GESTIÓN TECNOLÓGICA E INNOVACIÓN EN EL CAMPO AEROESPACIAL

Colección:
Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial

EMAVI
SELLO EDITORIAL

Catalogación en la publicación - Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez"

Gestión Tecnológica e Innovación en el Campo Aeroespacial / Editor Académico Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez" EMAVI -- Santiago de Cali : Sello Editorial Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez" EMAVI, 2023.
512 páginas : ilustraciones color y gráficos; 17x24 cm
Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo
ISBN (Impreso): (978-628-96090-0-4)
ISBN (Digital): (978-628-96090-1-1)
Colombia. Escuela Militar de Aviación (EMAVI) –

1.Gestión del conocimiento --- 2. Gestión de procesos–- 3 . Inyectores de motor

--I. TC. Moreno Delgado, Kenny Leonardo, Teniente Coronel (Prólogo), II. Rincon Urbina, Sonia Ruth, Teniente coronel (autor), III. Vélez Salamanca, Juan Andrés (autor), IV. Vallejo Bedoya, Astrid Lorena (autor), V. Henao Salazar, Sebastián (autor) VI. Monsalve Manco, Victor Hugo (autor), VII. Montoya Lemus, Yeison Manuel (autor) VIII. Ramírez Penagos, Mauricio (autor), IX. Jiménez Lozano, Cesar, Mayor (autor), X. Lozano Tafur, Cristian (autor), XI. Melo Daza, Pedro Fernando (autor), XII. Cruz Sanabria, Jeison Fabián (autor), XIII. Bermúdez Gómez, Juan Andrés (autor), XIV. Castañeda Acevedo, Kevin Andrés (autor); XV. Cárdenas Espinosa, Lorena Paola, Cápitan (autor); XVI. Gutiérrez Bossa, Erick Enrique (autor); XVII. Chacón Ardila, Wilmer , Mayor (autor); XVIII. Plata Arango, Iván Rodrigo (autor); XIX. Moreno Ortega, Cristian David (autor); XX. Cárdenas García, Juan Manuel , Mayor (autor); XXI. Pirazan Villanueva, Karen Nicole (autor); XXII. Barrera Molano, Sergio Fernando, Teniente (autor); XXIII. Muñoz Giraldo, Santiago, Subteniente (autor); XIV. Patiño, Carlos Andrés (autor); XXV. Gómez Pizano, Daniel (autor); XVI. Torres Sabaté, Armengol (autor); XVII. Daza Rincón, Juan Carlos (autor); XVIII. Valencia Castañeda, Luis Leonardo (autor); XIX. Ucros Rojas, Rafael Enrique; XXX. Chirán Alpala, William Efrén, Teniente (autor); XXXI. Zarate Luna, Paola Andrea, Mayor (autor); XXXII. Mora Nieto, Álvaro Andrés Subteniente (autor); XXXIII. Bautista Muñoz, Juan David (autor); XXXIV. Jiménez López, Fabián Rolando (JIMLO) (autor); XXXV. Vera-Cely, Oscar Fernando (autor); XXXVI. Higuera Garzón, Mario Armando (autor); XXXVII. Murcia Piñeros, Jhonathan (autor); XXXVIII. Enciso, Javier (autor); XXXIX. Serna Medina, Alejandro (autor) ; XL. Rueda Gil, Jack (autor); XLI. Vargas Plaza, Jesús Mario (autor); XLII. Aguilar Sánchez, John Fabio (autor); XLIII. Ramírez Hernández, Carlos Arturo, Mayor (autor); XlV. López, Jesús Alfonso (autor); XLV. Colombia. Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez" (EMAVI); XLVI. Colombia. Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC).

Registro Catalográfico SIBFuP 991283013907231
500.5 23

Archivo descargable en formato MARC en: https://tinyurl.com/emavi 991283013907231

Gestión Tecnológica e Innovación en el Campo Aeroespacial
Colección: Gestión Ciencia y Poder Aeroespacial
© Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez" (EMAVI)
©EMAVI Sello Editorial
©Varios autores

Dirección
BG. Víctor Alexander Celis Herrera

Subdirección
CR. Fabián Andrés Salazar Ospina
Escuela de Formación y Jefe de Estado Mayor

Comando Grupo Académico
TC. Kenny Leonardo Moreno Delgado

Jefe Sección Investigación
MY. Héctor Fabio Calvo Valencia

1ra. Edición: 100 ejemplares
Santiago de Cali, Valle del Cauca, 2023

Sección Investigación EMAVI
Carrera 8 # 58-67 (La Base) Cali–Colombia
Teléfono: +57 (2) 488 1000, Ext. 68841

Apoyo Gestión de Publicaciones Científicas
PS. Diana María Mosquera Taramuel
diana.mosquerat@emavi.edu.co

Corrección de Estilo:
Raúl Eduardo Chacón Hernández

Diseño y Diagramación Editorial:
Chako Hdnz

Publicado en Colombia–Published in Colombia

Contenido relacionado

https://www.emavi.edu.co/es/investigacion/editorial-emavi

Las instituciones editoras de esta obra no se hacen responsable de las ideas expuestas bajo su nombre, las ideas publicadas, los modelos teóricos expuestos o los nombres aludidos por los autores. El contenido publicado es responsabilidad exclusiva de los autores, no refleja la opinión de las directivas, el pensamiento institucional de las Universidades editoras, ni genera responsabilidad frente a terceros en caso de omisiones o errores.

El Sello Editorial de la Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez" se adhiere a la filosofía de acceso abierto. Este libro está licenciado bajo los términos de la Atribución 4.0 de Creative Commons, que permite el uso, el intercambio, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre y cuando se dé crédito al autor o autores originales y a la fuente.

GESTIÓN TECNOLÓGICA E INNOVACIÓN EN EL CAMPO AEROESPACIAL

Colección:
Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial

Autores:

Juan Andrés Vélez Salamanca, Astrid Lorena Vallejo Bedoya, Sebastián Henao Salazar, Víctor Hugo Monsalve Manco, Yeison Manuel Montoya Lemus, Mauricio Ramírez Penagos, Cesar Jimenez Lozano, Cristian Lozano Tafur, Pedro Fernando Melo Daza, Jeison Fabián Cruz Sanabria, Juan Andrés Bermúdez Gómez, Kevin Andrés Castañeda Acevedo, Lorena Paola Cárdenas Espinosa, Erick Enrique Gutiérrez Bossa, Wilmer Chacón Ardila, Iván Rodrigo Plata Arango, Juan Manuel Cárdenas García, Karen Nicole Pirazan Villanueva, Sergio Fernando Barrera Molano, Santiago Muñoz Giraldo, Carlos Andrés Patiño, Daniel Gómez Pizano, Armengol Torres Sabaté, Juan Carlos Daza Rincón, Luis Leonardo Valencia Castañeda, Rafael Enrique Ucros Rojas, William Efrén Chirán Alpala, Cristian David Moreno Ortega, Paola Andrea Zárate Luna, Álvaro Andrés Mora Nieto, Juan David Bautista Muñoz, Fabian Rolando Jiménez López, Oscar Fernando Vera Cely, Mario A. Higuera G., Jhonathan Murcia Piñeros, Javier Enciso, Alejandro Serna, Jack Rueda Gil, Jesús Mario Vargas Plaza, John Fabio Aguilar Sánchez, Carlos Arturo Hernández Ramírez, Sonia Ruth Rincón y Jesús Alfonso López.

FUERZA AEROESPACIAL COLOMBIANA
ASÍ SE VA A LAS ESTRELLAS

EMAVI
SELLO EDITORIAL

CONTENIDO

Introducción 11

Prólogo 13

GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO Y ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS 17

Capítulo 1.
La gestión de conocimiento base para desarrollar competencias en escenarios de reskilling y upskilling 19
Juan Andrés Vélez Salamanca, Astrid Lorena Vallejo Bedoya, Sebastián Henao Salazar y Víctor Hugo Monsalve Manco.
/ Fundación Universitaria María Cano. Medellín, Colombia

Capítulo 2.
El factor humano y herramientas para la mitigación de accidentes en el sector aeronáutico 39
Yeison Manuel Montoya Lemus y Mauricio Ramírez Penagos
/ Universidad de San Buenaventura

GESTIÓN DE PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN Y PRODUCCIÓN MECÁNICA 71

Capítulo 3.
Diseño conceptual de un hábitat científico análogo espacial 73
Cesar Jimenez Lozano
/ Subjefatura de Estado Mayor Estrategia y Planeación. Fuerza Aeroespacial Colombiana

Capítulo 4.
Evaluación de los inyectores del motor PT6A a través de visión artificial
Cristian Lozano Tafur / *Escuela de Aviación del Ejército - ESAVE*
Pedro Fernando Melo Daza / *Fundación Universitaria Los Libertadores* **107**
Jeison Fabián Cruz Sanabria / *Escuela de Aviación del Ejército - ESAVE*
Juan Andrés Bermúdez Gómez / *Escuela de Aviación del Ejército - ESAVE*
Kevin Andrés Castañeda Acevedo/ *Escuela de Aviación del Ejército - ESAVE*

Capítulo 5.
Investigación para la implementación de una segunda carga útil al sistema satelital FACSAT-2, para el análisis de gases de efecto invernadero
Lorena Paola Cárdenas Espinosa*
Erick Enrique Gutiérrez Bossa *
Wilmer Chacón Ardila * **127**
Iván Rodrigo Plata Arango / *Ecopetrol*
Cristian David Moreno Ortega*
*/ *Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) - Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez".*
Fuerza Aeroespacial Colombiana

Capítulo 6.
Preparación y resultados de la campaña de ensamble, integración y pruebas para el SAT-Chiribiquete: Misión FACSAT-2
Juan Manuel Cárdenas García, Karen Nicole Pirazan Villanueva , Sergio Fernando Barrera Molano, Santiago Muñoz Giraldo, **171**
/ Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) - Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez".
Fuerza Aeroespacial Colombiana

Capítulo 7.
Análisis sísmico modal espectral de un hábitat lunar
Carlos Andrés Patiño y Daniel Gómez Pizano
/ Universidad del Valle **217**

TECNOLOGÍA Y SISTEMATIZACIÓN AÉREA Y ESPACIAL **233**

Capítulo 8.
La promoción y la educación espacial como garantías del ecosistema espacial latinoamericano
Armengol Torres Sabaté / Universitat Pompeu Fabra (UPF), Barcelona, España **235**

Capítulo 9.
Algoritmo para filtrado de datos obtenidos por medio del sistema ADS-B de las aeronaves
Cristian Lozano Tafur / *Fundación Universitaria Los Libertadores*
Pedro Fernando Melo Daza / *Escuela de Aviación del Ejército - ESAVE*
Juan Carlos Daza Rincón/ *Fundación Universitaria Los Libertadores* **305**
Luis Leonardo Valencia Castañeda /*Fundación Universitaria Los Libertadores*
Rafael Enrique Ucros Rojas / *Fundación Universitaria Los Libertadores*

Capítulo 10.
Aplicaciones de imágenes satelitales FACSAT-1 para la definición de mapas de cobertura de la tierra
William Efrén Chirán Alpala, Cristian David Moreno Ortega,
Lorena Paola Cárdenas Espinosa, Paola Andrea Zárate Luna y **327**
Álvaro Andrés Mora Nieto
/ Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) - Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez". Fuerza Aeroespacial Colombiana

Capítulo 11.
Sistema de recepción y decodificación de imágenes atmosféricas provenientes de satélites meteorológicos de órbita baja **383**
Juan David Bautista Muñoz, Fabian Rolando Jiménez López y Oscar Fernando Vera Cely
/ *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*

Capítulo 12.
Estudio de concepto para el desarrollo de un modelo de cualificación de un rover lunar
Mario A. Higuera G. / *Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia AstroCO – ACCEFYN*
Jhonathan Murcia Piñeros / *Instituto de Ciencia y Tecnología, Universidad Federal de São Paulo* **419**
Javier Enciso / *CEO, Enciso Systems*
Alejandro Serna / *ICRA – Instituto Colombiano de Robótica Avanzada*
Jack Rueda Gil / Diesel del Oriente
Jesús Mario Vargas Plaza / Orión Campamento
John Fabio Aguilar Sánchez / Universidad Militar Nueva Granada

Capítulo 13.
Diseño e implementación de un sistema informático para la gestión de documentos que soportan la trazabilidad de peligros asociados al desarrollo y fabricación de productos aeronáuticos **439**
Carlos Arturo Hernández Ramírez
/ Sección de Ingeniería en el Grupo Técnico del Comando Aéreo de Transporte Militar (CATAM).
Fuerza Aeroespacial Colombiana

Capítulo 14.
Caso de estudio: “modelos de redes neuronales artificiales para tratamiento de imágenes satelitales”

Paola Andrea Zárate Luna
Sonia Ruth Rincón
/ Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) - Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. Fuerza Aeroespacial Colombiana
Jesús Alfonso López / *Universidad Autónoma de Occidente*

INTRODUCCIÓN

La gestión tecnológica e innovación son elementos clave en el campo aeroespacial, ya que esta industria requiere de una constante actualización y mejora de sus procesos para lograr resultados efectivos y seguros.

