregate gradation on pervious concrete properties. *Građevinar*, 66, 107-113. doi:10.14256/JCE.977.2013.
- NBR 14545. (2000). *Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*.
- Neithalath, N., Weiss, J., & Olek, J. (2006). Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. *Cem. Concr. Res.*, 36, 2074-2085. doi:10.1016/j.cemconres.2006.09.001.
- Neptune, A. I., & Putman, B. J. (2010). *Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures*. ACI Mater. J.
- Sonebi, M., & Bassuoni, M. T. (2013). Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling, *Constr. Build. Mater.*, 38, 147-154. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.044.
- Sumanasooriya, M. S., & Neithalath, N. (2011). Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. *Cem. Concr. Compos.*, 33, 78-787. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.06.002.
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious Concrete Pavements. EB302.02*. USA: Portland Cement Association, Skokie, Illinois and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland. Disponível em [http://myscmap.sc.gov/marine/NERR/pdf/PerviousConcrete\\_pavements.pdf](http://myscmap.sc.gov/marine/NERR/pdf/PerviousConcrete_pavements.pdf)
- Torres, A. Hu, J., & Ramos, A. (2015). The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.*, 95, 850-859. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187.
- U-value, T., Li, W. W., Ssha, T., & War, W. (1937). *No-fines building gives energy-conserving homes*.
- Vélez, L. M. (2010). Permeabilidad y porosidad en concreto. *Rev. Tecno Lógicas*, 169-187. Disponível em <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5062984&info=resumen&idoma=SPA>
- Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cem. Concr. Res.*, 33, 381-386.
- Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cem. Concr. Res.*, 33, 381-386.
- Yang, Z., Ma, W., Shen, W., & Zhou, M. (2008). The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, 23, 391-394. doi:10.1007/s11595-007-3391-4.
- Zhang, Z., Zhang, Y., Yan, C., & Liu, Y. (2017). Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete, *Constr. Build. Mater.*, 135, 112-118. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.203.



Docencia y Educación

Ensino e Educação

Teaching and Education



## SIMULADORES DE VUELO: UNA REVISIÓN<sup>1</sup>

FLIGHT SIMULATORS: A REVIEW<sup>2</sup>

SIMULADORES DE VÔO: UMA REVISÃO<sup>3</sup>

Luis Carlos Villamil Rico<sup>4</sup>

Edna Joydeth Avella Rodríguez<sup>5</sup>

Jorge Antonio Tenorio Melo<sup>6</sup>

Escuela Militar de Aviación. Bogotá, Colombia.

Universidad del Valle. Cali, Colombia.

---

### CIENCIA Y PODER AÉREO

ISSN 1909-7050 / E- ISSN 2389-9468 / Volumen 13 / Número 2 / julio-diciembre de 2018 / Colombia /pp. 138-149

Recibido: 25/06/2018

Aprobado por evaluador: 26/08/2018

Doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.606



#### Para citar este artículo:

Villamil, L. C., Avella, E. J., y Tenorio, J. A. (2018). Simuladores de vuelo: una revisión. *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(2), 138-149. doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.606

<sup>1</sup> *Artículo de revisión asociado al proyecto titulado "Desarrollo y construcción de un entrenador de vuelo de la aeronave Cessna T-41 para la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez", financiado por la Convocatoria para el apoyo a proyectos CTel para la investigación formativa de la Fuerza Pública, desarrollada por el Ministerio de Defensa Nacional.*

<sup>2</sup> *Review article associated with the project entitled "Development and construction of a flight trainer for the Cessna T-41 aircraft for Marco Fidel Suárez Military Aviation School", funded by the Call for the support of CTel projects for the formative research of the Public Force, developed by the Ministry of National Defense.*

<sup>3</sup> *Artigo de revisão associado ao projeto intitulado "Desenvolvimento e construção de um instrutor de vôo para a aeronave Cessna T-41 para a Escola de Aviação Militar Marco Fidel Suárez", financiado pelo Edital de apoio aos projetos de CTel para a pesquisa formativa do Força Pública, desenvolvida pelo Ministério da Defesa Nacional.*

<sup>4</sup> Especialista en investigación educativa, ingeniero mecánico, jefe sección investigación Escuela Militar de Aviación. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: lvillamil@hotmail.com

<sup>5</sup> Maestría en ingeniería con énfasis automatización industrial, ingeniero electrónico, docente Universidad del Valle. Cali, Colombia.

<sup>6</sup> Maestría en ingeniería con énfasis en automatización industrial, especialización en ingeniería con énfasis en automatización industrial, ingeniería electrónica, docente Universidad del Valle. Cali, Colombia.

**Resumen:** Los simuladores de vuelo permiten realizar maniobras de aprendizaje que en una aeronave real no se podría, ya que se pueden analizar desde fallas humanas hasta las de la aeronave. Este artículo presenta el desarrollo de un estado del arte para el proyecto titulado "Desarrollo y construcción de un entrenador de vuelo de la aeronave Cessna T-41 para la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez", financiado por la "Convocatoria para el apoyo a proyectos CTel para la investigación formativa de la Fuerza Pública", desarrollada por el Ministerio de Defensa Nacional. Para el desarrollo del artículo se realizó una revisión documental que contiene la clasificación, la historia, arquitectura, características, ventajas y aplicaciones de los simuladores de vuelo o dispositivos de entrenamiento de vuelo. Como resultado a destacar se obtuvo que el proyecto inicialmente planteado era el desarrollo de un entrenador, pero se logró desarrollar un simulador tipo A con un sistema de movimiento con tres grados de libertad. Se concluye que la información suministrada por este artículo apoya a los conceptos básicos para la realización de un simulador de vuelo, dándole la capacidad a la Fuerza Aérea Colombiana en el desarrollo de este tipo de tecnologías.

**Palabras clave:** aeronave, simuladores de vuelo, plataformas de movimiento, FSTD, FAA, EASA.

**Abstract:** Flight simulators allow to perform learning maneuvers that in an actual aircraft could not be, since they can be analyzed from human faults to those of the aircraft. This article shows the development of a state of the art for the project entitled "Development and construction of a flight trainer of the Cessna T-41 aircraft for the Marco Fidel Suárez Military Aviation School", funded by the "Call for support to CTel projects for formative research of the Public Force", developed by the Ministry of National Defense. For the development of the article, a documentary review was carried out containing the classification, history, architecture, characteristics, advantages and applications of flight simulators or flight training devices. As a result, to highlight, it was obtained that the initially proposed project was the development of a trainer, but it was possible to develop a type A simulator with a system of movement with three degrees of freedom. It is concluded that the information provided by this article supports the basic concepts to produce a flight simulator, giving the capacity to Colombian Air Force in the development of this type of technology. A flight simulator, giving the Colombian Air Force the ability to develop this type of technology.

**Keywords:** aircraft, flight simulators, motion platforms, FSTD, FAA, EASA.

**Resumen:** Os simuladores de voo permitem realizar manobras de aprendizado que não se realizam real no se poderia, e que se pueden analizar de fallas humanas hasta las da aeronave. Este artículo apresenta o desenvolvimento de um projeto de arte para o projeto "Desarrollo y construcción de um entrenador de vôo da aeronave Cessna T-41 para a Escola Militar de Aviação Marco Fidel Suárez", financiado por la "Convocatoria para el apoyo a proyectos CTel para a investigação da Força Pública", promovido pelo Ministério de Defesa Nacional. Para o desenvolvimento do artigo você pode realizar uma revisão documental que contem a clasificación, a historia, arquitetura, características, vantagens e aplicaciones dos simuladores de voo o dispositivo de entrenamiento de voo. Como resultado pode ser obtido quando o programa foi implantado no desenvolvimento de um sistema de distribuição de dados, em vez de um tipo de processo. Se concluiu a informação administrada por este artigo apóia os conceitos básicos para a realização de um simulador de voo, dá-lhe a capacidade para a Força Aérea Colombiana no desenvolvimento deste tipo de tecnologias.

**Palavras-chave:** aeronave, simuladores de vôo, plataformas de movimento, FSTD, FAA, EASA.

## Introducción

Los simuladores de vuelo o dispositivos de entrenamiento de vuelo son usados para la capacitación de los pilotos, desarrollando en ellos habilidades de navegación, maniobra y mantenimiento de los sistemas de las aeronaves. Los simuladores han sido utilizados tanto por las milicias en el mundo como por los civiles, desarrollando nuevas tecnologías y nuevos softwares. Este trabajo de investigación busca aportar a los desarrollos realizados en la Escuela Militar de Aviación (EMAVI) sobre entrenadores de vuelo; a su vez, estas plataformas servirán para aumentar las horas de vuelo y adquirir más destreza por parte de los instructores de vuelo y sus alumnos, sin contar el desarrollo de la ingeniería colombiana, especialmente el de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), en la construcción y planificación de plataformas.

Día a día se ha incursionado en cada detalle de los simuladores de vuelo, hoy en día se realizan grandes investigaciones, como son las plataformas de movimiento que van de un grado de libertad hasta los seis; se han desarrollado nuevos instrumentos tanto de navegación, control, visualización, que hoy en día se cuenta con plataformas que pueden llegar a realizar todas las maniobras hechas por una aeronave real. Por lo anterior, la EMAVI requiere una revisión documental para soportar el desarrollo de un sistema que permita aumentar las horas de entrenamiento de los pilotos de la Fuerza Aérea Colombiana, dando soporte a las diferentes aeronaves utilizadas en la instrucción y entrenamiento de los futuros pilotos. Esta investigación busca dar soporte al conocimiento de simuladores de vuelo, ya que los pilotos adquirirían mayores fortalezas en el manejo de la aeronave, haciendo uso del entrenador de vuelo desarrollado por la EMAVI.

Inicialmente la formulación del proyecto estableció el desarrollo de un entrenador de vuelo de la aeronave CESSNA T-41, para el fortalecimiento de las capacidades de los pilotos, teniendo en cuenta que un entrenador de vuelo brinda la posibilidad de entrenamiento continuo a bajos costos, ya que no requiere gastos en combustible, personal de mantenimiento y otros instrumentos de vuelo. Sin embargo, con el desarrollo del estado del arte se pretende resolver cuál es el alcance que debe tener el dispositivo de vuelo (simulador o entrenador) para la aeronave Cessna T-41 con los recursos obtenidos (\$250.000.000) de la convocatoria, con el fin de fortalecer la instrucción del vuelo en la EMAVI y aumentar las capacidades con que cuenta la Fuerza Aérea Colombiana, contribuyendo al desarrollo del país en un aspecto tan importante como la formación de pilotos y el desarrollo de estos dispositivos.