En Colombia, la gestión tecnológica en el campo aeroespacial ha estado en constante evolución en los últimos años, gracias al esfuerzo de empresas e instituciones académicas para desarrollar nuevas tecnologías y mejorar las existentes.

En el mundo, la gestión tecnológica y la innovación en el campo aeroespacial han tenido un impacto significativo en la industria. Con la creciente demanda de vuelos comerciales y el aumento de la exploración espacial, la necesidad de tecnologías más avanzadas ha impulsado la creación de nuevos materiales, sistemas de propulsión y herramientas de comunicación. Además, la gestión de datos y el análisis de información se han convertido en áreas de gran importancia para la industria aeroespacial. En Colombia, la Fuerza Aeroespacial Colombiana y la Corporación de la Industria Aeronáutica Colombiana (CIAC) han sido líderes en la gestión tecnológica y la innovación en el campo aeroespacial. Estas instituciones han desarrollado proyectos de investigación y desarrollo en áreas como el diseño y producción de aeronaves, la fabricación de componentes y la implementación de tecnologías de comunicación y seguridad.

Esta publicación pretende recoger todas aquellas investigaciones y avances que se están realizando desde la academia, la industria y centros de investigación. Estas investigaciones participaron como ponencias respaldadas por un artículo de investigación en la Semana Universitaria EMAVI en el año 2022, evento académico que forma parte de la Semana Mundial del Espacio, espacio consolidado en cuatro congresos internacionales de la Escuela Militar de Aviación. Este trabajo es el resultado de la cuarta entrega de la Colección Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial.

PRÓLOGO

En el vasto horizonte de la investigación científica y tecnológica, el ser humano se ha distinguido por su insaciable deseo de explorar, descubrir y avanzar. Es en la incansable búsqueda de sabiduría y excelencia que se han erigido pilares fundamentales para el desarrollo de competencias en distintos escenarios, desde el reskilling y upskilling de profesionales hasta el desarrollo de tecnologías que revolucionan industrias y expanden nuestros límites como sociedad.

En este viaje hacia el conocimiento, nos adentramos en los distintos capítulos de este libro, una obra que nos sumergirá en una travesía por campos tan diversos como emocionantes. Desde el cielo hasta el espacio, desde la tecnología aeroespacial hasta la inteligencia artificial, cada capítulo se convierte en una ventana a un universo de posibilidades y descubrimientos, desafiándonos a superar las barreras de lo conocido y adentrarnos en lo desconocido.

En el primer capítulo, "La Gestión de Conocimiento Base para Desarrollar Competencias en Escenarios de Reskilling y Upskilling", se nos invita a comprender cómo el aprendizaje continuo y la adaptación constante son esenciales para prosperar en un mundo en constante cambio.

El segundo capítulo, "El Factor Humano y Herramientas para la Mitigación de Accidentes en el Sector Aeronáutico", destaca la importancia de la seguridad en un campo tan exigente como el aeronáutico, donde la colaboración entre el ingenio humano y las herramientas tecnológicas es vital para preservar vidas.

A medida que avanzamos, nos encontramos con el tercer capítulo, "Diseño Conceptual de un Hábitat Científico Análogo Espacial", un emocionante viaje hacia la exploración del espacio y la preparación para futuras misiones espaciales.

El cuarto capítulo, "Evaluación de los Inyectores del Motor PT6A a través de Visión Artificial", nos introduce en el fascinante mundo de la inteligencia artificial

aplicada a la industria aeronáutica, donde la visión y el procesamiento de datos se convierten en herramientas fundamentales para la eficiencia y seguridad.

Avanzando, descubrimos el quinto capítulo, “Investigación para la Implementación de una Segunda Carga Útil al Sistema Satelital FACSAT-2, para el Análisis de Gases de Efecto Invernadero”, donde se aborda la crucial tarea de monitorear y comprender nuestro impacto en el medio ambiente a través de la tecnología espacial.

Los capítulos posteriores nos invitan a sumergirnos en proyectos y misiones específicas, como la “Preparación y Resultados de la Campaña de Ensamble, Integración y Pruebas para el SAT-Chiribiquete: Misión FACSAT-2”, el “Análisis Sísmico Modal Espectral de un Hábitat Lunar” y la “Aplicación de Imágenes Satelitales FACSAT-1 para la Definición de Mapas de Cobertura de la Tierra”, entre otros, que nos acercan a la conquista del espacio y a la comprensión de nuestro planeta y su entorno.

Este libro también se adentra en el desarrollo de tecnologías y herramientas fundamentales para el futuro, como el “Algoritmo para Filtrado de Datos Obtenidos por Medio del Sistema ADS-B de las Aeronaves”. Esta innovadora tecnología desempeña un papel crucial en la aviación moderna, ya que permite una gestión más eficiente y segura del tráfico aéreo al proporcionar datos en tiempo real sobre la ubicación y el estado de las aeronaves. El libro explora en detalle cómo este algoritmo contribuye a mejorar la precisión y la confiabilidad de la información recopilada a través del sistema ADS-B, lo que tiene un impacto significativo en la seguridad y la eficiencia de la navegación aérea en un mundo cada vez más dependiente de la tecnología.

La lectura culmina con una visión sobre la educación espacial y el ecosistema latinoamericano, en el capítulo “La Promoción y la Educación Espacial como Garantías del Ecosistema Espacial Latinoamericano”, que enfatiza la importancia de fomentar el conocimiento y la innovación en la región.

Por último, cerramos esta emocionante travesía con el “Caso de Estudio: Modelos de Redes Neuronales Artificiales para Tratamiento de Imágenes

Satelitales", que nos muestra cómo la inteligencia artificial y el procesamiento de imágenes espaciales se combinan para enriquecer nuestra comprensión del mundo que nos rodea.

Esperamos que este compendio de conocimientos inspire a los lectores a seguir explorando, descubriendo y aportando su ingenio a la inagotable búsqueda de la verdad. Cada capítulo es un testimonio del poder de la mente humana y su capacidad para trascender límites, un recordatorio de que, a través del conocimiento y la colaboración, podemos enfrentar los desafíos más grandes y abrirnos a un futuro de posibilidades infinitas.

¡Bienvenidos a esta apasionante aventura del saber y el progreso!

TC. KENNY LEONARDO MORENO DELGADO
Comandante Grupo Académico

GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO Y ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS

CAPÍTULO 1

LA GESTIÓN DE CONOCIMIENTO BASE PARA DESARROLLAR COMPETENCIAS EN ESCENARIOS DE RESKILLING Y UPSKILLING

Juan Andrés Vélez Salamanca
https://orcid.org/0000-0002-2291-1732
juanandresvelezsalamanca@fumc.edu.co

Astrid Lorena Vallejo Bedoya
https://orcid.org/0000-0003-0453-9380
astridlorenavallejobedoya@fumc.edu.co

Sebastián Henao Salazar
https://orcid.org/0000-0002-6730-8291
sebastianhenaosalazar@fumc.edu.co

Víctor Hugo Monsalve Manco
https://orcid.org/0000-0002-5873-3261
victor.monsalve@fumc.edu.co

Fundación Universitaria María Cano.
Medellín, Colombia

Resumen

Este artículo presenta resultados preliminares de una investigación cuyo objetivo es desarrollar un modelo de gestión del conocimiento en pequeñas y medianas empresas (pymes). El modelo no solo identifica los procesos de implementación, sino también las competencias y habilidades necesarias para dicha implementación. Por lo tanto, resulta crucial identificar las competencias existentes en la empresa y establecer planes de formación, considerando aspectos de reskilling (reentrenamiento) y upskilling (mejora de habilidades). Para alcanzar estos objetivos, se emplea una metodología mixta de tipo cuasi experimental en una muestra conveniente, permitiendo realizar un diagnóstico de la situación actual de la empresa en cuanto a competencias, habilidades y capacidades organizativas, así como las habilidades directivas necesarias para gestionar el conocimiento. Es importante destacar que los resultados y hallazgos presentados son preliminares, ya que la investigación se encuentra en curso. No obstante, estos resultados proporcionan una base sólida para que las empresas consideren los elementos clave en sus procesos de formación.

Abstract. This article reports preliminary results of an investigation that aims to develop a knowledge management model in SMEs. The model identifies, allows to identify not only implementation processes, but also to identify the skills and abilities that must be used for the implementation, so it is important to identify the company's skills and establish training plans in the light of elements reskilling and upskilling. To arrive at these elements, a mixed methodology of a quasi-experimental nature is used, in a convenience sample, in such a way that it would allow a situational diagnosis of the company in relation to the competencies, abilities and organizational capacities, as well as the managerial skills to deal with knowledge management. The results and findings are preliminary since the investigation is ongoing, however, it allows identifying the elements that companies can consider for training processes.

Palabras clave: Desarrollo de competencias, gestión de conocimiento, upskilling, reskilling.

Keywords: Skills development, knowledge management, upskilling, reskilling.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han presenciado múltiples cambios relacionados con avances tecnológicos, impactos sociales y nuevos enfoques administrativos en competencias. Estos cambios han tenido un impacto significativo en las empresas, lo que las ha llevado a adaptarse a las nuevas condiciones. El siglo XXI se caracteriza por la generación de conocimiento, y en este contexto, la gestión del conocimiento se vuelve esencial para responder a la dinámica empresarial.

"La gestión del conocimiento es una transformación en la percepción de lo que son las empresas" (Arboníes, 2006), lo que impulsa a las empresas a ajustarse a las nuevas condiciones estableciendo modelos que faciliten la transferencia de conocimiento de manera práctica. La implementación de la gestión estratégica del conocimiento empresarial puede generar innovación, mayor rentabilidad y sostenibilidad del negocio.

La empresa y, en consecuencia, la actividad empresarial son dinámicas y generan oportunidades para el desarrollo y la competitividad. En este contexto, Córdova y Gutiérrez (2018) destacan la importancia de considerar los elementos que respaldan la gestión del conocimiento. Proponen un modelo que se basa en tres factores fundamentales: las personas, la organización y los sistemas de información. Estos factores contribuyen a la sostenibilidad de las ventajas competitivas de la empresa. Esto plantea un desafío para las empresas, ya que deben integrar estos elementos para gestionar el conocimiento de manera efectiva.

Es crucial reconocer que las personas son la fuente primaria de conocimiento, ya que este se arraiga en la acción individual, la experiencia, los ideales, valores y emociones que las personas adoptan (Nonaka, 1991; Nonaka y Takeuchi, 1995; Nonaka y Konno, 1998, citados en Martínez L. & Ruiz Mercader, 2002). En este sentido, es relevante que quienes forman parte de las empresas posean habilidades, competencias y comportamientos que les permitan adaptarse a los grandes cambios propuestos por la sociedad del conocimiento.

Arboníes (2006) sostiene que el cambio más notable que afecta a las empresas y su relación con los empleados es el que lleva a la empresa a reconsiderar la cadena de valor e incluso a establecer nuevos generadores de valor. Por lo tanto, la contribución individual es esencial en cualquier proceso que genere valor en

la organización. En este contexto, es importante reconocer que las personas adquieren nuevos conocimientos a través de la formación, el aprendizaje práctico, la reflexión, la simulación, la disciplina colectiva y la interacción social. La fase de internalización describe cómo el conocimiento explícito internalizado se convierte en una base para las rutinas y el conocimiento tácito mantenido individualmente (Nonaka & Konno, 1998).

Estas condiciones se aplican especialmente a las empresas medianas del sector servicios, ya que en sus actividades y procesos se manifiestan conocimientos tácitos e implícitos que respaldan su labor. Estos conocimientos se basan en el sentido común y la sabiduría en la gestión y administración de sus negocios. No obstante, es necesario fortalecer, actualizar o crear nuevos elementos de conocimiento para hacer frente a las demandas del siglo XXI. Esto se traduce en una oportunidad para formar, proyectar y reforzar competencias y habilidades en la gestión empresarial.

De acuerdo con un estudio del World Economic Forum (2018), para las empresas, las estrategias de reskilling (reentrenamiento) y upskilling (mejora de habilidades) serán fundamentales para encontrar el talento necesario y contribuir a enfoques socialmente responsables sobre el futuro del trabajo. Esto nos invita a abordar de manera práctica y holística la gestión de la renovación y mejora de habilidades, así como las transiciones laborales.

La implementación de una gestión efectiva del conocimiento en la organización implica llevar a cabo "actividades clásicas de capacitación y divulgación de información, así como, en menor medida, la creación de nuevo conocimiento, compartir el conocimiento existente o registrar el conocimiento relevante para el desarrollo de las competencias" (Bernal-Torres et al., 2016). Esto cobra especial relevancia porque los empleados que lideran la gestión del conocimiento aportan su capacidad intelectual. Por lo tanto, es esencial establecer las condiciones y características que fortalezcan sus habilidades y competencias.

En este sentido, Bernal-Torres et al. (2016) plantean que las empresas deben promover cambios en todos los aspectos de su actividad para desarrollar nuevas y mejores capacidades y competencias, y para abordar de manera creativa los diversos desafíos, incluso los inciertos. Esto es fundamental para gestionar eficazmente el conocimiento organizacional.

Estas condiciones permiten identificar las necesidades en la gestión del conocimiento de las empresas y, a través de este proceso, conocer, desarrollar y aplicar un modelo que pueda servir como referencia para empresas medianas. Este modelo se adapta a las condiciones específicas, partiendo de la medición de aspectos relacionados con competencias personales y organizacionales que permiten gestionar el conocimiento y la innovación. Además, se presta atención al comportamiento de los individuos y se identifican las condiciones adecuadas para su aplicación.

Considerando esto, las personas son la principal fuente de riqueza en una organización. Por lo tanto, su capacidad para generar valor en las empresas está estrechamente ligada a la capacitación de competencias y habilidades a través de programas de reskilling y upskilling, según corresponda. En algunos casos, es necesario establecer mecanismos efectivos de transferencia de conocimiento tácito. En línea con estos principios, la implementación de un modelo de gestión estratégica del conocimiento empresarial puede generar innovación, aumentar la rentabilidad y asegurar la sostenibilidad del negocio. Las condiciones descritas anteriormente nos llevan a plantear como base de esta investigación la siguiente pregunta: ¿Cómo se puede contribuir a la eficiencia organizacional mediante el desarrollo de un modelo de gestión del conocimiento que facilite la generación de innovación, el fortalecimiento de las competencias laborales y personales, y que promueva una mayor innovación y sostenibilidad empresarial?

El desafío actual para las empresas depende cada vez más de las nuevas tecnologías de información y comunicación, y las concepciones sobre los recursos humanos deben impulsar la expansión del conocimiento en todas las direcciones de la sociedad, tanto en países desarrollados como en países en vías de desarrollo (Pérez R. & Coutin D., 2005).

Este contexto requiere la creación de un proceso de transformación del conocimiento, lo que a su vez demanda un análisis de modelos que sean pertinentes y estén alineados con la creación de valor dentro de las organizaciones. La implementación de estos nuevos modelos contribuirá al crecimiento de la organización y al logro de sus objetivos específicos, lo que incluye el desarrollo de competencias y habilidades gerenciales. Esta implementación tiene el potencial de fortalecer significativamente a las empresas en las que se aplique.

En última instancia, se espera que estos modelos beneficien a las organizaciones y a las personas involucradas en este proceso.

Aprendizaje organizacional

En la actualidad, las empresas se encuentran inmersas en una dinámica que requiere la recopilación de información del entorno, su transformación y posterior transferencia para su utilización por parte del personal de la organización. Dentro de esta dinámica de aprendizaje, existen diversas formas de abordar dicho proceso. (Cegarra Navarro & Martínez Martínez, 2017) han identificado diversas formas de aprendizaje, que incluyen el aprendizaje basado en la acción, la experimentación, el aprendizaje fortuito y el aprendizaje comparativo, destacando que lo fundamental es que se produzca el aprendizaje. Además, el aprendizaje organizacional puede considerarse como un proceso continuo de adquisición de nuevos conocimientos a nivel individual, colectivo y organizacional, en el contexto de una organización (Panosso et al., 2018).

Peter Drucker (1995), citado en (Angulo R., 2016), destaca que en una sociedad donde el conocimiento es un recurso fundamental para el desarrollo, se necesita un tipo de persona capaz de aprender, transmitir su conocimiento y estar constantemente motivada para el cambio y la innovación en la organización. Las experiencias individuales de los empleados representan una contribución significativa al conocimiento de los equipos dentro de la organización, ya que se intercambian y actualizan los aprendizajes entre los miembros del equipo para luego ser codificados en la empresa (Sedighi et al., 2017).

Es crucial considerar que el aprendizaje organizacional es la capacidad de las organizaciones para mantener o mejorar su rendimiento basado en la experiencia (Kostova Karaboytcheva et al., 2015). Además, existe una relación estrecha entre el aprendizaje organizacional y la cultura y el clima organizacional (Rivera-Porras, 2019). Estos conceptos se basan en la propuesta de (Gutiérrez-Cuevas, 2005), quien sostiene que el aprendizaje tiene dos dimensiones: es un proceso constructivo que se desarrolla a medida que ocurre y, al mismo tiempo, es un proceso social que depende de las interacciones con otros, ya sea a distancia o en persona. Esto implica que el aprendizaje y, por lo tanto, la gestión del conocimiento no son eventos aislados de la dirección de la empresa, sino que requieren una variedad de elementos.

Para configurar el proceso de aprendizaje y los modelos o políticas de gestión del conocimiento, es fundamental reconocer que este proceso de aprendizaje dentro de la empresa depende de múltiples factores. (Jiménez & Palta, 2011) hacen referencia al modelo de KPMG Consulting y señalan que dentro de una organización, existen elementos interdependientes que afectan el aprendizaje, como la cultura organizacional, la estructura de la organización, la actitud y motivación de los colaboradores, y su capacidad para trabajar en equipo. Estos factores juegan un papel clave en la promoción del aprendizaje efectivo y la gestión del conocimiento dentro de la organización.

Conocimiento

El conocimiento desempeña un papel fundamental en la construcción del contexto social. A lo largo de esta construcción, el acto de compartir historias, inicialmente a través de la oralidad y más tarde mediante la escritura, ha sido esencial. Este proceso ha estado guiado por la necesidad de desarrollar metodologías que faciliten la transferencia de conocimiento. En el pasado, la relación entre maestro y aprendiz era el principal medio para la transmisión de información y la creación de nuevo conocimiento. Hoy en día, esta idea se refuerza en la perspectiva presentada por Abellon G. et al. (1998), quienes afirman que la única fuente de conocimiento es la experiencia y que el único sujeto capaz de conocer es el ser humano. En este contexto, es esencial examinar a aquellas personas que, en el entorno organizacional, son las guardianas del conocimiento y maximizar su potencial.

El concepto de conocimiento ha estado intrínsecamente relacionado con la definición de la gestión del conocimiento. Por lo tanto, es relevante explorar las diferentes definiciones de gestión del conocimiento. De acuerdo con Tabla 1:

Tabla 1.
Definición de conocimiento

AUTOR	CONCEPTO
Ives et al., (1997)	En el último sentido, la gestión del conocimiento generalmente puede verse como el trabajo, las personas, el tiempo, y la forma que la organización necesitan el conocimiento.
Davenport y Prusak (1998)	La gestión del conocimiento se refiere a las acciones que realiza la organización con el fin de obtener el máximo valor del conocimiento disponible.
Bair y O'Connor (1998)	La tecnología de gestión del conocimiento es la integración de una serie de productos de software, incluida la recuperación de información, el trabajo en grupo y la gestión de documentos.
Saint-Onge (2000)	Es la capacidad de desarrollar, mantener, influir y actualizar activos intangibles denominados capital de conocimiento o capital de conocimiento.
Ortiz de Urbina, (2000).	La gestión del conocimiento se define como un conjunto de procesos que utilizan el conocimiento para identificar y utilizar los activos intangibles existentes y generar nuevos activos.
Rosenberg (2006)	La gestión del conocimiento es el establecimiento y archivo de información, experiencia y conocimiento valiosos dentro y entre comunidades de personas y organizaciones con intereses y necesidades similares, y su propósito es crear una ventaja competitiva.
Borroto (2007).	La gestión del conocimiento puede describirse como el proceso sistemático de organizar a los participantes para que detecten, seleccionen, organicen, filtren, presenten y utilicen información con el fin de desarrollar recursos de conocimiento basados en el propio capital intelectual de la organización, con el objetivo de mejorar las habilidades organizativas y crear valor.

Minakata (2009).	Desde el momento en que los empleados expresan claramente su conocimiento a la organización, el conocimiento se convierte en un activo de capital humano y se hace posible a través de la infraestructura y los intermediarios de comunicación, de modo que el conocimiento generado sea significativo para la empresa.
Cabrera y Sugey (2012)	La gestión del conocimiento es un proceso estratégico, guiado y operado por la disciplina y las habilidades, que promueve ventajosamente la realización de los objetivos establecidos. La gestión del conocimiento ayuda a la toma de decisiones, aumentando así la viabilidad y durabilidad de la organización, y generando ventajas competitivas. Para lograrlo, la información y el conocimiento deben estar disponibles y accesibles para los miembros de la organización

Fuente: Adaptado de (Villasana Arreguín et al., 2021)

Muchos de los elementos considerados como claves en estos procesos de gestión del conocimiento tienen como base fundamental al ser humano y, por ende, a las concepciones personales que les son propias. En consecuencia, los componentes relacionados con el conocimiento se basan coincidentemente en la experiencia, las vivencias y en lo que saben los individuos. En tal sentido, este conocimiento puede ser utilizado a nivel individual, grupal e incluso social, y transferido en función del desarrollo mental y las capacidades inherentes a la personalidad (González Millán et al., 2014).

Competencias y habilidades personales

El conocimiento es creado y mantenido por individuos, y los procesos de creación y transferencia de conocimiento son esenciales para el desarrollo del conocimiento organizacional como un activo estratégico y una fuente de ventaja competitiva (Grant, 1996; Von Krogh, Nonaka, & Aben, 2001, citados por Panizzon et al., 2015). Además, en este proceso de gestión del conocimiento, es imprescindible considerar la importancia de las competencias individuales, entendidas como "un rango de cualidades y capacidades que son consideradas cada vez más importantes para la educación superior" (Hager, Holland, &

Beckett, 2002, citados en Angulo R., 2016). Por lo tanto, resulta fundamental tomar en cuenta la participación activa de las personas en la gestión del conocimiento.

De acuerdo con Etienne Wenger, existen elementos que respaldan la importancia de las personas en la gestión del conocimiento, a saber: (a) los seres humanos son seres sociales, (b) el conocimiento es una cuestión de competencia, (c) el acto de conocer está vinculado a la participación y (d) lo que aprendemos deriva, en consecuencia, de construcciones colectivas de significado (Gutiérrez-Cuevas, 2005).

Swart y Kinnie (2003, citados en González Campo et al., 2016) afirman que el éxito en la gestión del conocimiento se logra a través de la ventaja competitiva generada por el capital humano. En este contexto, el autor propone una relación de los factores relacionados con la definición de las organizaciones intensivas en conocimiento, haciendo referencia a las características que deben poseer los trabajadores de dichas organizaciones. La Tabla 2 presenta estas características en orden cronológico según los autores, y se complementa con una propuesta de categorización que permite identificar los elementos que conforman las competencias en la gestión del conocimiento.