## Simuladores de vuelo

### ¿Qué son?

Los simuladores de vuelo son dispositivos que recrean ambientes de vuelo, ya sean con movimiento o no. Generalmente son diseñados a partir de aeronaves que repiten acciones como los sonidos, movimientos, controles de vuelo y reacciones de factores externos (turbulencia, vientos, tormentas, nubosidades entre otros), estos son usados para formación, diseños u otras aplicaciones (Federal Aviation Administration, 2014).

### Clasificación

Según la Federal Aviation Administration (FAA), los simuladores de vuelo son categorizados de tres formas: simuladores de vuelo (FS), dispositivos de entrenamiento de vuelo (FTD o FSTD) y dispositivos de formación de la aviación (ATD) (Bernard, 2012; Aeronáutica Civil, 2015).

#### *Simuladores de vuelo completo (FFS).*

Estos simuladores de vuelo tienen la más alta categoría, porque incluyen movimiento y capacidad visual, son los más sofisticados sin realizar un vuelo del sistema real. Los niveles de validación de los simuladores FFS aseguran la aerodinámica, características de vuelo, pilotaje de una determinada marca de aeronave (Bernard, 2012; Aeronáutica Civil, 2015). Los FFS también poseen una clasificación de niveles que van desde la A – D, siendo el D la más alta categoría.

La clasificación dada por la FAA a los FFS nivel A: son sistemas de movimiento, se requiere con al menos tres grados de libertad (aviones solamente). Los de nivel B: requiere de tres ejes de movimiento y un modelo aerodinámico de mayor fidelidad que hace nivel A (avión y helicóptero). El nivel C: requiere una plataforma de movimiento con los seis grados de libertad, retardo de transporte inferior (latencia) sobre los niveles A y B, su sistema visual debe tener un campo horizontal fuera de la vista de al menos 75 grados para cada piloto. El nivel D: es el nivel más alto de cualificación, los requisitos son los mismos que el nivel C, con adiciones, el sistema visual debe tener un campo horizontal fuera del mundo de vista de por lo menos 150 grados, se requieren sonidos realistas en la cabina del piloto, así como un número de movimiento especial y efectos visuales (Federal Aviation Administration, 2014; Lawn, The enhancement of a flight simulator system with teaching and research applications, 1998). Los siguientes son algunos simuladores de vuelo: el Sukhoi SuperJet full flight simulator (Gusarov, 2011), y el FFS B (Aerosimulators, 2009) entre otros.



### *Dispositivos de entrenamiento de vuelo (FTD).*

Los dispositivos FTD o llamados Dispositivos de Entrenamiento de Simulación (FSTD), son dispositivos diseñados para representar la configuración de una aeronave específica, pueden tener cabinas cerradas y visualización. Estos sistemas no siempre llevan movimiento, pero son lo suficientemente sofisticados para capacitaciones y certificaciones. Estos dispositivos se pueden observar en centros de enseñanza, universidades y son utilizados ampliamente para capacitaciones o conocimiento de nuevas tecnologías (Bernard, 2012; Aeronáutica Civil, 2015).

La siguiente es la clasificación dada por la FAA a los FTD de nivel 4: este nivel no requiere de un modelo aerodinámico, pero se requiere del modelado de los sistemas precisos. El nivel 5: requiere la programación aerodinámica y el modelado de sistemas. El nivel 6: tiene programación aerodinámica, es para aviones de modelos específicos, tiene control de movimiento y se requiere cabina física. Nivel 7: es para un modelo específico (helicóptero solamente), tiene la aerodinámica, controles de vuelo y sistemas modelados, sistemas de vibración y tiene un sistema visual (Federal Aviation Administration, 2014; Lawn, The enhancement of a flight simulator system with teaching and research applications, 1998).

### *Dispositivos de formación de la aviación (ATD).*

Los ATD son dispositivos de entrenamiento que replican la instrumentación de las aeronaves, equipos, paneles y controles, se encuentra en un área cubierta de vuelo o una cabina cerrada de vuelo, incluye el hardware y software para representar la aeronave (Federal Aviation Administration, 2014). Se clasifican en: Dispositivo de Entrenamiento de Aviación Básica (BATD), que es un dispositivo que posee controles físicos y puede tener controles virtuales, los controles deben tener un parecido con los controles reales de la aeronave (Bernard, 2012; Federal Aviation Administration, 2014). El Dispositivo de Entrenamiento de Aviación Avanzada (AATD), posee las mismas características del BATD incluyendo un GPS y un piloto automático (Bernard, 2012; Federal Aviation Administration, 2014).

## **Arquitectura del simulador de vuelo**

Los simuladores de vuelo o los entrenadores de simulación son dispositivos que integran el software y el hardware, están diseñados con diferentes etapas como lo son: equipos de mando, instrumentación, plataformas de movimiento, lenguajes de programación (Bosh, 2011; Kovacova y Kolben, 2012).

### **Cabina**

En la cabina de los simuladores de vuelo se tiene el panel de mandos, que está compuesto por la instrumentación

de vuelo y navegación, también la instrumentación del panel del motor (Alonso, 2006).

Para la instrumentación de vuelo de algunos simuladores se encuentran dispositivos como el anemómetro o indicador de velocidad, altímetro, horizonte artificial, indicador de la velocidad vertical, indicador de viraje y coordinador de viraje entre otros, dependiendo la clase de simulador se consideran más instrumentos de vuelo. Para la instrumentación de navegación se encuentran el indicador de dirección o rumbo, indicador de Very High Frequency Omnidirectional (VOR), indicador Automatic Direction Finder (ADF). Para la instrumentación del panel del motor se encuentra el indicador de presión de aceite, indicador de la temperatura del aceite, indicador de sobrecalentamiento del cilindro, medidor de temperatura de gases de escape, indicador de la presión de combustible, indicador de flujo de combustible, indicador de cantidad de combustible, tacómetro

### **Software y herramientas de desarrollo**

El software en los simuladores de vuelo desarrollan entornos ya sean geográficos o de ambientación para recrear una visualización real, uno de los lenguajes utilizados es el desarrollado por Microsoft creado por Scott Wiltamuth y Anders Hejlsberg Csharp, las principales características de este lenguaje de programación es la facilidad de programación, incorpora nuevos desarrollos para aplicaciones y tiene la capacidad de orientación a objetos entre otras virtudes (Microsoft, 2015). XML es un metalenguaje, es decir un lenguaje para definir lenguajes, también se encuentra el lenguaje SDK (SimKit Devices). Algunas herramientas de desarrollo son la plataforma .Net desarrollada por Microsoft.

En el mundo de la informática, diferentes compañías han lanzado sistemas operativos al mercado mundial, tanto programas con licencias para su uso, como programas libres que fomentan la cooperación para obtener más utilidades de la herramienta. Actualmente el sistema operativo más usado es Android, que está proyectado a sistemas operativos de dispositivos móviles, y aunque no hace parte de lo que busca este proyecto, hay que resaltar que es reconocido mundialmente y le ha dado un gran empuje (Statcounter, 2017).

En cuanto al ámbito de sistemas operativos orientados a computadores, se destaca en primer lugar a Windows con un 53 %, luego Ubuntu con un 39 % y posterior Mac con un 10 %, el primero desarrollado por Microsoft, el segundo desarrollado por Linux y el tercero desarrollado por Apple, y aunque la marca mundialmente conocida ha sido Windows, los otros sistemas operativos han tenido un fuerte empuje en los últimos años (Education IT, 2017).



Figura 1. Uso de los sistemas operativos  
Fuente: Statcounter, 2017

Los simuladores de vuelo constantemente presentan notables mejoras cada vez que sale una versión nueva de los motores de simulación, los cuales buscan crear entornos virtuales más realistas; a continuación se relacionan los tres más importantes motores de simulación alrededor del mundo, que por sus capacidades se han destacado frente a otros (Vix, 2017):

- Microsoft Flight Simulator (versión 2016).
- X-Plane (versión 11).
- FlightGear.

De los anteriormente mencionados, se destaca el X-Plane, porque es un motor preciso basado en el cálculo del efecto del flujo de aire sobre las superficies de los aviones simulados con la utilización de un túnel de viento virtual, adicionalmente, posee certificado de la FAA para entrenamiento de pilotos por instrumentos (X-plane, 2017).

### 3.4 Reglamentación

Los simuladores de vuelo y FSTD son diseñados, producidos, instalados y su evaluación, calificación y aprobación se hace con las normas, criterios y requisitos de la legislación de la aviación, se especifica principalmente en los documentos pertinentes de la OACI, EASA/regulación JAR (en Europa), la regulación FAR (en EE. UU.), de acuerdo con el nivel requerido de certificación.

### Historia de los simuladores de vuelo

En 1903 Orville y Wilbur Wright vuelan por primera vez, con esta primera hazaña se avanza en la aviación, en los siguientes años se desarrollan nuevas tecnologías dando paso a los simuladores de vuelo, los cuales eran utilizados, inicialmente, para la formación de los pilotos, conociendo las partes de la aeronave, los primeros pilotos aprendían progresando a través de una secuencia gradual de ejercicios en un avión real. Después el estudiante progresa a una máquina de mayor potencia, haciendo saltos cortos utilizando el control de elevador y finalmente alcanzar el vuelo. Una variación de este método conocido como el “sistema del pingüino”, se realiza utilizando un avión Landborne de envergadura reducida que fue desarrollado durante la Primera Guerra Mundial. Este método se utilizó también en el francés Ecole de Combate, con un monoplano Bleriot Cortado (Ray, 2000; Slob, 2008).

De acuerdo con los desarrollos anteriores, nacen nuevas ideas para los simuladores de vuelo, uno de los dispositivos de esta naturaleza fue el The Sanders “Teacher” en 1910, según Haward

La invención, por lo tanto, de un dispositivo que permitirá al principiante obtener una concepción clara del funcionamiento del control de un avión y de las condiciones existentes en el aire, sin ningún riesgo personal o de otro tipo es bienvenido sin ninguna duda. (1910, p. 1006)



El Sanders fue construido de componentes reales de aeronaves, fue un avión montado en una junta universal en una posición expuesta y de cara al viento, otros dispositivos de este tipo de simuladores de vuelo fueron las de Eardley Billings, así como el Captive Monoplane (Ray, 2000; Rodríguez, 2014).

Estos simuladores evolucionan sustituyendo los operadores humanos tipo Antoinette, con máquinas de actuadores mecánicos o eléctricos vinculados a los controles del simulador. Uno de los prototipos utilizados son los dispositivos descritos por los franceses Lender y Heildelberg en 1917. Esta realizaba movimientos pitch, roll y yaw por motores de aire comprimido, se incluye el ruido del motor y una visualización. En 1920 nace la necesidad de capacitar a los pilotos de las aeronaves, así que surgen dos enfoques: la capacitación de instrumentos que se hacía sobre aeronaves no móviles para el reconocimiento de la instrumentación; y los links que son equipados con la instrumentación y medios de activación (Ray, 2000).

Uno de los simuladores más conocidos es el Link Trainer, desarrollado por Edwin Link en el periodo de 1927-1929, patentando en 1930, donde realiza una bomba de succión de accionamiento eléctrico montado en una base fija que alimenta las diversas válvulas de control operados por el timón, mientras que otro dispositivo es accionado por un motor que produce una secuencia repetida de perturbaciones de actitud, este dispositivo se reproduce en países como Inglaterra, Japón, Francia, Alemania y la URSS, siendo la American Airlines la primera aerolínea en comprar un simulador de vuelo para el entrenamiento de sus pilotos. Desde entonces se desarrollan avances tecnológicos aplicando métodos eléctricos y electrónicos, las señales de radio se utilizan para las radioayudas de la navegación. El dispositivo Aeroconstructor, desarrollado por AE Travis es el primer simulador que utiliza ayudas visuales, que simulaba los efectos de partida, el tono y el movimiento del rodillo (Ray, 2000; Zazula, Myszor, Antemijczuk y Cyran, 2013; Angelo, 2000).

Uno de los grandes avances de los simuladores de vuelo es la llegada de las computadoras analógicas en la Segunda Guerra Mundial, desarrollando las ecuaciones de movimiento de vuelo de la aeronave, permitiendo de este modo la simulación de la respuesta a las fuerzas aerodinámicas; por esta razón, el grupo de Establecimiento de Investigación de las Telecomunicaciones (TRE) diseña simuladores de radar sintético (Dummer, 1949).

En 1943 el Dr. Dehmel y Curtiss\_Wright Corporation realizan el primer simulador de vuelo (Boeing 377) para una aerolínea comercial, estos dispositivos utilizan tec-

nología A. C., con potenciómetros contorneados; con un control utilizando palancas variables y servo controladores para calcular las fuerzas necesarias para la velocidad, este desarrollo tenía un costo de 120.000 £. De este dispositivo se basan nuevas tecnologías como la aeronave L1090 (Ray, 2000).

En 1958 se desarrollan las primeras plataformas de movimiento, dando inicio con un grado de libertad hasta llegar a los seis produciendo el simulador de vuelo B747. En 1960 las computadoras digitales hacen su surgimiento, dando así la posibilidad de nuevos desarrollos en los simuladores de vuelo. Link desarrolla un simulador de vuelo donde utiliza tres procesadores paralelos para el desarrollo de la aritmética, para funciones y una emisora de radio; emplea una memoria tambor (Ray, 2000; Weingarten, 2005).

Otro aporte para los simuladores de vuelo es la proyección de origen o shadowgraph, que sus primeras aplicaciones se realizan en los simuladores de los helicópteros, estos métodos de visualización son producidos por Giranvions Dorand en Francia y por Belfas. Los desarrollos realizados por Link utilizan sistemas anamórficos conocidos como VAMP. Se avanza en el desarrollo de nuevas tecnologías como las imágenes por computador (Ray, 2000).

Con el desarrollo de los simuladores de vuelo también se hace necesario el uso de reglamentos para la fabricación, ya que cada compañía fabricaba los simuladores con diferentes estándares. En la década de 1970 se crea la organización IATA (International Air Transport Association) y se forma el comité de trabajo FSTSC (Flight Simulator Technical Sub-Committee) donde se desarrollan normas tanto para la simulación como para el fuselaje y aviónica, dando credibilidad a las empresas desarrolladoras (Ray, 2000).

En la actualidad, las investigaciones sobre simuladores de vuelo abarcan complejos sistemas de control (Dongsu y Hongbin, 2007; Songshan, Zongxia y Yaoxing, 2015; Mendoza, Vivas y Rodríguez, 2014; Pradipta, Klunder, Weickgenannt y Sawodry, 2013; Chih-Hsien, Devaney y Chung-Ming, s.f.; Chomachar y Azizi, 2015); plataformas de movimiento (Monsarrat y Gosselin, 2003; Dongsu, Hongbin y Peng, 2009; Barros dos Santos y Oliveira, 2011; Zhang y Yao, 2009); software (donde se ajustan a la geografía de un lugar determinado, sonidos, clima, fallas técnica o humanas) (Virtual insect flight simulator (VIFS): A software testbed for insect flight, 2001).

En la Tabla 1 se muestra una clasificación de los diferentes simuladores de vuelo, teniendo en cuenta la clasificación de la ESA (EASA, 2015), allí se encuentran simuladores de vuelo para helicópteros (Schmaltz, 2010; Airbus

Helicopters, 2015) como aeronaves (Australian Government Civil Aviation Safety Authority, 2015; Rodríguez, Sampaio,

Aguiar y Buttacoli, 2014; Odegard, Milenkovic y Buttacoli, 2014; Reinholtz, 1999; Odegard, Sliwinski, King y Hart, 2011).

Tabla 1.  
Simuladores de vuelo

N.º	PAÍS	TIPO	CLASIFICACIÓN
1	Qatar	AW-139	FFS Nivel B
2	USA	Bell 407 GX	FFS Nivel B
3	Singapore	AS365-N3	FFS Nivel B
4	Canada	DHC6-300	FFS Nivel B
5	China	EC225 LP	FFS Nivel B
6	Malaysia	EC225 LP	FFS Nivel B
7	UK	Beech King Air B200	FFS Nivel C
8	USA	Learjet 55	FFS Nivel C
9	USA	Cessna CJ1 (525)	FFS Nivel C
10	Thailand	ATR42-300	FFS Nivel C
11	Thailand	ATR42-300	FFS Nivel C
12	South Africa	ATR72-200	FFS Nivel C
13	South Africa	ATR42-300	FFS Nivel C
14	USA	Cessna CJ1 (525)	FFS Nivel C
15	Australia	A320-200	FFS Nivel D
16	Australia	A330-200	FFS Nivel D
17	Azerbaijan	757-200	FFS Nivel D
18	Azerbaijan	A320-200	FFS Nivel D
19	Bahrain	A320-200	FFS Nivel D
20	Bahrain	A330-200	FFS Nivel D
21	Brunei Darussalam	S92A	FFS Nivel D
22	Bulgaria	A320-200	FFS Nivel D
23	Canada	Global Express	FFS Nivel D
24	Canada	DHC8-400	FFS Nivel D
25	China	A320-200	FFS Nivel D
26	Colombia	ATR72-212A (600 version)	FFS Nivel D
27	Egypt	737-800W	FFS Nivel D
28	Egypt	A320-200	FFS Nivel D
29	Egypt	A340-300	FFS Nivel D
30	Iceland	757-200	FFS Nivel D
31	India	AS365-N3	FFS Nivel D
32	India	A320-200	FFS Nivel D
33	Jordan	737-800W	FFS Nivel D
34	Jordan	EMB170	FFS Nivel D
35	Kenya	737-800W	FFS Nivel D
36	Malaysia	AW-139	FFS Nivel D
37	New Zealand	A320-200	FFS Nivel D
38	New Zealand	ATR72-212A (600 version)	FFS Nivel D
39	Norway	S92A	FFS Nivel D
40	Philippines	A320-200	FFS Nivel D
41	Qatar	787-8	FFS Nivel D
42	Qatar	777-300ER	FFS Nivel D
43	Russia	A330-200	FFS Nivel D
44	Russia	A320-200	FFS Nivel D



45	Saudi Arabia	747-400	FFS Nivel D
46	Singapore	777-300ER	FFS Nivel D
47	Singapore	737-800W SFP	FFS Nivel D
48	South Africa	ATR72-212A	FFS Nivel D
49	South Africa	ATR42-500	FFS Nivel D
50	Sri Lanka	A330-200	FFS Nivel D
51	Sri Lanka	A320-200	FFS Nivel D
52	Taiwan (Republic of China)	ATR72-212A (600 version)	FFS Nivel D
53	Thailand	A320-200	FFS Nivel D
54	Thailand	A320-200	FFS Nivel D
55	Tunisia	A320-200	FFS Nivel D
56	Tunisia	A320-200	FFS Nivel D
57	Turkey	737-800W SFP	FFS Nivel D
58	Turkey	737-800W	FFS Nivel D
59	UAE	737-800	FFS Nivel D
60	UAE	737-800W SFP	FFS Nivel D
61	UK	Hawker 750	FFS Nivel D
62	UK	Cessna Citation Mustang	FFS Nivel D
63	USA	Cessna C750 Citation X	FFS Nivel D
64	USA	Gulfstream V	FFS Nivel D
65	Bahrain	A330-200	FTD Nivel 1
66	Bahrain	A320-200	FTD Nivel 1
67	Bulgaria	A320-200	FTD Nivel 1
68	Qatar	A350-900	FTD Nivel 1
69	Qatar	A330-200	FTD Nivel 1
70	Thailand	A330-200E	FTD Nivel 1
71	Thailand	ATR72-212A (600 version)	FTD Nivel 1
72	Turkey	A340-300	FTD Nivel 1
73	Turkey	A320-200	FTD Nivel 1
74	UAE	A340-600	FTD Nivel 1
75	UAE	A380-800	FTD Nivel 1
76	Qatar	787-8	FTD Nivel 2
77	Singapore	787-8	FTD Nivel 2
78	Singapore	787-8	FTD Nivel 2
79	USA	787-8	FTD Nivel 2
80	USA	Bell 429	FTD Nivel 2
81	USA	787-8	FTD Nivel 2
82	China	EC225 LP	FTD Nivel 3
83	Malaysia	EC225 LP	FTD Nivel 3
84	Singapore	AS365-N3+	FTD Nivel 3
85	Singapore	AS365-N3	FTD Nivel 3
86	USA	Bell 407 GX	FTD Nivel 3

## Ventajas y aplicaciones

En la invención realizada por Bennington, muestra la posibilidad de utilizar los aviones que han quedado inoperables para que sean utilizados como aeronaves de entrenamiento, aprovechando la instrumentación existente en el aparato. En el trabajo realizado por Pancoe (2002), describe las características del costo de los entrenadores debido a la

gran cantidad de instrumentos y controles que sirven para la simulación. De igual forma Marodi (2002), explica que un simulador de avión es una réplica de tamaño natural de una cabina de avión específico, y es capaz de representar la aeronave en operaciones en tierra y en vuelo.