Tabla 2.
Características de los trabajadores en las organizaciones intensivas de conocimiento

AUTOR	Características de los trabajadores (OIC)	Categorización
Sveiby &Llouyd (1988)	Altas capacidades profesionales	Competencia
	Alto nivel de capacidad de gestión	Competencia
	Creatividad	Competencia
	Solución de problemas complejos	Competencia
	Poder derivado de la habilidad y reputación	Experiencia
Starbuck (1992-1993)	Expertos con educación formal	Experiencia
	Experiencia	Experiencia

Winch & Schneider (1993)	Creativos	Competencia
	Profesionales	Actitudinal
	Culturalmente resistentes a ser dirigidos	Actitudinal
Blackler (1995)	Alto desempeño conceptual	Competencia
	Habilidades cognitivas	Competencia
Robertson&Swan (1998)	Experiencias excepcional y poco común	Experiencia
	Altas habilidades cognitivas	Competencia
	Especialistas altamente cualificados	Experiencia
	Altamente educados	Formación
Nurmi (1998-1999)	Lealtad al grupo profesional	Competencia
	Contactos profesionales	Experiencia
	Alianzas y asociación con organizaciones	Experiencia
Alvesson (2001, 2004)	Altamente cualificados	Formación
	Gran recorrido en educación	Experiencia
	Alto estatus	Experiencia
Swart&Kinnie (2003)	Altamente calificados	Experiencia
	Bien educados	Formación
	Empleados cualificados	Formación
	Creativos	Competencia
	Innovadores	Competencia
Ditillo (2004)	Fuerza de trabajo profesional	Experiencia
	Expertos	Experiencia
	Especialistas	Experiencia
Ichijo&Nonaka (2007)	Altamente talentosos	Experiencia
	Motivados	Competencia
	Profesionales	Competencia
	Mentalidad independiente	Competencia
Benbya (2008)	Bien educados	Formación
	Altamente cualificados	Formación

Greenwood (2009)	Autocontrolados	Competencia
	Autoevaluados	Competencia

Fuente: Adaptada de (González Campo et al., 2016).

Identificar estas características se convierte en una alternativa para las decisiones de formación y capacitación en habilidades que las organizaciones deben abordar para hacer frente a los desafíos que implica la gestión del conocimiento.

Reskilling y upskilling

El concepto se propone como una alternativa en el enfoque de las empresas para los procesos de formación, con el objetivo de establecer acciones que permitan a las organizaciones encontrar estrategias para gestionar adecuadamente el conocimiento.

Según Sivalingam y Mansori (2020), se puede entender el reskilling como la actualización orientada a adquirir conjuntos de habilidades completamente nuevos que llevarán a individuos a nuevas posiciones en sus carreras, mientras que el upskilling se refiere a la adquisición de nuevas habilidades que mejorarán su posición actual.

Esta condición se convierte de alguna manera en una necesidad, tanto para las personas como para las empresas. Es así como todo individuo, sin importar su edad, en algún momento tendrá que dedicar tiempo a la reskilling (aprender nuevas habilidades para un nuevo puesto) o upskilling (profundizar en las habilidades actuales). Cada ocupación concebible estará sujeta a la necesidad de aprender nuevas tecnologías y a adaptarse a nuevas relaciones interpersonales en un panorama económico en constante cambio.

En el contexto de las empresas actuales, esta necesidad se convierte en una alternativa para afrontar los desafíos tecnológicos y las condiciones establecidas en las organizaciones para la gestión del conocimiento. Según Li (2022), la Industria 4.0 está revolucionando los procesos de fabricación y tiene un impacto significativo en la globalización al modificar la fuerza laboral y aumentar el acceso a nuevas habilidades y conocimientos. El Foro

Económico Mundial estima que para 2025, el 50 % de todos los empleados necesitará capacitación adicional debido a la adopción de nuevas tecnologías.

2. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico propuesto se basa en un enfoque cuantitativo con una muestra de conveniencia. En este enfoque, se realiza un diagnóstico situacional de la empresa en relación a las competencias, habilidades y capacidades organizacionales, así como las habilidades gerenciales necesarias para abordar la gestión del conocimiento.

De acuerdo a Rodríguez Jiménez y Pérez Jacinto (2017), el enfoque cuantitativo busca poner en contacto objetos y fenómenos reales, proporcionando pistas para formular hipótesis y datos para la construcción de conocimientos que conducen a la verificación de las hipótesis formuladas. Para lograr esto, se elabora un instrumento de diagnóstico que facilita la recopilación de datos sobre la situación actual de las competencias y habilidades profesionales, y se formula una propuesta de formación para las empresas del sector de servicios objeto de estudio.

Este enfoque permite establecer una lista de verificación basada en una serie de preguntas que validan el cumplimiento de las actividades o programas de formación en competencias, con el fin de fortalecer las estrategias de Upskilling y Reskilling en el futuro. El diagnóstico se realiza utilizando un modelo propio desarrollado por los investigadores, que puede adaptarse y aplicarse a las empresas objeto de estudio.

3. RESULTADOS

En la aplicación del instrumento, se identificaron elementos que apuntan a la implementación de programas de formación. Dado que la investigación está en curso, se presentan algunos hallazgos preliminares.

De las empresas entrevistadas, se encontró que el 24% son grandes, mientras que el resto se distribuye entre pequeñas, micro y medianas empresas, con un 44%, 4% y 28% respectivamente. Esto permite identificar que los resultados esperados se aplican en todas las empresas.

Figura 1.

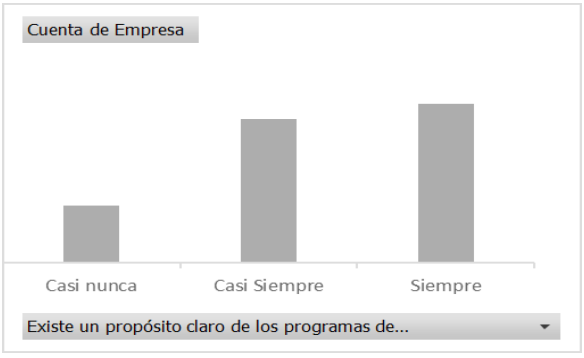
Se fomenta la formación a largo plazo

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 1, se observó que la formación a largo plazo, como elemento fundamental del aprendizaje organizacional, se promueve siempre o casi siempre en el 88% de los casos. Esto determina la posibilidad de continuar fortaleciendo el aprendizaje y el conocimiento dentro de la organización.

Figura 2.

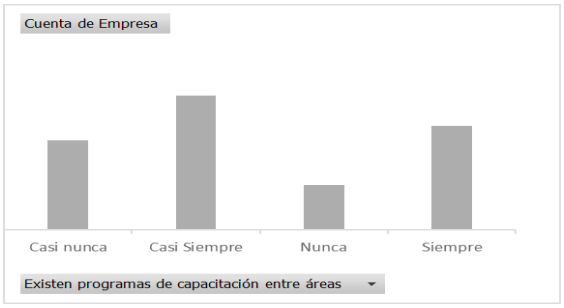
Propósito de los programas de formación



Fuente: Elaboración propia.

Para las empresas, es de vital importancia comprender los propósitos de los programas de formación. De esta manera, se maximiza el impacto y se pueden establecer programas que tengan como objetivo fortalecer el conocimiento.

Figura 3.
Programas de formación entre áreas

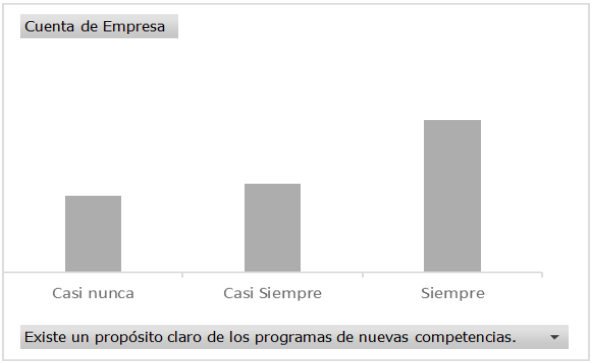


Fuente: Elaboración propia.

Promover la formación entre áreas (Figura 3) fomenta la generación de nuevo conocimiento que beneficia a las empresas. De esta manera, se establecen acciones que fortalecen las operaciones internas y permiten la conexión de procesos de mejora.

Es fundamental considerar que los programas de formación forman parte de las decisiones estratégicas de las empresas, sirviendo como un elemento diferenciador que apunta hacia su futuro y les permite satisfacer las demandas de un entorno en constante cambio.

Figura 4.
Propósito de los programas de nuevas competencias



Fuente: Elaboración propia.

Es fundamental para las empresas contar con objetivos bien definidos en los programas de formación. Esto facilita la determinación de las competencias que se abordan en el proceso de formación.

4. DISCUSIÓN

La discusión permite enfatizar que la gestión del conocimiento no es un privilegio o una necesidad estratégica exclusiva de las grandes empresas; es una condición esencial para todas, sin importar su tamaño. Encontrar la trazabilidad en los procesos de formación, desde la definición de los programas hasta la determinación de los propósitos para el desarrollo de nuevas competencias.

La gestión del conocimiento requiere un marco general tanto para las empresas como para aquellos encargados de procesos estratégicos. Por lo tanto, es crucial contar con actividades que fortalezcan el día a día en las empresas. La estrategia para promover empresas orientadas al desarrollo del conocimiento va más allá de los programas de formación; implica también la implementación de una estrategia de gestión del cambio que debe estar alineada con una estrategia cultural adecuada que se manifieste en la vida cotidiana.

La gestión del conocimiento implica la eficaz administración de los flujos de conocimiento dentro de la organización, garantizando su acceso y reutilización constantes, lo que fomenta la innovación (Angulo R., 2016). Este proceso depende de la aplicación práctica de modelos orientados a la gestión del conocimiento.

5. CONCLUSIONES

El modelo de desarrollo del conocimiento permite identificar los componentes formativos, culturales, tecnológicos y estructurales de la organización, lo que facilita la conciliación de las áreas empresariales.

El conocimiento es inherente al ser humano, y no puede definirse únicamente como una estructura; por lo tanto, promover la gestión del conocimiento implica desarrollar las competencias de las personas para que puedan llevar a cabo acciones que fortalezcan la organización.

La gestión del conocimiento no tiene un punto final; una vez que las empresas inician este proceso, se convierte en una constante en todos los niveles, lo que contribuye a mantener los elementos y características que hacen a la empresa competitiva.

El entorno está en constante cambio y evolución. Por lo tanto, se requieren constantes aprendizajes para aquellos encargados de los procesos estratégicos de la empresa, con el fin de cumplir los objetivos organizacionales. Por lo tanto, abordar estrategias de reskilling y upskilling dentro de las empresas se convierte en una estrategia que fortalece el funcionamiento diario de las organizaciones.

6. REFERENCIAS

Abellon G., O., Rojo, T., Von Gizycki, R., Ulrici, W., & Petrella, R. (1998). *Los Trabajadores del conocimiento*. Fundación Universidad-Empresa.

Angulo R., R. (2016). Gestión del conocimiento y aprendizaje organizacional: Una visión integral4. *Informes Psicológicos*, 18.

Arboníes, Á. L. (2006). *Conocimiento para innovar: Cómo evitar la miopía en la gestión de conocimiento*. Ediciones Díaz de Santos. http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3173500

Bernal-Torres, C. A., Aguilera, C. I., Henao-Cálad, M., & Frost, J. S. (2016). Gestión del conocimiento y actividad empresarial en Colombia. *Revista de Ciencias Sociales*, *22*(1). https://doi.org/10.31876/rcs.v22i1.24901

Cegarra Navarro, J. G., & Martínez Martínez, A. (2017). *Gestión del conocimiento: Una ventaja competitiva*. ESIC.

Córdova, F. M., & Gutiérrez, F. A. (2018). Knowledge Management System in Service Companies. *Procedia Computer Science*, *139*, 392-400. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.275

González Campo, C. H., García Solarte, M., & Murillo Vargas, G. (2016). *Gestión de organizaciones intensivas en conocimiento*.

González Millán, J. J., Rodríguez Díaz, M. T., & González Millán, O. U. (2014). *Análisis comparativo de los modelos de gestión del conocimiento aplicados a la empresa*. *13*, 17.

Gutiérrez-Cuevas, C. (2005). *Gestión del conocimiento en la práctica*. Knowledge Management Center.

Jiménez, D. A. D., & Palta, A. M. Z. (2011). *Implementación de un modelo de gestión del concimiento para empreszas de servicios*. 65.

Kostova Karaboytcheva, M., Celemín P., M. S., Andrada, L. R., & Rodríguez A.ntón, J. M. (2015).I*nfluencia de los procesos de aprendizaje socio psicológicos y de creación de conocimiento en el rendimiento organizacional. un estudio empírico en el sector hotelero valenciano*. 29.