Según el trabajo realizado por Koekebakker (2001), los simuladores pueden ser categorizados según el área

de aplicación: *simuladores de ingeniería*, son usados para evaluar las características de los vehículos como estructura aeroelástica y vibración de alta frecuencia amplificada por el piloto, entre otras. *Simuladores de investigación*, usados principalmente para la interacción y percepción entre el piloto y la aeronave. *Simuladores de entrenamiento*, usados para entrenar a los pilotos, en ambiente militar son para procedimientos en base fija.

Entre las ventajas de los simuladores se tienen: *requerimientos de seguridad*, el equipo mantiene las condiciones de operación limitadas, puede exponer al piloto a situaciones inusuales para que pueda enfrentarse a ellas sin ningún daño. *Bajos costos*: el uso de simuladores es más económico en comparación con la aeronave y puede ser utilizado para que haya un entrenamiento efectivo. *Consideraciones ambientales*, cada hora que se está en el simulador hace que se disminuya la generación de contaminación debido al no uso de una aeronave (Allerton, 2010).

Los simuladores de vuelo pueden tener dos características que se ajustan a las necesidades del usuario, como lo son: visualización gráfica o comportamiento físico de la aeronave (Gohl y Leutenegger, 2009; Inaba *et al.*, 2006, pp. 2787-2792). De igual forma, se pueden incluir condiciones de falla para realizar los procedimientos adecuados de corrección (Fountain, 2002)

Los simuladores son una herramienta que permite realizar operaciones sin riesgo para los instrumentos, equipos o personal que interviene. Los simuladores de vuelo tienen un papel muy importante, ya que permiten realizar los ajustes correspondientes sin que los nuevos pilotos o los pilotos que tienen una nueva aeronave sufran algún daño (Muñoz, 2012). También se requiere que existan equipos que permitan realizar entrenamiento de mantenimiento, de tal forma que no se pone en riesgo a la tripulación de la aeronave. El desarrollo de trabajos que buscan recrear las condiciones presentadas en los aviones como en Cristofaro, (2014), Reddy y Arun, (2013) y Alonso (2006), incluye características dinámicas de las aeronaves, evaluando su comportamiento estático y dinámico basado en modelos aerodinámicos. Gohl y Leutenegger (2009) estudian el desempeño que se puede obtener con un controlador de un ala cuando es inestable, además de estudiar los criterios de la estabilidad y rendimiento de la aeronave. De igual forma, los trabajos de simulación de modelos de aeronaves son estudiados por Almeida (2007) y Koekebakker (2001). Los simuladores de entrenamiento se encuentran sobre una plataforma que permite obtener varios grados de libertad (Dongsu y Hongbin, 2007; Davliakos y Papadopoulos, 2008). El trabajo desarrollado por Lawn (1998), muestra el enfoque para aplicaciones de investigación y enseñanza.

Empresas dedicadas al servicio de realizar entrenadores de simuladores aéreos (Flight Safety International Simulation, 2011), aseguran que cerca del 69 % de horas de entrenamiento corresponden a las realizadas en un simulador. En el mercado se encuentran entrenadores más especializados (Elbit System Ltd, 2011), que permiten realizar entrenamientos para el vuelo, estaciones de control, planeamiento de misiones, central de manejo del instructor, entre otros. Además, existen simuladores de vuelo con un desarrollo avanzado como el desarrollado por la NASA (2012): SimLabs: Advancing the science of flight. De igual forma, ofrecen una variedad de simuladores de aeronaves que actualmente se encuentran en el mercado, ya sea para el ambiente comercial o militar (Flight Safety International Simulation, 2011). También existen desarrollos que permiten conocer el comportamiento de la tripulación durante un vuelo (Tan, Chen, Van den Boomen y Rauterberg, 2010; Jirgl, Boni y Jaolovecky, 2015).

En Colombia se ha realizado un trabajo de diseño de simuladores de vuelo (Aguirre y Guarnizo, 2008). En el trabajo realizado por Sizza (2014), resalta la importancia de los simuladores aéreos en la Fuerza Aérea Colombiana, también recalca que se deben potenciar y adecuar a los escenarios del entorno nacional.

## Conclusiones

Las investigaciones sobre los simuladores de vuelo o FSTD han venido evolucionando de acuerdo con la tecnología que se ha desarrollado cada día, realizando un mayor número de investigaciones para el nuevo desarrollo tanto de tecnología como de software, teniendo en cuenta las nuevas tendencias del mundo.

La investigación demuestra que las reglamentaciones realizadas para los simuladores de vuelo o FSTD han sido de ayuda a la evolución de estos, ya que han formalizado y reglamentado los simuladores de vuelo a partir de las nuevas tecnologías y nuevos planteamientos teóricos.

A través de la historia se demuestra que los simuladores de vuelo han ayudado a la formación de pilotos, en sus habilidades de maniobrabilidad, desempeño en situaciones de alto riesgo; también han ayudado a la formación de instructores y al mantenimiento de las aeronaves.

Finalmente, con la clasificación obtenida para los diferentes tipos de simuladores de vuelo se logra evidenciar que lo mínimo requerido a desarrollar en el proyecto es obtener un simulador de vuelo completo (FFS) de tipo A, con una plataforma de movimiento con tres grados de libertad, un sistema visual frontal y lateral que brinde las referencias para el aterrizaje y un software que ofrezca el mejor modelo dinámico para la aeronave Cessna T.41.



## Agradecimientos

En primera instancia al Ministerio de Defensa Nacional por brindar los recursos para la convocatoria para el apoyo al proyecto "CTel para la investigación formativa de la Fuerza Pública 2015. Por otro lado, a los alféreces y cadetes vincu-

lados al proyecto, a todo el personal del grupo académico y grupo de vuelos, y directivos de la Escuela Militar de Aviación por el apoyo brindado para el desarrollo del proyecto (figura 2 y 3), el cual tuvo gran aceptación por parte del personal de instructores y alumnos de vuelo, fortaleciendo el entrenamiento y contribuyendo al ahorro institucional.



Figura 2. Vista posterior simulador de vuelo T-41 EMAVI  
Fuente. Prensa EMAVI, 2017



Figura 3. Vista lateral simulador de vuelo T-41 EMAVI  
Fuente. Prensa EMAVI, 2017

## Referencias

- Aeronáutica Civil. (2015). *RAC 24 Dispositivos simuladores para entrenamiento de vuelo*. Recuperado de <http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/Rrglamentacion/RAC/Paginas/Inicio.aspx>
- Aerosimulators. (2009). *Flight Training*. Recuperado de <http://www.superjetinternational.com/media-center/ssj100-full-flight-simulator-in-venice-achieves-easa-certification/>
- Aguirre, L., y Guarnizo R., J. (2008). *Diseño detallado de un simulador de vuelo dinámico*. Bogotá D. C.: Universidad de San Buenaventura.
- Airbus Helicopters. (2015). *Dauphin AS365 N3 / N3+ Full Flight Simulator*. Recuperado de [https://www.airbushelicopters.com/website/en/press/Realistic%20simulation%20training%20to%20enhance%20safety%20and%20capabilities%20of%20helicopter%20search%20and%20rescue%20missions\\_1651.html](https://www.airbushelicopters.com/website/en/press/Realistic%20simulation%20training%20to%20enhance%20safety%20and%20capabilities%20of%20helicopter%20search%20and%20rescue%20missions_1651.html)
- Allerton, D. J. (2010). *The impact of flight simulation in aerospace*. Recuperado de [https://www.aerosociety.com/Assets/Docs/Publications/DiscussionPapers/The\\_impact\\_of\\_flight\\_simulation\\_in\\_aerospace.pdf](https://www.aerosociety.com/Assets/Docs/Publications/DiscussionPapers/The_impact_of_flight_simulation_in_aerospace.pdf)
- Almeida, D. (2007). *UAV Flight Simulator based on ESA Infrastructure Flight simulation models compliant with SMP standard*. Lisboa, Portugal: Universidad Técnica de Lisboa.
- Alonso, M. (2006). *Diseño de una cabina de vuelo virtual*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Alonso, M. S. (2006). *Diseño de una cabina virtual*. España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Angelo, J. (2000). The link flight trainer. *ASME Landmarks*, 12.
- Australian Government Civil Aviation Safety Authority. (2015). *Flight simulators and training devices*. Australia: AGCASA.
- Barros dos Santos, S., & Oliveira, F. (2011). Longitudinal autopilot controllers test platform hardware in the loop. *IEEE International System Conference*, 379-386.
- Bernard, M. (October, 2012). Real learning through flight simulation: The ABCs of ATDs. *FAA Saf. Brief*, 8-10.
- Bosh, M. T. (2011). *Diseño de un simulador de helicóptero*. España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Chih-Hsien, K., Devaney, J., & Chung-Ming, H. (s.f.). The design of a fuzzy-based adaptive digital controller for a three-degrees-of-freedom in-parallel actuated manipulator [for flight simulator]. *IEEE*, 3, 1328-1332.
- Chomachar, A. A., & Azizi, S. (2015). Design of nonlinear control loader system for a flight simulator (a dynamic inversion approach. *IEEE*, 1-11.
- Cristofaro, M. (2014). *Elements of computational flight dynamics for complete aircraft*. Southampton. UK: University of Southampton.
- Davliakos, I., & Papadopoulos, E. (2008). Model-based control of a 6-dof electrohydraulic Stewart-Gough platform. *Mech. Mach. Theory*, 43(11), 1385-1400.
- Dongsu, W., & Hongbin, G. (2007). Adaptive sliding control of six-DOF flight simulator motion platform. *Chinese J. Aeronaut*, 20(5), 425-433.
- Dongsu, W., & Hongbin, G. (October, 2007). Adaptive Sliding Control of Six-DOF Flight Simulator Motion Platform. *Chinese Aeronaut*, 20(5), 294-304.
- Dongsu, W., Hongbin, G., & Peng, L. (2009). Comparative study on dynamic identification of parallel motion platform for a novel flight simulator. *IEEE*, 2232-2237.
- Dummer, G. (1949). Aids to training, the design of radar synthetic training devices for the R.A.F. *Proc IEE - Part III Radio Commun*, 96(40), 101-115.
- EASA. (1 de octubre de 2015). *EASA Qualified FSRDs*. Recuperado de <https://lisstdis.easa.europa.eu/eqstdis>
- Education IT. (2017). *Sistemas operativos más usados*. Centro de capacitación y desarrollo profesional.
- Elbit System Ltd. (2011). *Aircraft Mission Training Center (MTC)*.
- Federal Aviation Administration. (2014). *AC 61-136A*. Recuperado de <https://www.faa.gov/search/?q=AC+61-136A++Federal+Aviation+Administration>
- Federal Aviation Administration. (2014). *Training & Testing*. Recuperado de [https://www.faa.gov/training\\_testing/](https://www.faa.gov/training_testing/)
- Flight Safety International Simulation. (2011). *Flight Simulation Training Systems*. Broken Arrow.
- Fountain, P. J. (2002). *USA Patente n.º US20030054324A1*.
- Gohl, F., & Leutenegger, S. (2009). *Aerodynamic performance and stability simulation of different flying wing model airplane configurations*.
- Gusarov, R. (2011). *Sukhoi SuperJet*. Recuperado de <http://www.ruaviation.com/news/2011/11/22/632/>
- Haward, D. M. (1910). The Sanders "Teacher". *Flight*, II(50), 1006-1007. Recuperado de <https://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1910/1910%20-%201009.html>
- Inaba, Y., Shimada, Y., Uchiyama, K., Abe, K., Ishikawa, Y., Sugimoto, T., & Abe, A. (2006). *Development of flight simulator for human-powered aircraft the road towards a world record*. Sice Icaese.
- Jirgl, M., Boni, J., & Jaolovecky, R. (2015). The identification possibilities of the measured parameters of an aircraft model and pilot behavior model on the flight simulator. *IEEE Xplore*, 1-5.
- Koekebakker, S. (2001). *Model Based Control of a Flight Simulator Motion System*. Netherlands: Technische Universiteit Delft.
- Kovacova, J., & Koblen, I. (2012). Selected information on flight simulators - main requirements, categories and their development, production and using for flight crew training in the



- both Slovak Republic and Czech Republic conditions. *Incas Bulletin*, 4, 73-86.
- Lawn, P. (1998). *The Enhancement of a Flight Simulator System with Teaching and Research Applications*. Texas: University Concor dia.
- Lawn, P. (1998). *The enhancement of a flight simulator system with teaching and reserarch applications*. Canada: University Mon treal.
- Marodi, A. (2002). *An improved evaluation method for airplane si mulator motion cueing*. University of Pittsburgh.
- Mendoza, M., Vivas, V., & Rodríguez, H. (2014). Mechatronic Design, Dynamic Modeling and Results of a Satellite Flight Simulator for Experimental Validation of Satellite Attitude Determina tion and Control Schemes in 3-Axis. *Journal of Applied Re search and Technology*, 12(3), 370-383.
- Microsoft. (2015). *Visual C# Language*. Recuperado de [https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/getting-started/intro duction-to-the-csharp-language-and-the-net-framework](https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/getting-started/introduction-to-the-csharp-language-and-the-net-framework)
- Monsarrat, B., & Gosselin, M. (2003). Workspace analysis and op timal design of a 3-leg 6-DOF parallel platform mechanism. *IEEE*, 19(6), 954-956.
- Muñoz, M. (2012). *Manuel de vuelo*. Recuperado de [www.manual-devuelo.com](http://www.manual-devuelo.com)
- NASA. (2012). *SimLabs: Advancing the science of flight*. Recuperado de <http://www.simlabs.arc.nasa.gov>
- Odegard, R., Milenkovic, Z., & Buttacoli, M. (2014). Model-based GN&C simulation and flight software development for Orion missions beyond LEO. *IEEE Aerospace Conference*, 1-13.
- Odegard, R., Sliwinski, K., King, T., & Hart, J. (2011). Configuring the Orion Guidance, Navigation, and Control flight software for automated sequencing. *IEEE Aerospace Conference*, 1-13.
- Pancoe, E. G. (2002). *Moción system for an aircraft flight shmulatur*.
- Pradipta, J., Klunder, M., Weickgenannt, M., & Sawodry, O. (2013). Development of a pneumatically driven flight simulator Stewart platform using motion and force control. *IEEE*. doi: 10.1109/AIM.2013.6584085.
- Ray, L. P. (2000). Brief history of flight simulation. *SimTec*, 11-17.
- Reddy, B., & Arun, P. (2013). Development of real models for air cra ft simulator. *IEEE Xplore*, 52-53.
- Reinholtz, K. (1999). Applying simulation to the development of spacecraft flight software. *IEEE Aerospace Conference*, 1, 469-476.
- Rodríguez, N. J. (2014). Generalidades de los simuladores de vue lo. *Tecnoesufa*, 21-28.
- Rodríguez, R., Sampaio, R., Aguiar, A., & Buttacoli, M. (2014). FVMS Software-in-the-Loop Flight Simulation Experiments: Gui dance, Navigation and Contro. *Joint Conference on Robotics*, 223-228.
- Schmaltz, J. (2010). Flight training simulation. *The flight safety mul tiplie*, 21(4), 1-8.
- Sizza, J. (2014). Simuladores para entrenamientos en la Fuerza Aé rea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 9(1), 135-141.
- Slob, J. (2008). *State-of-the-Art driving simulators, a literature survey*. Eindhoven: University of Technology.
- Songshan, H., Zongxia, W., & Yaoxing, S. (2015). Fuzzy robust non linear control approach for electro-hydraulic flight motion simulator. *Chinese J. Aeronaut*, 28(1), 294-304.
- Statcounter. (2017). *Market Share Worldwide*. Recuperado de <https://statcounter.com/>
- Tan, C., Chen, W., Van den Boomen, G., & Rauterberg, M. (2010). *Application of automation for low cost aircraft cabin simulator*. Control Autom Syst.
- Virtual Insect Flight Simulator (VIFS): A software testbed for insect flight. (2001). *Virtual insect flight simulator (VIFS): a software testIEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4, 3885-3892.
- Vix. (2017). *Vix.com*. ¿Listo para despegar? Los mejores simula dores de vuelo civiles. Recuperado de <https://www.vix.com/es/btg/gamer/62883/listo-para-despegar-los-mejores-simula dores-de-vuelo-civiles>
- Weingarten, N. (2005). History of in-flight simulation & flying qua lities research at calspan. *AIAA Journal of Aircraft*, 42(2), 290-298.
- X-plane. (2017). FAA-Certified X-Plane. Recuperado de <https://www.x-plane.com/pro/certified/>
- Zazula, A., Myszor, D., Antemijczuk, O., & Cyran, K. (2013). Flight simulators - From electromechanical analogue computers to modern laboratory of flying. *Adv. Sci. Techol*, 7(17), 51-55.
- Zhang, Y., & Yao, Y. (2009). Virtual insect flight simulator (VIFS): A software testbed for insect flight. *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 841-844.





## Instrucciones para autores

La revista Ciencia y Poder Aéreo, considera artículos de investigación e innovación. Dentro de los cuales se encuentran: artículo de científico original, artículo de revisión, artículo de reflexión, artículo corto y reporte de caso, en idioma español, inglés y portugués. Acorde con la clasificación hecha por Colciencias (Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación) se definen así:

**a. Artículo científico original.** Documento completo que presenta de manera detallada los resultados originales derivados de proyectos de investigación y/o desarrollo tecnológico finalizados.

**b. Artículo de reflexión.** Documento original que presenta resultados de investigación, desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre una temática específica, recurriendo a fuentes originales.

**c. Artículo de revisión.** Documento resultado de una investigación donde se organiza, analiza, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas sobre un campo en ciencia y tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.

**d. Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica que requieren pronta difusión.

**e. Reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico. Puede incluir una revisión sistemática comentada de la literatura sobre casos análogos.

La revista Ciencia y Poder Aéreo admite la presentación de artículos cuyas áreas temáticas coincidan con los que se describen a continuación:

- Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica.
- Gestión y Estrategia.
- Tecnología e Innovación.
- Docencia y Educación y TIC

Busca que los temas referidos estén en lo posible relacionados con el sector aeroespacial y afines.

### Normas generales

Todo artículo debe:

- Hacer referencia al campo propio de la revista.
- Ser un documento o artículo original, no publicado previamente y no considerado en otra revista.
- Estar científicamente documentado, presentar coherencia y gozar de unidad interna.
- Indicar el tipo de artículo. Sí corresponde a un artículo científico original, de reflexión derivado de investigación; de revisión; artículo corto o reporte de caso, indicar el proyecto de investigación, registro (en caso de contar con este) y/o datos relacionados con el trabajo a presentar.
- Indicar la filial institucional del autor (es), perfil profesional y datos de contacto.
- Cada propuesta de artículo se somete a la evaluación de pares, cuyo concepto es importante para la decisión de su publicación.