Li, L. (2022). Reskilling and Upskilling the Future-ready Workforce for Industry 4.0 and Beyond. *Information Systems Frontiers*. https://doi.org/10.1007/s10796-022-10308-y

Martínez L., I., & Ruiz Mercader, J. (2002). *Los procesos de creación del conocimiento: el aprendizaje y la espiral de conversión del conocimiento*. 16.

Nonaka, I., & Konno, N. (1998). The Concept of "Ba": Building a Foundation for Knowledge Creation. *California Management Review*, *40*(3), 40-54. https://doi.org/10.2307/41165942

Panizzon, M., Milan, G. S., Perin, M. G., & Sampaio, C. H. (2015). Capacidades dinâmicas baseadas em conhecimento e tipos de inovação: proposição de um framework de análise. *Review of Administration and Innovation - RAI*, *12*(1), 271. https://doi.org/10.11606/rai.v12i1.100325

Panosso, O., Larentis, F., Antonello, C. S., Fachinelli, A. C., & Camargo, M. E. (2018). Processos de Aprendizagem Organizacional e Indicadores de Desempenho: Estudo com Gestores Empresariais. *Revista de Negócios*, *22*(4), 19. https://doi.org/10.7867/1980-4431.2017v22n4p19-39

Pérez R., L. Y., & Coutin D., A. (2005). *La gestión del conocimiento: Un nuevo enfoque en la gestión empresarial*. *13*(6), 74.

Rivera-Porras, D. (2019). Aproximaciones conceptuales del aprendizaje organizacional. *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, 23-29. https://doi.org/10.15649/2346030X.496

Rodríguez Jiménez, A., & Pérez Jacinto, A. O. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, *82*, 175-195. https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647

Sedighi, M., Lukosch, S., van Splunter, S., Brazier, F. M. T., Hamedi, M., & van Beers, C. (2017). Employees' participation in electronic networks of practice within a corporate group: Perceived benefits and costs. *Knowledge Management Research & Practice*, *15*(3), 460-470. https://doi.org/10.1057/s41275-017-0059-5

Sivalingam, A. D., & Mansori, S. (2020). *How Organizations Should View Reskilling and Upskilling The Workforce*. 2.

Villasana Arreguín, L. M., Hernández García, P., & Ramírez Flores, É. R. F. (2021). La gestión del conocimiento, pasado, presente y futuro. Una revisión de la literatura. *TRASCENDER, CONTABILIDAD Y GESTIÓN*, *18*, 53-78. https://doi.org/10.36791/tcg.v0i18.128

World Economic Forum. (2018). *WEF_FOW_Reskilling_Revolution* (REF 220118; p. 42). World Economic Forum. https://www3.weforum.org/docs/WEF_FOW_Reskilling_Revolution.pdf

CAPÍTULO 2

EL FACTOR HUMANO Y HERRAMIENTAS PARA LA MITIGACIÓN DE ACCIDENTES EN EL SECTOR AERONÁUTICO

Yeison Manuel Montoya Lemus
https://orcid.org/0000-0002-3068-2335
ymontoya@usbbog.edu.co

Mauricio Ramírez Penagos
https://orcid.org/0000-0002-3434-0199
mauricioramirez202@gmail.com

Universidad de San Buenaventura

Resumen

La industria aeronáutica se ha caracterizado por ser un modelo de crecimiento tecnológico que utiliza diversas herramientas para ser uno de los sectores más seguros en su operación. El objetivo del presente estudio es realizar una revisión de conceptos acerca del factor humano como elemento que requiere de una intervención continua en las actividades ligadas al sector aeronáutico, dado que es este último uno de los eslabones de mayor fragilidad. Este es un ambiente en crecimiento donde diversas ciencias se unen para optimizar sus esfuerzos y conocer la dimensión humana en niveles metacognitivos, de comunicación asertiva, toma de decisiones y resolución de conflictos. Finalmente se muestra la estadística de una aplicación práctica en donde se lleva a cabo la implementación de herramientas para la supervisión de personal aeronáutico.

Palabras Clave: Aeronáutica, accidente, aviación, factores, humanos, metodología.

Abstract – The aeronautical industry has been featured as a model of technological growth that uses diverse tools to be one of the safest sectors in its operation. The objective of this study is to review concepts about the human factor as an element that requires continuous intervention in activities linked to the aeronautical sector, the last mentioned is one of the most fragile. This is a growing environment where various sciences come together to optimize their efforts and learn about the human dimension at metacognitive levels, assertive communication, decision making and conflict resolution. Finally, the statistics of a practical application where the implementation of tools for the supervision of aeronautical personnel are shown.

Keywords: Aeronautical, accident, aviation, human, factors, methodology.

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades aéreas se consideran unas de las más riesgosas y, al mismo tiempo, más rentables en todo el mundo (Borenstein, 2011). Debido a la geografía, las condiciones climáticas y la biodiversidad, los profesionales que

trabajan en la aviación deben poseer competencias altamente valoradas para enfrentar los desafíos de la industrialización aérea (Strong & Jaramillo, 2014). En este contexto, este apartado tiene como objetivo revisar los conceptos más relevantes y actualizados para la aplicación práctica de herramientas destinadas a mitigar los errores humanos en la industria aeronáutica. Esto implica identificar los factores de riesgo relacionados tanto con el personal operativo de la aviación, como pilotos, copilotos *y personal técnico, inspectores, controladores aéreos y auxiliares de vuelo,* para establecer pautas que permitan mitigar los aspectos que ponen en peligro la vida y los estándares de seguridad operativa aceptables.

De acuerdo con varios estudios realizados por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC, 2022), el organismo regulador de la aviación en Colombia, y en consonancia con el Sistema Integrador de Reportes e Información de Seguridad Operacional (IRIS), se han identificado tres accidentes y cuatro incidentes relacionados con deficiencias en el conocimiento y la comprensión de conceptos vinculados a los factores humanos como determinantes de la seguridad aérea. En busca de mejorar los índices de calidad y seguridad en todos los procedimientos de la industria aeronáutica, se han fortalecido las habilidades y destrezas relacionadas con el desempeño individual. En este contexto, el factor humano y las herramientas para supervisar su comportamiento desempeñan un papel crucial para mantener un equilibrio y garantizar la eficiencia de los operadores y mantenedores de esta industria.

2. METODOLOGÍA

Este apartado tiene como objetivo proporcionar una revisión del estado actual de los conceptos y metodologías más relevantes en la gestión de los factores humanos en las actividades de mantenimiento y operación en la aviación. Se destacarán especialmente las prácticas más utilizadas en la aviación comercial y estatal de Colombia.

Conceptos como el "Error Humano" en las tripulaciones y la "Conciencia Situacional Deficiente" son ejemplos de violaciones u omisiones en la toma de decisiones que se derivan de errores en la ejecución de procedimientos.

Eventos de estrés, fatiga acumulada y desorientación espacial son algunos de los factores que más contribuyen a prácticas deficientes en la aviación (Caldwell et al., 2009). Las actividades aéreas en Colombia, que se han convertido en un factor importante para el desarrollo económico del sector privado, han logrado avances significativos que han sido adoptados por la aviación estatal, en particular por las Fuerzas Militares y la policía. Esto se traduce en una mayor eficacia y flexibilidad en la preservación de la seguridad y la mitigación de riesgos futuros (Paredes, 2011).

El concepto de "Factores Humanos" (FF.HH.) en la aviación se introdujo después de la identificación de las causas de un desastre aéreo que ocurrió el 27 de marzo de 1977 en el aeropuerto de Los Rodeos, en el norte de la isla española de Tenerife. En este evento trágico murieron 583 personas como resultado de la colisión de dos aviones Boeing 747. Esta tragedia reveló un fenómeno conductual que ha sido objeto de estudio a lo largo de los años. Además, el concepto ha sido descrito de manera similar por Marshall (2010).

En la actualidad, existen dos modelos de análisis en lo que respecta a los Factores Humanos en la aviación. Uno de los estándares más representativos en esta área es el "Modelo SHELL". Esta herramienta se basa en un acrónimo que describe sus componentes:

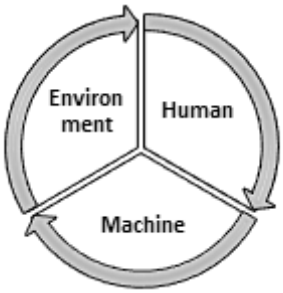
- *Software*: Se refiere a los procesos y procedimientos que las personas utilizan para llevar a cabo sus tareas (reglamentación, manuales, procedimientos, listas de chequeo, sistemas de señalización, entre otros).
- *Hardware:* Incluye los dispositivos físicos, herramientas y equipos utilizados en la operación (equipos, herramientas y maquinarias).
- *Environment:* Considera el entorno físico y las condiciones en las que se realiza el trabajo. Asimismo, este concepto estudia todos aquellos riesgos asociados a mantener las condiciones de higiene industrial (Reason J., 2000).
- El *Liveware:* Hace referencia a los seres humanos, es decir, a quienes interactúan con el sistema y su entorno. También describe al individuo de manera intrapersonal, para generar la capacidad de reconocer sus debilidades, sus fortalezas y sus opciones de mejora continua.

Figura 1.
Modelo SHELL

Fuente: Elaboración propia a partir de modelo SHELL.

Una integración adecuada entre los elementos (Software, Hardware, Liveware, Environment) según el modelo SHELL mitigarían potencialmente los impactos del error humano en tripulaciones y personal de mantenimiento de las organizaciones de aviación. La Figura 2 muestra la relación entre el medio ambiente, las máquinas y los humanos dentro del círculo con el fin de ilustrar cómo se debe retroalimentar cada elemento continuamente.

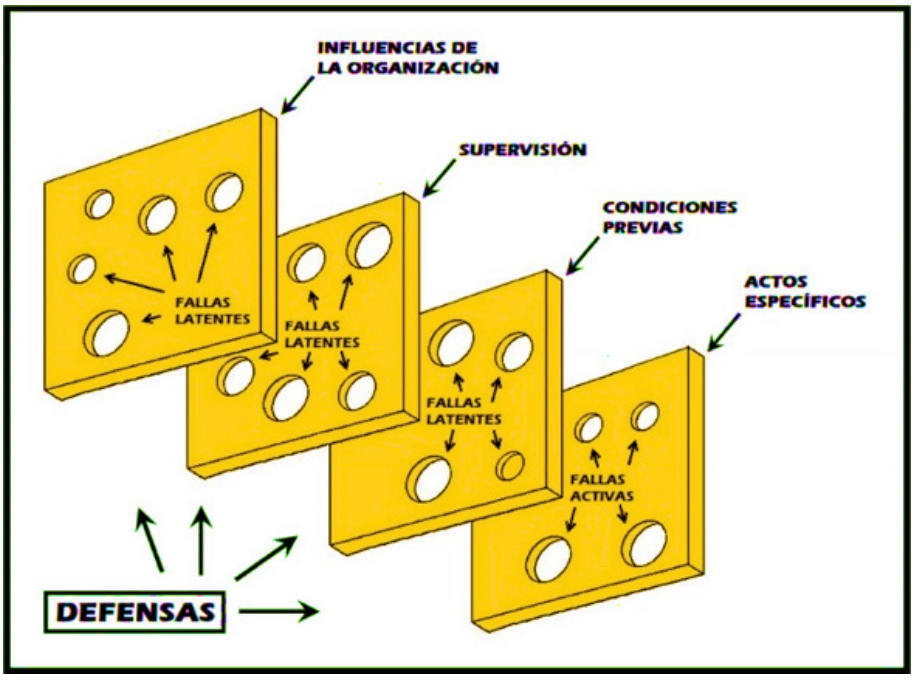
Figura 2.
Environment, Human & Machine Sinergia



Fuente: Elaboración propia

El *Modelo Reason* ha tenido una gran influencia en la comprensión de las causas de la accidentalidad aérea. Según Reason (2005), la causa raíz de los accidentes aéreos puede derivarse del factor humano y es influenciada por las organizaciones. Por ejemplo, la falta de supervisión adecuada y las condiciones que contribuyen a fallas latentes y activas pueden desencadenar actos específicos que resultan en accidentes. El concepto de "Causa Raíz" se utiliza para identificar el punto de inicio de un evento que culmina en un accidente. Para comprender, gestionar y mitigar estos elementos, la ingeniería y la psicología han trabajado juntas para crear herramientas de gran valor (Cooke y Durso, 2007). La Figura 3 ilustra cómo múltiples capas de defensa pueden combinarse para mitigar eficazmente los riesgos. Aunque cada capa tiene sus propias deficiencias o debilidades, cuando se apilan de manera adecuada, rara vez se alinean los defectos, lo que resulta en una reducción significativa de los riesgos.