Requisitos del texto

- Los artículos deberán tener una extensión de 15.000 a 90.000 caracteres con espacio (entre 10 a 30 páginas aproximadamente incluyendo las referencias) tamaño carta (21,5 x 25 cm) Myriad Pro o Times New Roman, espacio 1,5. Márgenes 2.54 cm.
- Figuras, tablas y ecuaciones deben estar enumeradas de manera consecutiva y citados dentro del texto, siguiendo las normas APA 6ta edición, tamaño 10.
- Siglas: se citará la primera vez el nombre completo y entre paréntesis la sigla. Posteriormente, sólo se destacará la sigla sin paréntesis.
- Citación y referencias: el sistema de citación y lista de referencias se debe realizar con base en las normas APA 6ta edición.
- Las notas al pie de página se utilizarán sólo para aportes sustantivos al texto.

### Estructura para los tipos de artículos literal a. b. c. d.

**Título:** en español, portugués e inglés. Como nota al pie, indicar el tipo de artículo, información referente a la investigación y demás datos relacionados – grupo de investigación, registro de proyecto, entidad financiadora u otra información que se considere.

**Resumen:** en español, portugués e inglés entre 150 - 200 palabras máximo; considerar los tipos de resúmenes: \*Analítico – sintético: donde incluya un comentario crítico del autor sobre el contenido del artículo presentado, además se indica la profundidad y extensión del trabajo, considerando objetivo, metodología, resultados y conclusiones. \*Analítico: texto informativo que presenta de manera breve y explícita todos los aspectos significativos y relevantes del artículo, mediante una relación lógica y lineal de los temas tratados; incluye resultados. **Palabras clave, Palavras-chave y Key Words:** de 3 a 6 en orden alfabético (tener en cuenta las palabras temáticas que proporcionan los tesauros), separadas por punto y coma (;). **Introducción** (hacer mención al problema de investigación). **Método. Resultados. Discusión y/o análisis. Conclusiones, Recomendaciones y/o Agradecimientos** (opcional). **Referencias** en orden alfabético – siguiendo las normas APA 6ta edición.

**Fichero aparte: incluir datos del autor(es)** incluir nombres, apellidos, breve currículo, filial institucional, dirección electrónica y postal (dirección lugar de trabajo y/o de correspondencia), números telefónicos de contacto y adscripción académica o profesional.

### Estructura para el tipo de artículos del literal e.

**Título:** en español, portugués e inglés. Como nota al pie, indicar el tipo de artículo, información referente sobre este.

**Resumen:** en español, portugués e inglés, entre 150-200 palabras máximo. Tener en cuenta los tipos de resúmenes: \*Analítico – sintético: donde incluya un comentario crítico del autor sobre el contenido del artículo presentado, además se indica la profundidad y extensión del trabajo, considerando objetivo, metodología, resultados y conclusiones. \*Analítico: texto informativo que presenta de manera breve y explícita todos los aspectos significativos y relevantes del artículo, mediante una relación lógica y lineal de los temas tratados; incluye resultados. **Palabras clave, Palavras-chave y Key Words:** de 3 a 6 en orden alfabético (tener en cuenta las palabras temáticas que proporcionan los tesauros), separadas por punto y coma (;). **Introducción. Cuerpo del artículo:** presentación del caso, resultados, discusión y análisis. **Conclusiones, Recomendaciones y/o Agradecimientos** (opcional). **Referencias** en orden alfabético - normas APA 6ta edición.

**Fichero aparte: incluir datos del autor(es)** incluir nombres, apellidos, breve currículo, filial institucional, dirección electrónica y postal (dirección



lugar de trabajo y/o de correspondencia), números telefónicos de contacto y adscripción académica o profesional.

### Preparación de envíos

Los autores pueden enviar sus originales una vez se hayan registrado en la revista. Como parte del proceso de envíos, los autores/as están comprometidos a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores/as aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

1. El trabajo enviado no ha sido publicado previamente ni se ha enviado simultáneamente a otra revista.
2. El manuscrito está en formato Microsoft Word, Open Office o RTF. (Forma de fichero electrónico.doc,rtf,odt)
3. El trabajo enviado debe estar entre de 15.000 a 90.000 caracteres con espacio (entre 10 a 30 páginas aproximadamente incluyendo las referencias).
4. Se han seguido los requisitos de estilo y las pautas de las Instrucciones para Autores en la presentación del trabajo.
5. Se han presentado las referencias bibliográficas en orden alfabético siguiendo los lineamientos de las normas APA 6ta edición, según se ha publicado en el Publication Manual of the American Psychological Association.
6. El texto tiene interlineado 1,5. El tamaño de fuente es de 12 puntos.
7. Todas las figuras y tablas se han situado en la posición correspondiente y no al final del texto. Todas las figuras (gráficos, imágenes, fotografías) y tablas deben ser enviadas por separado en formato. jpg y/o.xlsx (en documento original) que permitan ser editables para efectos de diseño.
8. El trabajo enviado ha sido preparado para la revisión ciega por pares, es decir, se han eliminado las referencias y los nombres de los autores de todas las partes del artículo y se han sustituido por la palabra «Autor» (propiedades del documento incluidas).
9. Se han adjuntado los datos del autor en un fichero aparte con nombre, apellidos, breve currículo, filial institucional, dirección electrónica y postal (dirección lugar de trabajo y/o de correspondencia), números telefónicos de contacto y adscripción académica o profesional.
10. Cesión de derechos de propiedad intelectual.

Se ha diligenciado y firmado la **carta de presentación de artículo**, la cual declara que soy (somos) el autor (es) original de la obra. (En dicho documento se incluye aspectos referidos a la licencia de uso). El equipo editorial queda, por lo tanto, exonerados de cualquier obligación o responsabilidad por cualquier acción legal que pueda suscitarse derivada de la obra depositada por la vulneración de derechos de terceros, sean de propiedad intelectual o industrial, de secreto comercial o cualquier otro. Es responsabilidad de los autores obtener los permisos necesarios de las imágenes que estén sujetas a **copyright**.

Si por último se decide no publicar el artículo en la revista, la cesión de derechos mencionada quedará sin efecto, de modo que el autor recuperará todos los derechos de explotación de la obra.

El envío de los artículos no implica la obligatoriedad de publicarlos, pues serán sometidos a evaluación de árbitros; aquellos textos que a juicio del Editor, Comité Editorial y/o Comité Científico llenen los requisitos exigidos y sean trabajos relacionados con **seguridad operacional, logística aeronáutica, tecnología e innovación, gestión y estrategia, docencia y educación**, y/o relacionados con el sector aeroespacial o afines.

Si no se indica lo contrario, se entienden aceptados la política de confidencialidad y el aviso legal de la revista en el momento de completar la entrega de su artículo y en el momento de ejecutar el formulario de registro en sitio web: [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)

### Proceso de revisión y publicación

1. Una vez recibido el artículo al cierre de convocatoria el Editor evalúa que cumplan con los requisitos generales y luego es sometido al Comité Editorial y/o Comité Científico (evaluación interna).
2. Se asignan los evaluadores según los temas desarrollados; enviando la invitación, el respectivo formato de evaluación y especificando el plazo de entrega del concepto. Todo artículo será enviado a evaluación por pares académicos internos y externos.
3. Cada evaluador emite una valoración y concepto a saber:

Calificación	Valoración	Concepto
75 – 100	Excelente	Publíquese como está - Es un producto publicable.
60 – 74	Bueno	Es un producto publicable con ajustes mínimos.
50 – 59	Aceptable	Es un producto publicable con ajustes significativos.
0 – 49	No Aceptable	No es un producto publicable - Requiere correcciones profundas y serias.

El Par Académico emite el concepto, desarrollando la evaluación respectiva de acuerdo con los parámetros enviados por el Editor.

1. El resultado final de las evaluaciones lo comunica el Editor a los autores. La revista no se compromete a mantener correspondencia con el autor(es) sobre los criterios adoptados. Se hace la retroalimentación de los conceptos en el caso de realizar las mejoras correspondientes a estructura y forma.
2. Cada artículo aceptado queda supeditado a una nueva revisión por el Editor y Comité Editorial. Los autores cuyos artículos fueron aceptados para publicación, deberán enviar una **carta de autorización** de uso de derechos de propiedad intelectual, en donde se consigne la autorización de publicación en cualquier medio, físico y/o electrónico.
3. Se reciben las versiones definitivas, realizando una nueva revisión.
4. Se hace la revisión de estilo y forma. Pasa luego al diseñador / diagramador, para finalmente obtener la publicación de la revista.
5. Cada autor recibe una comunicación electrónica (versión en línea) sobre la publicación, dada su participación en la edición.

### Principal contacto

Ciencia y Poder Aéreo  
 Revista Científica de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana  
 CT. Germán Wedge Rodríguez Pirateque, Director  
 Mayden Yolima Solano Jiménez, Editora en Jefe

Teléfonos: (057- 1) 6378927 / 6206518 Ext. 1719 – 1722  
 Correos electrónicos: [cienciaypoderareero@gmail.com](mailto:cienciaypoderareero@gmail.com) y [cienciaypoderareero@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderareero@epfac.edu.co)  
 Dirección: Cra. 11 No. 102 - 50 Edificio ESDEGUE Oficina 411 Bogotá D.C., Colombia. A.A. 110111  
 Publicaciones de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana  
[www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)





## Instruções para os Autores

A revista *Ciência e Poder Aéreo*, considera artigos de investigação e inovação. Entre os quais estão: artigo científico original, artigo de revisão, o artigo reflexão, artigo curto e relato de caso, em Espanhol, Inglês e Português. De acordo com a classificação feita por Colciencias (Departamento Administrativo de Ciência, Tecnologia e Inovação) definida como segue:

**a. Artigo científico original.** Documento completo que apresenta detalhadamente os resultados originais derivados de projetos de pesquisa e / ou desenvolvimento tecnológico concluídos.

**b. Artigo de reflexão.** Documento original que apresenta resultados de investigação desde uma perspectiva analítica, interpretativa ou crítica do autor, sobre uma temática específica, recorrendo a fontes originais.

**c. Artigo de revisão.** Documento resultado de uma investigação onde se organizam, analisam, sistematizam e integram resultados de investigações publicadas ou não sobre um campo em ciência e tecnologia, a fim de explicar as tendências de progresso e desenvolvimento. Caracteriza-se por apresentar uma cuidadosa revisão bibliográfica de pelo menos 50 referências.

**d. Artigo curto.** Breve documento que apresenta resultados originais preliminares ou parciais de uma pesquisa científica ou tecnológica, que exige pronta divulgação.

**e. Reporte de caso.** Documento que apresenta os resultados de um estudo sobre uma situação particular, a fim de divulgar as experiências técnicas e metodológicas consideradas num caso específico. Pode incluir uma revisão sistemática da literatura sobre casos análogos.

A revista *Ciência e Poder Aéreo* admite a apresentação de artigos cujos temas correspondem aos descritos a seguir:

- Segurança e Logística Aeronáutica.
- Gestão e Estratégia.
- Tecnologia e Inovação.
- Educação e TIC.

Procura que os temas referidos, quanto possível estejam relacionados com o campo aeroespacial e afins.

### Normas gerais

Todo artigo deverá:

- Fazer referência ao campo próprio da revista.
- Ser um documento ou artigo original, não publicado anteriormente e não é considerado em outra revista.
- Estar cientificamente documentado, apresentar coerência e ter unidade interna.
- Indicar o tipo de artigo. Se corresponde a um artigo científico original, de reflexão derivado da pesquisa; de revisão; artigo curto ou reporte de caso, indicar o projeto de investigação, o registo (se conta com um) e / ou dados relacionados com o trabalho a ser apresentado.
- Indicar a filial institucional do autor (es), perfil profissional e detalhes de contato.
- Cada proposta de artigo está sujeita a avaliação por pares, cujo conceito é importante para a decisão de sua publicação.

Requisitos do texto

- Os artigos devem ter uma extensão de 15.000 a 90.000 caracteres com espaços (entre 10-30 páginas aproximadamente in-

cluindo referências) tamanho carta (21,5 x 25 cm) Myriad Pro ou Times New Roman, espaço 1,5. 2,54 cm de margens.

- Figuras, tabelas e equações devem ser numeradas consecutivamente e citadas no texto, seguindo as regras APA 6ª edição, tamanho 10.
- Siglas: O nome completo será mencionado a primeira vez e entre parênteses a sigla. Depois disso, somente se destacará a sigla sem parênteses.
- Citação e referências: o sistema de citação e lista de referências deve ser realizada com base nas regras APA 6ª edição.
- Notas de rodapé: serão utilizadas apenas para aportes substantivos ao texto.

### Estrutura para o tipo de artigos do literal a. b. c. d.

**Título:** em Espanhol, Português e Inglês. Como nota de rodapé, indicar o tipo de artigo, informações sobre a investigação e outros dados relacionados - grupo de pesquisa, registro do projeto, órgão de financiamento ou outras informações consideradas.

**Resumo:** em Espanhol, Português e Inglês, entre 150-200 palavras máximo; considerar os tipos de resumos: \* Analítico - sintético: que inclui um comentário crítico do autor sobre o conteúdo apresentado no artigo, além disso, inclui-se a profundidade e extensão do trabalho, considerando objetivo, metodologia, resultados e conclusões. \* Analítico: texto informativo que apresenta brevemente e explicitamente todos os aspectos significativos e relevantes do artigo, através de uma relação lógica e linear dos temas tratados; Ele inclui resultados. **Palabras clave, Palavras-chave e Key Words:** de 3 a 6 em ordem alfabética (Ter em conta as palavras temáticas que fornecem os tesouros), separadas por um ponto e vírgula (;). **Introdução** (mencionando o problema de pesquisa). **Método. Resultados. Discussão e / ou análise. Conclusões, recomendações e / ou Agradecimentos** (opcional).

**Referências** em ordem alfabética - seguindo a 6ª edição das regras APA.

**Arquivo separado: incluir informações sobre o autor(es)** incluir nomes, sobrenomes, pequena biografia, filial institucional, endereço eletrônico e postal (endereço de trabalho e / ou correspondência), números de telefone de contato e afiliação acadêmica ou profissional.

### Estrutura para o tipo de artigos do literal e.

**Título:** em Espanhol, Português e Inglês. Como nota de rodapé, indicar o tipo de artigo, informações sobre este.

**Resumo:** em Espanhol, Português e Inglês, entre 150-200 palavras máximo; considerar os tipos de resumos: \* Analítico - sintético: que inclui um comentário crítico do autor sobre o conteúdo apresentado no artigo, além disso, inclui-se a profundidade e extensão do trabalho, considerando objetivo, metodologia, resultados e conclusões. \* Analítico: texto informativo que apresenta brevemente e explicitamente todos os aspectos significativos e relevantes do artigo, através de uma relação lógica e linear dos temas tratados; Ele inclui resultados. **Palabras clave, Palavras-chave e Key Words:** de 3 a 6 em ordem alfabética (Ter em conta as palavras temáticas que fornecem os tesouros), separadas por um ponto e vírgula (;). **Introdução. Corpo do artigo:** apresentação do caso, resultados, discussão e análise. **Conclusões, recomendações e / ou Agradecimentos** (opcional).

**Referências** em ordem alfabética - seguindo a 6ª edição das regras APA.

**Arquivo separado: incluir informações sobre o autor(es)** incluir nomes, sobrenomes, pequena biografia, filial institucional, endereço eletrônico e postal (endereço de trabalho e / ou correspondência), números de telefone de contato e afiliação acadêmica ou profissional.

### Preparação de envios

Os autores podem submeter seus originais depois de terem registrado com a revista.



Como parte do processo de envio, o autor /es estão comprometidos a verificar que o envio cumpre com todos os itens mostrados abaixo. Os envios que não atendam a essas diretrizes será devolvidos.

1. O texto não foi publicado anteriormente nem tem sido enviado simultaneamente a outra revista.
2. O manuscrito está em formato Microsoft Word, Open Office ou RTF. (Forma de arquivo eletrônico.doc,rtf,odt)
3. Os trabalhos enviados deverão estar entre os 15.000 a 90.000 caracteres com espaços (entre cerca de 10-30 páginas, incluindo referências).
4. Foram seguidas as exigências de estilo e diretrizes das Instruções aos Autores na apresentação do trabalho.
5. Foram apresentadas as referencias bibliográficas em ordem alfabética seguindo as diretrizes das regras APA 6ª edição. como tem sido publicado no Manual da American Psychological Association.
6. O texto tem espaçamento 1,5. O tamanho da fonte é de 12 pontos.
7. Todas as figuras e tabelas estão localizados na posição correspondente e não no final do texto. Todas as figuras (gráficos, imagens, fotografias) e tabelas devem ser enviadas separadamente em formato. jpg e/ ou.xlsx (documento original) que permitem se editar para fins de desenho.
8. O documento enviado tem se preparado para avaliação cega por pares, ou seja, as referências e os nomes dos autores foram removidos de todas partes do artigo e substituídas pela palavra "Autor" (propriedades do documento incluídas).
9. Foram anexados os dados do autor em um arquivo separado com nome, sobrenomes, pequena biografia, filial institucional, endereço eletrônico e postal (endereço do local de trabalho e / ou correspondência), números de telefone de contato e afiliação acadêmica ou profissional.
10. Transferência de direitos de propriedade intelectual.

Se tem preenchido e assinado a **carta de apresentação do artigo**, que diz que eu sou (somos) o autor (es) original da obra. (aspectos relacionados com a licença estão incluídos no documento). A equipe editorial está portanto, isenta de qualquer obrigação ou responsabilidade por qualquer ação legal que possa surgir resultante do trabalho publicado pela violação de direitos de terceiros, sejam eles de propriedade intelectual, industrial de segredo comercial ou qualquer outro. É de responsabilidade dos autores obter as autorizações necessárias das imagens que estejam sujeitas a **copyright**.

Se, finalmente, foi decidido não publicar o artigo na revista, a transferência dos direitos caducarão, de modo que o autor vai recuperar todos os direitos de exploração da obra.

O envio dos artigos não implica a obrigação de publicá-los, pois eles vão ser submetidos a avaliação dos árbitros; aqueles textos que o julgamento do Editor, Comitê Editorial e / ou Comitê Científico cumpram as exigências e estejam relacionados com à segurança operacional, a logística aeronáutica, a tecnologia e inovação, a gestão e estratégia, o ensino e a educação, e / ou relacionados com o campo aeroespacial ou afins.

Salvo indicação contrária, são entendidos e aceitos a política de privacidade e o aviso legal da revista no momento de completar a entrega do seu artigo e no momento de executar o formulário de inscrição on-line: [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)

#### Processo de revisão e publicação

1. Após o recebimento do artigo no final da convocatória, o Editor avalia que cumpram os requisitos gerais e é então submetido ao Comitê Editorial e / ou Comitê Científico (avaliação interna).

2. Os avaliadores são atribuídos de acordo com os temas abordados; enviando o convite, o respectivo formulário de avaliação e especificando o prazo da entrega do conceito. Todos os artigos serão enviados para avaliação por pares acadêmicos internos e externos.
3. Cada avaliador emite uma avaliação e conceito:

Qualificação	Avaliação	Conceito
75 – 100	Excelente	Para ser publicado como está - é um produto publicável.
60 – 74	Bom	É um produto publicável com ajustes mínimos.
50 – 59	Aceitável	É um produto publicável com ajustes significativos.
0 – 49	Nao Aceitável	Não é um produto publicável - requer correções profundas e serias

O Par Acadêmico emite o conceito, desenvolvendo a avaliação relacionada de acordo com os parâmetros enviados pelo Editor.

1. Notifica o resultado final da avaliação ao Editor e aos autores. A revista não se compromete a manter correspondência com o autor (es) sobre os critérios adotados. Se faz feedback dos conceitos no caso de fazer melhoramentos no que respeita à estrutura e a forma.
2. Cada artigo aceito está sujeito a revisão adicional pelo Editor e o Comitê Editorial. Autores cujos trabalhos foram aceitos para publicação, devem enviar uma carta de autorização para utilizar os direitos de propriedade intelectual, onde seja registada a autorização para publicação em qualquer meio, físico e / ou eletrônico.
3. As versões finais são recebidas fazendo uma nova revisão.
4. Se faz revisão do estilo e forma. Em seguida vai para o desenhador / diagramador, para finalmente obter a publicação da revista.
5. Cada autor tem o direito de receber uma comunicação electrónica (versão em linha) sobre a publicação, dado o sua participação na edição.