Figura 3.
Modelo Reason



Fuente: Elaboración propia a partir de Modelo Reason.

El modelo Reason, también conocido como el modelo del *Efecto Acumulativo*, ha sido influyente en la comprensión de la accidentalidad aérea. Según Castillo (2010), la accidentalidad en el sector aeronáutico se ha reducido en un cuarto en las últimas dos décadas y se analiza desde dos enfoques. El primero se centra en la persona y aborda causas relacionadas con el error humano, violaciones, omisiones o la falta de entrenamiento y capacitación de los profesionales que realizan actividades aeronáuticas. El segundo enfoque se centra en el sistema y considera factores vinculados a la industria aérea en sí misma, como la sobrecarga de trabajo, deficiencias en las políticas de calidad, problemas en los procesos de producción y presiones gerenciales, entre otros. Los Factores Humanos (FF.HH.) incorporan conceptos y conocimientos de diversas disciplinas, todas orientadas al sector de la aviación (De Hart, 2007). Esta herramienta en constante evolución se ha centrado en la salud mental y emocional de quienes trabajan en la industria aérea.

En consecuencia, las Ciencias Tradicionales han evolucionado para intervenir en la adaptación del sector aéreo. Disciplinas como la medicina, la psicología, la seguridad y la salud en el trabajo, la ergonomía, entre otras, han contribuido a estas transformaciones.

Figura 4.
Transformaciones de las ciencias naturales básicas entorno a los FF.HH

Fuente: Elaboración propia.

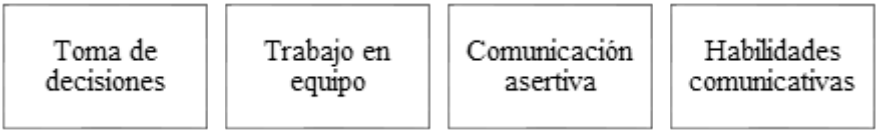
Seguridad Operacional y Cultura Aeronáutica

La seguridad operacional se ha convertido en uno de los aspectos más relevantes en la industria aeronáutica, estableciendo parámetros de investigación y estadísticas para determinar las causas de los accidentes y buscando métodos que identifiquen los factores de riesgo (Glendon, 2006). La Administración eficiente de una organización con el fin de reducir progresivamente los accidentes es una de las directrices de la *International Civil Aviation Organization* (ICAO).

La seguridad operacional, como herramienta de gestión de riesgos en la industria aeronáutica, ha experimentado transformaciones continuas con el objetivo de mejorar los procedimientos, los cuales son liderados por individuos (Li y Harris, 2006) para reducir las probabilidades de accidentes. Durante la época técnica, que abarcó desde principios de 1900 hasta finales de la década de 1960, las deficiencias se atribuían principalmente a factores técnicos y tecnológicos. Los errores en el diseño de aeronaves y el software defectuoso se mejoraron significativamente en la década de 1950, lo que condujo a una reducción considerable de la frecuencia de accidentes. Los conceptos de seguridad operacional comenzaron a incluir el cumplimiento de regulaciones y la supervisión de las autoridades internacionales.

Desde la década de 1970 hasta principios de la década de 1990, se considera la era de los Factores Humanos. La aviación se consolidó como el medio de transporte más seguro, y la percepción de la seguridad operacional se expandió para incluir situaciones relacionadas con el factor humano (interacción hombre-máquina), como se analiza en el modelo SHELL. En esta fase, el desempeño humano siguió siendo un factor determinante en los accidentes aéreos. Algunos de estos factores se ilustran en la Figura 5.

Figura 5.
Factores determinantes para evitar accidentes

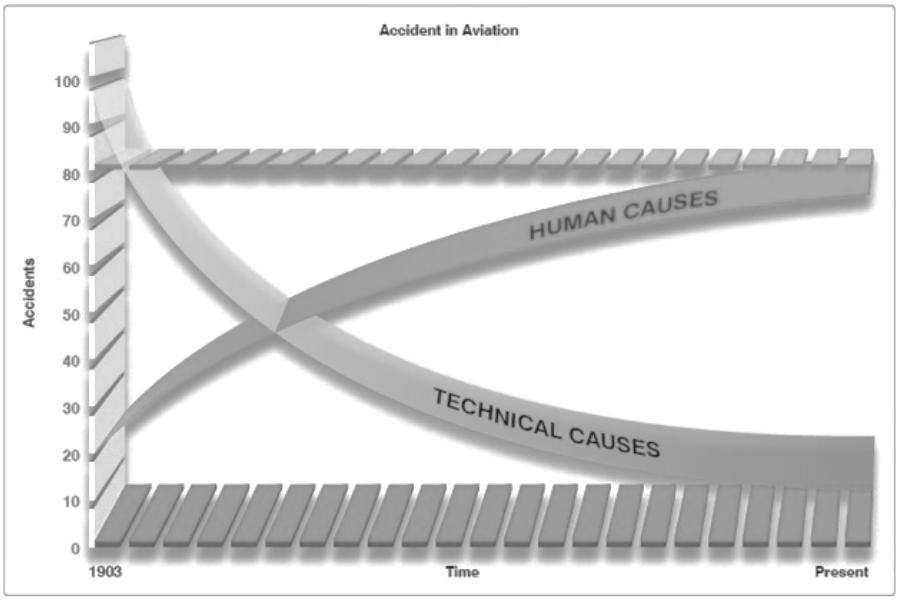


Fuente: Elaboración propia.

La aplicación de conceptos relacionados con los factores humanos no debe centrarse únicamente en el individuo, ya que es necesario considerar los aspectos operacionales e institucionales del entorno. Fue solo a principios de los años 90 cuando se reconoció por primera vez que las personas operan en un entorno dinámico y fluctuante que puede influir en su comportamiento y conducta. Desde 1990 hasta la actualidad, se ha denominado la "Época Institucional", en la que la seguridad operacional comenzó a entenderse desde una perspectiva sistémica.

Actualmente, la Administración Federal de Aviación (FAA) ilustra una relación entre las causas humanas y técnicas que muestra que aproximadamente el 80% de la estadística de accidentes está relacionado con acciones humanas que desencadenan estos incidentes.

Figura 6.
Curva típica de accidentes en aviación



Estadística gráfica mostrando que el 80% de los accidentes de aviación son causados por FACTORES HUMANOS.
Fuente: FAA Aviation Maintenance Technician Handbook - General

Fuente: Adaptado a partir Factores Humanos – FAA (2022).

Por esta razón, la cultura de la Seguridad Operacional en el contexto aeronáutico se ha convertido en una herramienta invaluable para integrar estrategias corporativas, técnicas y humanas con el fin de fortalecer las medidas de prevención y gestión de riesgos (Dekker, 2004).

Este enfoque ha dado lugar a un fenómeno conocido como la "Era del Accidente Corporativo", que se centra en el impacto de la cultura y las políticas corporativas en la adecuada identificación de riesgos aeronáuticos. Esto es crucial para que sea internalizado de manera imperativa por aquellos que lideran la industria aérea a nivel global (Maurino, 1999). Al llevar a cabo un plan anual de Gestión de la Seguridad Operacional, se pueden incorporar aspectos que fomenten la cultura de la seguridad, mejoren el comportamiento seguro (Inglis, 2007) y refuercen la cultura de la notificación como una estrategia de mejora, en lugar de una táctica para señalar a los operadores o personal de mantenimiento (Tourón et al., 2019).

- Safety Investigation (SI)
- Safety Action Group (SAG)
- Human Factor Analysis (HFA)
- Health and Safety (HAS)
- Aviation Medicine (AVM)
- Environmental Management (EM)

En la actualidad, se encuentra disponible el Manual de Gestión de la Seguridad Operacional (SMM en inglés), conocido en Colombia como el Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional (SMS) bajo el documento 9859 - AN/474. Este sistema tiene como objetivo proporcionar a la autoridad aeronáutica de un estado una guía para la implementación y desarrollo de un programa de seguridad operacional que cumpla con la normativa vigente.

El concepto de seguridad operacional se concibe como un mecanismo de prevención, cuyo propósito es reducir la probabilidad de causar daño a las personas o a la infraestructura aeronáutica, manteniendo un nivel de seguridad aceptable. Este nivel aceptable de seguridad operacional es conocido como Nivel Aceptable de Seguridad Operacional (NASO).

Cultura Aeronáutica

El concepto de Cultura Aeronáutica ha evolucionado continuamente y se ha modelado a través de las tradiciones culturales. Este término se enfoca en el comportamiento y las actitudes y se considera intangible, estratégico e indispensable dentro de una organización (Wiegmann, 2004). La cultura aeronáutica tiene como objetivo dirigir esfuerzos colectivos hacia metas específicas (Núñez y Rodríguez, 2015).

En el sector aeronáutico, las metas son muy claras: prevenir daños a la salud y la integridad de los funcionarios aeronáuticos, así como evitar daños o pérdidas en la infraestructura aérea.

Cultura Organizacional

Desde una perspectiva corporativa, se define como la suma de experiencias significativas que los individuos han vivido dentro de una empresa (Falconer, 2006). Esta cultura incluye los principios compartidos que son imperativos para la corporación, los fundamentos de la organización y las metodologías de control utilizadas por la empresa para fomentar hábitos de comportamiento, es decir, cómo se llevan a cabo las actividades en la organización.

Gestión de Recursos de Tripulación – CRM

Hoy en día, la industria aeronáutica ha implementado una nueva herramienta dirigida a fortalecer las competencias interpersonales de los funcionarios que intervienen en toda la cadena logística y económica de la aviación mundial.

El CRM se define como el uso efectivo de todos los recursos disponibles que están estandarizados en el sector aéreo, lo que incluye equipos, procedimientos y personas, con el fin de lograr operaciones de vuelo seguras y eficaces (OACI, 1998, p. 2-2-1).

En una definición más reciente, Rathjen et al. (2008) lo describen como un entrenamiento formal diseñado para mejorar la coordinación de las tripulaciones, la comunicación y, por consiguiente, la seguridad en la aviación (Davis et al., p. 491).

El entrenamiento en la Gestión de Recursos de Tripulación (CRM, por su sigla en inglés) que, según Acuña C. (2013), también se aplica en otros entornos, como el submarino, ha arrojado excelentes resultados en la formación de las tripulaciones, de acuerdo con la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, 1998).

En un principio, se denominó Gestión de Recursos de Cabina (Cockpit Resources Management) al centrar sus esfuerzos en la capacitación y actualización de los pilotos. Sin embargo, rápidamente se identificaron brechas que no lograron reducir los riesgos asociados a esta población, según lo postulado por (Hispaviación, 2015).

Esto abrió las puertas para una intervención más amplia, lo que llevó a cambiar su nombre a Gestión de Recursos de Tripulación (Crew Resources Management).

Esta expansión implicó incluir a otros miembros de la tripulación y a otras personas relacionadas con toda la cadena de producción, con el fin de incorporar a todo el personal que tenga influencia en la operación aérea (Di Nocera, 2006).

Entrenamientos & Actualizaciones en CRM

Los entrenamientos y actualizaciones en CRM se basan en un análisis detallado de la accidentalidad que ha ocurrido en el período inmediatamente anterior, con el objetivo de identificar posibles causas relacionadas con el factor humano (FF.HH.). Estos tipos de entrenamientos se agrupan de la siguiente manera:

- Categorías Personales.
- Categorías Grupales.
- Categorías Organizacionales.

Esta perspectiva proporciona herramientas formativas con el fin de gestionar estos factores de riesgo a partir de ese momento. Por lo general, la instrucción la imparte personal certificado en temas de Manejo de Recursos Corporativos

(CRM) y Manejo de Recursos de Mantenimiento (MRM). Estos dos enfoques de formación y comunicación corporativa han tenido un impacto efectivo en las situaciones que han llevado a eventos pasados y han contribuido a evitar su repetición.

En la actualidad, las capacitaciones en CRM son requisitos obligatorios establecidos por las compañías aéreas para otorgar las respectivas licencias de vuelo. Esto se ha convertido en una estrategia que permite a las empresas contar con personal altamente capacitado en la identificación de factores de riesgo relacionados con el factor humano.

El desarrollo teórico de estas iniciativas de formación se ha centrado principalmente en la Psicología Social (Helmreich y Merritt, 1998; Helmreich et al., 2001), la toma de decisiones, la conciencia situacional, la comunicación asertiva, la gestión de la carga de trabajo, los eventos asociados al estrés, la acumulación de fatiga (Caldwell, 2009) y la resolución de conflictos, tanto en la cabina como fuera de ella. Estos son algunos de los temas que el CRM aborda con regularidad. Hein (2005) señala que durante las operaciones aeronáuticas, el personal involucrado en estas actividades se enfrenta a situaciones multifactoriales y complejas, que las empresas del sector deben aprender a identificar y gestionar adecuadamente.

I & II Generación del CRM

Según Covello A. (2005), el crecimiento de la seguridad y el desempeño de los pilotos han mejorado considerablemente con la implementación del Crew Resource Management (CRM). Al igual que la aviación mundial ha experimentado transformaciones y evoluciones a lo largo del tiempo, el CRM también ha evolucionado. La primera generación del CRM se originó en 1981 cuando la aerolínea United Airlines lanzó formalmente su programa de entrenamiento en "Cockpit Resource Management" (Administración de Recursos de Cabina), que estaba dirigido exclusivamente al personal de pilotos con acceso a los controles de vuelo. Esta primera generación surgió como respuesta a la percepción errónea de que la falta de atención y los errores de los pilotos eran las principales causas de los accidentes aéreos.

Posteriormente, surgió la segunda generación del CRM, que desarrolló programas centrados en la dinámica de equipo y llevó a un cambio en el nombre de "Cockpit Resource Management" a "Crew Resource Management" (Administración de Recursos de la Tripulación). Este nuevo enfoque incluyó de manera adecuada al personal de técnicos aeronáuticos, auxiliares de vuelo a bordo y personal técnico de mantenimiento en tierra. Esta ampliación fortaleció los equipos de trabajo y se centró en estrategias de briefing, conciencia situacional, manejo del estrés, además de agregar módulos sobre toma de decisiones y la prevención de errores en la cadena técnica y logística aeronáutica.

III Generación del CRM

La tercera generación del CRM se enfocó en la capacitación técnica, desarrollando habilidades y comportamientos para ayudar a los pilotos a trabajar de manera efectiva en operaciones reales. Se extendió su alcance a incluir al personal técnico de mantenimiento, auxiliares de vuelo y personal de logística (Caballero, Hederich y Johnson, 2010).

En la industria aeronáutica, tanto la alta dirección de la empresa como el personal directivo son eslabones de vital importancia en la toma de decisiones destinadas a reducir los factores de riesgo asociados al estrés laboral, la presión y la asignación de presupuestos para fortalecer la formación del personal bajo su supervisión. Todo esto se hace con el propósito de evitar lo que Rubio (2015) describe como la desnaturalización de la persona y su adaptación al estrés y las condiciones inseguras.

IV, V & VI Generación del CRM

La IV generación del CRM incorpora nuevos conceptos al Crew Resource Management y estandariza los Standard Operational Procedures (SOP).

La V generación del CRM se centra en la gestión del error humano (O'Connor, Hahn y Nullmeyer, 2010). Esta generación pone énfasis en identificar las deficiencias señaladas en las generaciones anteriores y se orienta a abordar, enfocar, gestionar y convivir con el error humano. Reconoce que el error humano es inevitable y una fuente continua de información para futuras proyecciones estadísticas en la reducción de los factores de riesgo.

Finalmente, se presenta la sexta generación del CRM, que acepta que el enfoque de la generación anterior en el error del piloto es adecuado, pero reconoce que estos errores no se limitan únicamente a la cabina y a quienes tienen acceso a los controles. También se deben considerar las amenazas a la seguridad que provienen del entorno laboral como parte de un sistema más amplio.

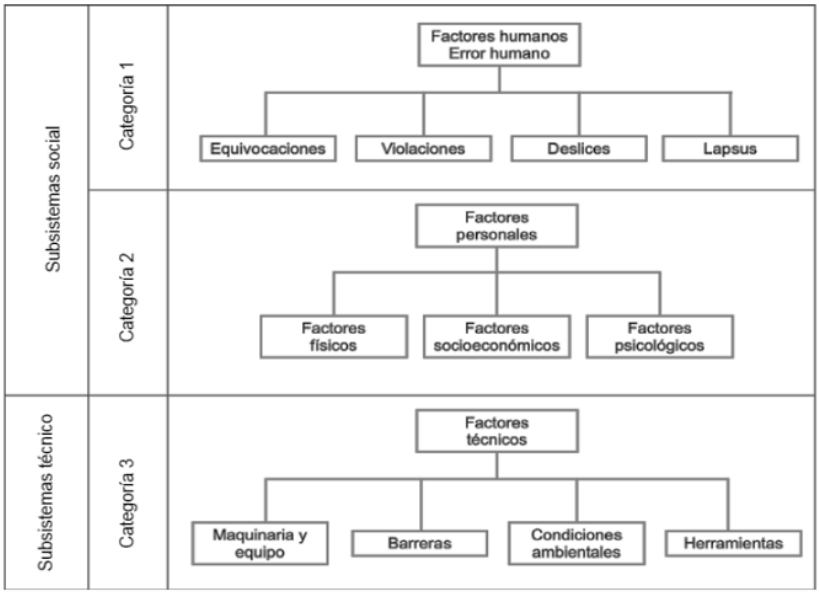
Hoy en día, el CRM se ha diseñado no solo para prevenir, detectar o mitigar el error, sino también para identificar amenazas sistemáticas a la seguridad, con el objetivo de garantizar la seguridad y confiabilidad de las operaciones aéreas (Osorio y Cárdenas, 2017; Tacca y Tacca, 2019; Macías, 2020).

Sistema de Clasificación y Análisis de Accidentes e Incidentes de Aviación – HFACS

En la actualidad y debido a las evoluciones sociales, las teorías relacionadas con los Factores Humanos en la aviación han experimentado sus últimas actualizaciones. Es importante destacar el modelo del Sistema de *Clasificación y Análisis de Accidentes e Incidentes de Aviación por Factor Humano* (HFACS, por su sigla en inglés). El modelo HFACS integra los niveles previamente identificados, que incluyen aspectos individuales, grupales, técnicos y corporativos. Esto demuestra que todos los miembros del entorno aeronáutico tienen un papel importante en la identificación, mitigación y gestión de los riesgos relacionados con la accidentalidad.

La Figura 7 categoriza los subsistemas del *Modelo HFACS* y representa una evolución con respecto al modelo de Reason. También enfatiza la importancia del reporte oportuno, no solo de las condiciones inseguras derivadas de las operaciones aéreas, sino también de las investigaciones pertinentes a nivel mundial.

Figura 7.
Subsistemas del modelo HFACS



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados de la implementación de algunas de las metodologías previamente estudiadas como un caso aplicado en una organización de aviación del Estado.

3. RESULTADOS

A partir de los conceptos revisados en capítulos anteriores en relación con las herramientas para el monitoreo apropiado del elemento humano (FF. HH.) para la prevención de riesgos de accidentes en el ámbito aeronáutico, es pertinente ilustrar algunos efectos (ver Figura 8) de la incorporación de estas metodologías en entornos aeronáuticos.

Los resultados ilustrados desde la Figura 8 hasta la Figura 13 fueron obtenidos a partir de la aplicación práctica en las instalaciones de la

Compañía Antinarcóticos de Aviación Tuluá (COATU) en función del personal perteneciente a la Aviación Policial de Colombia en un periodo comprendido desde el año 2015 hasta el año 2018. Es importante destacar que, aunque el estudio refleja cifras en el pasado, la implementación de las herramientas para el manejo de riesgos por Factores Humanos sigue vigente, no solo en esta base aérea, sino que ha sido extendida a lo largo de todo el componente de Aviación Policial en Colombia. A partir de la implementación del Programa de Prevención de Accidentes (PREVAC) en el año 2015, la accidentalidad ha venido disminuyendo significativamente.

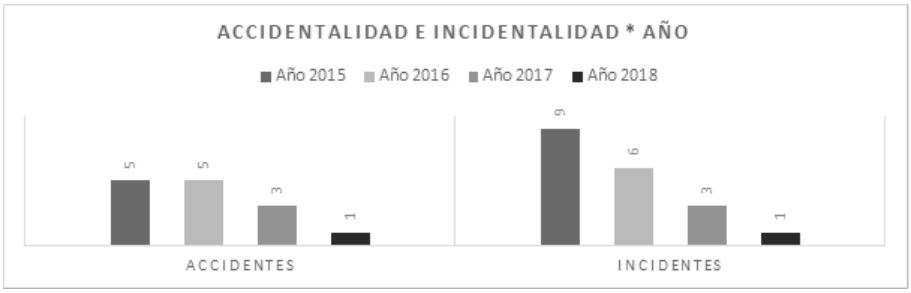
En el caso de los Accidentes (eventos no deseados donde hay compromiso de la vida o pérdidas en cuantías elevadas que se desarrollan en alguna de las fases del vuelo normalizado), es pertinente mencionar que gracias a las acciones que se adelantan anualmente por el PREVAC se ha logrado identificar, administrar y mitigar los riesgos a través de la dirección de actividades de prevención. Nótese que en la fase inicial de la implementación del PREVAC (años 2015 - 2016) no hubo mejora en la estadística de reportes de accidentes. Sin embargo, después de casi dos años de socialización del PREVAC, se muestra un decremento en los indicadores de reportes (entre el 40% al 60% aproximadamente). Siendo los accidentes más difíciles de controlar, en la actualidad se ha podido reducir de 5 eventos anuales a 1 evento por año hasta la fecha. La disminución alcanzada se debe a las políticas de capacitación, entrenamiento y seguimiento puntual de las actividades descritas en el PREVAC a través de los responsables de proceso de la unidad aeronáutica.

Por otra parte, para el registro estadístico de los Incidentes (estos son aquellos eventos no planificados, pero que una vez presentados no comprometen la vida del elemento humano o cuando las pérdidas económicas del evento no sobrepasan una cuantía predefinida y generalmente se evidencian en las operaciones en tierra), también hubo una reducción importante, aproximadamente del 33% en el número de reportes de la evaluación comprendida entre 2015 y 2016, y reducciones entre el 50% y 67% aproximadamente para los siguientes 3 años evaluados a partir del indicador del año anterior.

Toda la información insumo del presente estudio fue suministrada por la Oficina de Seguridad Aérea (SEGAE), encargada de la labor de hacer frente a esta labor.

Figura 8.

Índice de accidentalidad e incidentalidad por año



Fuente. Elaboración propia

Safety Investigation (SI)

La metodología Safety Investigation se aplica con el objetivo de evitar repeticiones de incidentes o accidentes, especialmente aquellos relacionados con la experiencia previa (Wiegmann, 2003). La Figura 9 muestra las actividades vinculadas a la investigación de la seguridad. Estas actividades tienen como propósito llevar a cabo todas las tareas relacionadas con la investigación de accidentes, ya sean aéreos o laborales, en las unidades de aviación a nivel nacional. Esta metodología se basa en insumos proporcionados a través de campañas preventivas.

Es esencial relacionar el concepto de Reporte Obligatorio de Eventos de Seguridad Operacional (MOR, en inglés), que es un mecanismo al que el personal aeronáutico tiene acceso para conocer e identificar aspectos en los que los componentes del sistema aeronáutico, como el hardware, el software, los procedimientos, el factor humano y otros, están fallando, potencialmente podrían fallar o están fuera de los parámetros de funcionamiento permitido. Una vez conocidos estos reportes, se priorizan desde los más relevantes hasta los más simples, y se da continuidad a la investigación de estos criterios para validar su pertinencia e identificar la causa raíz de cada uno de ellos. La Figura 9 muestra los logros mes a mes del estudio de reportes MOR con una vigencia anual.