#### Contato principal

Ciência e Poder Aéreo  
 Revista Científica da Escola de Pós-graduação da Força Aérea Colombiana  
 CT. Germán Wedge Rodríguez Pirateque, *Diretor*.  
 Maiden Yolima Solano Jiménez, *Editora chefe*.

Telefones: (057- 1) 6378927 / 6206518 Ext. 1719 – 1722  
 Correios eletrônicos: [cienciaypoderaereo@gmail.com](mailto:cienciaypoderaereo@gmail.com) e [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)  
 Endereço: Cra. 11 No. 102 - 50 Prédio ESDEGUE Escritório 411 Bogotá D.C., Colombia. A.A. 110111  
 Publicações da Escola de Pós-Graduação da Força Aérea Colombiana  
[www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)





## Instructions for authors

Science and Air Power journal consider articles of research and innovation. Inside that they are: original scientific articles, reflection article, review article, short article and case report, in Spanish, English and Portuguese. According to classification made by Colciencias (Administrative Department of Science, Technology and Innovation) they are defined as follows:

**a. Original scientific article.** It is a complete document that shows the original results of research projects finished of research and/or technological development in a detail way.

**b. Reflection article.** It is a original document that shows research results from an analytic, interpretative or review perspective of the author, about a specific topic using original sources.

**c. Review article.** It is a document where published and non-published research results about a field in science are organized, analyzed, systematized, and integrated, with the purpose to show progress and development tendencies. It is characterize for having careful bibliography review of at least 50 references.

**d. Short article.** It is a brief document that shows original, preliminary or partial results of scientific or technological research which require rapid dissemination.

**e. Case report.** It is a document that shows results of study about a particular situation with the purpose of sharing technical and methodological experiences in a specific case. It can includes a systematic review from literature about analogous cases.

Science and Air Power journal allows articles which thematic areas coincide with the following:

- Operational Safety and Aviation Logistics.
- Management and Strategy.
- Technology and Innovation.
- Education and ICT.

Looking for topics related as possible with the aerospace field.

### General rules

Every article must:

- Make reference to the journal field.
- Be an original document or article, non-previously published neither considered in another journal.
- Have scientific contend, coherence and unity.
- Indicate article type. Denote the research project, registration (if exists) and/or data related with the work to present, when it corresponds to a original scientific article; reflection review, short article or case report.
- Indicate author's subsidiary institution, author's professional profile and contact information.
- Each article proposal is evaluated by peers whose concept has a significant impact on publishing decision.

Text requirements

- Articles must have a length of 15.000 a 90.000 characters with spaces (between 10 a 30 pages approximately including references) letter size (21.5 x 25 cm) Myriad Pro or Times New Roman, 1.5 spacing, 2.54 cm margins.
- Figures, tables and equations must be numbered in a consecutive way and cited within the text, following APA 6<sup>th</sup> rules, letter size 10.

- Initials: Use the whole name and put initials in parenthesis when writing for the first time, and later only write initials without parenthesis.
- Citation and references: citations and references should be done based on APA 6<sup>th</sup> edition rules.
- Foot notes are used only for significant contribution to the text.

### Structure for articles types a, b, c, d.

**Title:** in Spanish, Portuguese and English. As a foot note, indicate article type, information regarding research and other related data – research group, project registration, sponsor institution and any other information considered necessary.

**Abstract:** in Spanish, Portuguese and English, 150 to 200 words maximum; consider types of abstract: \*Analytic – synthetic: where a short critic comment from the author about the article is included, as well as the deepness and scope of the work, considering objective, methodology, results and conclusions. \*Analytic: informative text that presents in a brief way and explains all significant and relevant aspects of the article, through a logic and lineal relation of the topics addressed; includes results. **Palabras clave, Palavras-chave** and **Key words:** 3 to 6 in alphabetic order (consider thematic words offer by thesaurus), separated by semicolon (;). **Introduction:** (talk about the research problem or question)

**Method. Results. Discussion and/or analysis, Conclusions, Recommendations and/or Acknowledgements** (optional). **References** in alphabetic order-according to APA 6<sup>th</sup> edition rules.

**Separate tag: include author(s) data** names, last names, short curriculum, subsidiary institution, email and postal code (work place address and mail), contact telephone numbers and academic or professional description.

### Structure for article types e.

**Title:** in Spanish, Portuguese and English. As a foot note, indicate article type, information related to it.

**Abstract:** in Spanish, Portuguese and English, 150 to 200 words maximum; consider types of abstract: \*Analytic – synthetic: where a short critic comment from the author about the article is included, as well as the deepness and scope of the work, considering objective, methodology, results and conclusions. \*Analytic: informative text that presents in a brief way and explains all significant and relevant aspects of the article, through a logic and lineal relation of the topics addressed; includes results. **Palabras clave, Palavras-chave y Key words:** 3 to 6 in alphabetic order (consider thematic words offer by thesaurus), separated by semicolon (;). **Introduction. Article body:** case introduction, results, discussion, and analysis. **Conclusions, Recommendations and/or Acknowledgements** (optional). **References** in alphabetic order-according to APA 6<sup>th</sup> edition rules.

**Separate tag: include author(s) data** names, last names, short curriculum, subsidiary institution, email and postal code (work place address and mail), contact telephone numbers and academic or professional connection.

### Submission preparation

Authors may submit originals once register in the journal.

As part of submission process, author(s) are committed to confirm that its submittal satisfies all elements shown as follows; otherwise articles will be returned to the author(s).

1. The work sent has not been previously published nor has been sent simultaneously to another journal.
2. The text is in Microsoft Word, Open Office or RTF format (.doc,.rtf, .odt)
3. The work sent must have 15.000 to 90.000 characters with space (10 to 30 pages approximately including references).
4. Style requirements and instructions for authors have been followed in the work submission.

5. Bibliographic references have been presented in alphabetic order according to APA rules 6<sup>th</sup> edition as published in the Publication Manual of the American Psychological Association.
6. Text has 1,5 space. Font size is 12.
7. All figures and tables have been situated on the correspondent location and not at the end of the text. All figures (draws, images, photos) and tables must be sent separately in .jpg and/or .xlsx format (in original document) that allow to be edited for design purposes.
8. Work submitted has been prepared for blind peer review, which means, references and author's names have been deleted and substituted by the word «Author» (document properties included).
9. Author(s) information has been included in a separate tag with name, last name, brief curriculum, subsidiary institution, email, and address (work place address and/or mail), contact telephone numbers and academic or professional connection.
10. Cession of intellectual property rights.

**Article cover letter** has been filled out and signed, stating original authorship of the manuscript. (Topics related with the license of use are included in this document). Editorial team are, as a result, exonerated of any obligation or responsibility for any legal action that could be initiated from the manuscript submitted for violation of third party rights, intellectual or industrial property rights, commercial secrets, or any other type. It is author's responsibility to obtain all necessary permissions of images subject to *copyright*.

Should the journal, in its sole discretion, elect not to publish the Work, the cession shall lapse and be of no further effect. In such event the copyright shall revert to the Author and the journal shall not publish the Work, or any part thereof, without the Author's prior written consent.

The submission of articles does not imply obligatory nature to be published, since should pass through an evaluation process; Those manuscripts that according to the judgment of the Editor, Editorial board and/or Scientific board, fulfill all the requirements and that belong to any of the following fields: Operational Safety and Aviation Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation, Teaching and Education, and/or related with the aerospace field.

Confidentiality policy and journal's legal notice are assumed accepted if the opposite is not stated at the time of completing submission of the article and filling out of registration form on the website [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)

#### Review and publication process

1. After the closing date for submissions for call for article, the editor checks that articles satisfies general requirements and then are passed to the Editorial and/or Scientific board (internal evaluation).
2. Reviewers are assigned according to the topics; sending an invitation, the correspondent evaluation form and specifying the deadline for submission of the concept. Every article will be submitted to evaluation by internal and external academic peers.
3. Each reviewer will give one of the following concepts:

Score	Assessment	Concept
75 – 100	Excellent	Let it be published as it is - is a publishable product.
60 – 74	Good	It is a publishable product with minimal adjustments.
50 – 59	Acceptable	It is a publishable product with significant adjustments.

0 – 49	Unacceptable	It is not a publishable product - Requires deep and serious corrections.
--------	--------------	--

The Academic Peer emits the concept, developing the correspondent evaluation according to the parameters given by the Editor.

1. Final result of the evaluation is notified by the Editor to the Authors. The Journal is not committed to discuss with the author the evaluation criteria. Feedback of the concepts is done in case of making the correspondent structure and form improvements.
2. Each accepted article is subject to a new revision by the Editor and Editorial board. Authors whose articles were accepted for publication, should send an authorization letter for the use of intellectual property rights, where authorizes publication in any written or electronic media.
3. Final versions are received, making a new revision.
4. Style and form revision is done. Then, article is passed to the designer, and finally is published on the journal.
5. Each author has the rights to receive an electronic message about the version (online) publication, given its participation on the edition.

#### Principal Contact

Science and Air Power

Scientific Journal of the Colombian Air Force's Postgraduate School

*CT. Germán Wedge Rodríguez Pirateque, Director*

*Mayden Yolima Solano Jiménez Editor in Chief*

Phone: (057- 1) 6378927 / 6206518 Ext. 1719 – 1722

E-mail: [cienciaypoderaereo@gmail.com](mailto:cienciaypoderaereo@gmail.com) and [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)

Cra. 11 No. 102 - 50 Building ESDEGUE Office 411

Bogota D.C., Colombia. A.A. 110111

Publications of the Colombian Air Force's Postgraduate School

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



# ASÍ SE VA A LAS ALTURAS



Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana  
Institución Universitaria • Resolución 1906 MEN, Agosto de 2002



Fuerza Aérea Colombiana



Escuela de Postgrados FAC