Figura 9.
Safety Investigation

SAFETY INVESTIGACIÓN - (SI)			JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
A	INVESTIGACIÓN DE ACCIDENTES AÉREOS Y TERRESTRES AERONÁUTICOS	A1 CAMPAÑA IMPORTANCIA DE IDENTIFICAR E INFORMAR LOS RIESGOS OPERACIONALES IRO/IRL INCLUYENDO LA DIFERENCIACIÓN ENTRE PELIGRO Y RIESGO.												
		A2 DIVULGACIÓN DE LAS INVESTIGACIONES CULMINADAS DE EVENTOS DE SEGURIDAD OPERACIONAL - HORA DE LA SEGURIDAD.												
		A3 REPORTE E INVESTIGACIONES DE LOS INCIDENTES, ACCIDENTES (AÉREOS Y/O TERRESTRES AERONÁUTICOS.)												
		A4 INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS DE ACCIDENTES/INCIDENTES AÉREOS Y TERRESTRES AERONÁUTICOS, ASÍ COMO EL DESARROLLO DE LOS INFORMES(IRO/IRI).POR MEDIO DE CONTROL, SEGUIMIENTO.												
LOGRO				1	3	2	1	3	1	1	4	1	1	2

Fuente: Adaptado a partir de matriz de Seguridad Aérea Aviación de Estado (2019).

Human Factor Analysis (HFA)

Las actividades relacionadas con el factor humano en la aviación están vinculadas a dos procesos fundamentales. El primero de ellos se centra en la promoción de una cultura de seguridad operacional positiva, que se ve como una herramienta cultural derivada de la evolución del comportamiento de las tripulaciones y de todo el personal aeronáutico. Este enfoque incluye temas como la motivación, el reconocimiento y la gratitud por las horas de vuelo seguro, entre otros, con el fin de fomentar una cultura basada en la prevención.

Además, la gestión de factores humanos lidera las actividades de certificación en factores humanos en la aviación para todo el personal. Un requisito indispensable para obtener una licencia de vuelo es contar con una certificación inicial y completar un curso recurrente anual en factores humanos. La Figura 10 muestra la tabla de control de los logros (11 en total, con una vigencia de un año) de las actividades de formación en factores humanos con la implementación de HFA.

Figura 10.

Human Factor Análisis - HFA

HUMAN FACTOR ANÁLISIS - (HFA)			JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
H	CULTURA POSITIVA DE SEGURIDAD OPERACIONAL	H1 REALIZAR DIAGNOSTICO DE FACTORES HUMANOS												
		H2 CANDIDATOS INCENTIVOS BIEN HECHO												
I	GESTIÓN EN FACTORES HUMANOS	I1 CAPACITACIÓN EN FACTORES HUMANOS												
		I2 PROGRAMA DE ASISTENCIA PARA FAMILIARES Y PERSONAL DE LA AVIACIÓN POLICIAL EN CONTINGENCIAS AÉREAS												
LOGRO				1	0	1	2	2	0	2	0	0	2	1

Fuente: Adaptado a partir de matriz de Seguridad Aérea Aviación de Estado (2019).

Safety Action Group (SAG)

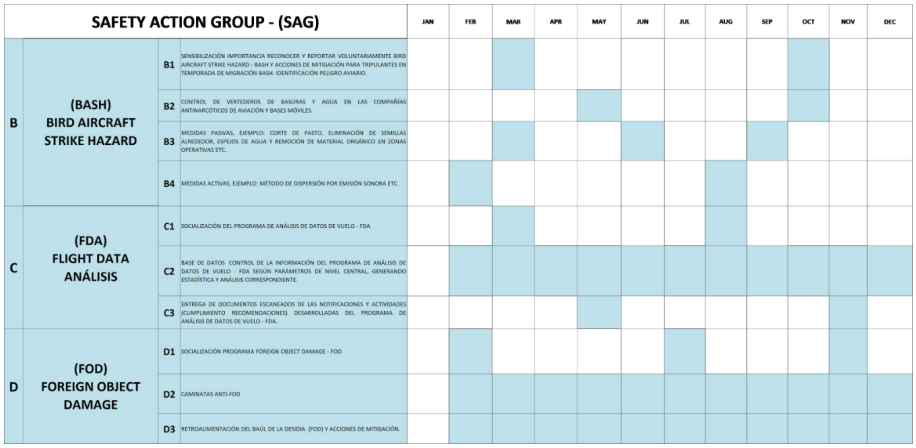
El subgrupo Safety Action Group (SAG) se dedica a actividades específicas, algunas de las cuales se mencionan en la Figura 11. Estas actividades están centradas en el análisis de datos de vuelo (Flight Data Analysis - FDA), que es una herramienta tecnológica instalada como sistema a bordo en las aeronaves. El FDA permite obtener un registro del comportamiento del piloto durante una operación de vuelo normalizada. En otras palabras, proporciona datos sobre la actitud en vuelo a través de las lecturas de los equipos de vuelo.

El propósito principal del FDA es estimar posibles excesos en las operaciones del piloto con respecto a los límites permitidos para garantizar un vuelo seguro. Como se ilustra en la Figura 11, el SAG se enfoca en controlar estos excesos en la operación mes a mes, especialmente en eventos como Bird Strike (colisión con aves), Flight Data Analysis (análisis de datos de vuelo), Foreign Object Damage (daños por objetos extraños) e inspecciones de seguridad de la plataforma.

Estas actividades son esenciales para mantener altos estándares de seguridad operacional en la aviación.

Figura 11.

Safety Action Group – SAG



SAFETY ACTION GROUP - (SAG)				JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
B	(BASH) BIRD AIRCRAFT STRIKE HAZARD	B1	SENSIBILIZACIÓN IMPORTANCIA RECONOCER Y REPORTAR VOLUNTARIAMENTE BIRD AIRCRAFT STRIKE HAZARD - BASH Y ACCIONES DE MITIGACIÓN PARA TRIPULANTES EN TEMPORADA DE MIGRACIÓN BASH. IDENTIFICACIÓN PELIGRO AVIARIO.												
		B2	CONTROL DE VERTEDEROS DE BASURAS Y AGUA EN LAS COMPAÑÍAS ANTINARCÓTICOS DE AVIACIÓN Y BASES MÓVILES.												
		B3	MEDIDAS PASIVAS, EJEMPLO: CORTE DE PASTO, ELIMINACIÓN DE SEMILLAS ALREDEDOR, ESPEJOS DE AGUA Y REMOCIÓN DE MATERIAL ORGÁNICO EN ZONAS OPERATIVAS ETC.												
		B4	MEDIDAS ACTIVAS, EJEMPLO: MÉTODO DE DISPERSIÓN POR EMISIÓN SONORA ETC.												
C	(FDA) FLIGHT DATA ANÁLISIS	C1	SOCIALIZACIÓN DEL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE DATOS DE VUELO - FDA												
		C2	BASE DE DATOS CONTROL DE LA INFORMACIÓN DEL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE DATOS DE VUELO - FDA SEGÚN PARÁMETROS DE NIVEL CENTRAL, GENERANDO ESTADÍSTICA Y ANÁLISIS CORRESPONDIENTE.												
		C3	ENTREGA DE DOCUMENTOS ESCANEADOS DE LAS NOTIFICACIONES Y ACTIVIDADES (CUMPLIMIENTO RECOMENDACIONES) DESARROLLADAS DEL PROGRAMA DE ANÁLISIS DE DATOS DE VUELO - FDA.												
D	(FOD) FOREIGN OBJECT DAMAGE	D1	SOCIALIZACIÓN PROGRAMA FOREIGN OBJECT DAMAGE - FOD												
		D2	CAMINATAS ANTI-FOD												
		D3	RETROALIMENTACIÓN DEL BAÚL DE LA DESIDIA (FOD) Y ACCIONES DE MITIGACIÓN.												

Fuente: Adaptado a partir de matriz de Seguridad Aérea Aviación de Estado (2019).

Health and Safety (HAS)

El subproceso de Health and Safety (Salud y Seguridad, o SST en español) se centra en las temáticas relacionadas con la seguridad y salud en el trabajo. En Colombia, la regulación sobre SST en las empresas se rige por el Decreto 1443 de 2014, que establece disposiciones para la implementación del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo. Además, la Resolución 0312 de 2019 establece los estándares mínimos del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo.

Desde esta perspectiva, se llevan a cabo varias tareas relacionadas con el SST, como la demarcación y señalización de áreas de trabajo, la prevención, identificación y administración de los factores de riesgo industrial, la realización de revistas preventivas, la utilización de listas de chequeo para el trabajo y la promoción de ambientes seguros e higiene industrial.

Estas actividades son esenciales para garantizar un entorno de trabajo seguro y saludable para los empleados, lo que contribuye a prevenir accidentes y enfermedades laborales. La Figura 12 debe proporcionar una representación visual de las tareas más relevantes realizadas en el control de SST en el caso de estudio.

Figura 12.

Health & Safety – HAS implementación

HEALTH AND SAFETY - (HAS)				JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
J	DEMARCACIÓN Y SEÑALIZACIÓN DE ÁREAS DE TRABAJO	J1	VERIFICACIÓN Y ACTUALIZACIÓN (PICTOGRAMAS , ÁREAS DE TRABAJO Y PLANOS DE EVACUACION)												
		J2	ACTUALIZACIÓN DE PLANOS Y DIAGRAMAS INDICANDO UBICACIÓN DE EQUIPOS CONTRAINCENDIOS FIJOS Y MÓVILES.												
K	(GAP) GROUND ACCIDENTS PROGRAM	K1	CAPACITAR EN GENERALIDADES DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO, NORMATIVIDAD Y RESPONSABILIDAD LEGAL, Y REPORTE DE ACCIDENTALIDAD												
		K2	SENSIBILIZACIÓN Y CAPACITACIÓN EDUCATIVA DE EPP, DE LOS AGENTES DE RIESGO INDUSTRIALES Y AMBIENTALES.												
		K3	CAPACITACIÓN Y RETROALIMENTACIÓN EN PRIMEROS AUXILIOS, PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS, EVACUACIÓN Y RESCATE Y BRIGADAS DE EMERGENCIA.												
		K4	REVISTA DEL USO DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL												
		K5	REVISTA, VERIFICACION Y ACTUALIZACION DE LOS ELEMENTOS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL												
		K6	IMPLEMENTAR Y ACTUALIZAR ACCIONES DE MEJORA, SEGUIMIENTO Y DIAGNÓSTICOS DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO DE RIESGO AERONÁUTICOS EN LAS COMPAÑÍAS ANTINARCÓTICOS DE AVIACIÓN Y BASES MÓVILES APOYADAS POR LA COMPAÑÍA.												
		K7	SENSIBILIZACIÓN IMPORTANCIA EN LA SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO. (ERGONOMÍA).												
L	NORMAS DE SEGURIDAD Y OPERACIÓN	L1	VERIFICACIÓN, SEGUIMIENTO Y UTILIZACIÓN EPP EN ÁREAS DE: ALMACENAMIENTO, OFICINAS, TALLERES (ESTRUCTURAS, ELÉCTRICOS, AVIÓNICA, BATERÍAS, PINTURAS, MOTORES, ENSAYOS NDI, HIDRÁULICOS, ETA) PLATAFORMA, HANGARES ENTRE OTROS.												
LOGRO					2	3	3	1	5	2	1	4	3	3	3

Fuente: Adaptado a partir de matriz de Seguridad Aérea Aviación de Estado (2019).

Aviation Medicine (AVM)

El subprograma de Medicina de Aviación (AVM, en inglés) es responsable de supervisar los procesos relacionados con el control de la salud del personal aeronáutico. Esto implica la renovación anual de las licencias de vuelo y la identificación de riesgos relacionados con la salud del personal aeronáutico. El subprograma también lidera eventos de promoción y prevención dirigidos a mantener la salud física y mental de los miembros del personal.

Se busca intervenir de manera preventiva en la conservación de la salud del personal a través de elementos clave, como la renovación de licencias, actividades de promoción y prevención, y la identificación y manejo de riesgos relacionados con la fatiga, entre otros. La Figura 13 proporciona una visión general de los logros y resultados de este subprograma, destacando el énfasis en la concientización, especialmente en los meses cercanos a las festividades de fin de año, para prevenir el uso de sustancias no recetadas durante operaciones tanto en vuelo como en tierra.

Figura 13.
Medicina de aviación – AVM

AVIATION MEDICINE - (AVM)				JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
M	LICENCIAS MÉDICAS DE VUELO	M1	REPORTE DE SEGUIMIENTO Y CONTROL LICENCIAS MÉDICAS DE VUELO: - LICENCIAS VENCIDAS - CASOS ESPECIALES DE MEDICINA AEROESPACIAL - SEGUIMIENTO A RECOMENDACIONES DEL PERSONAL PROFESIONAL DE MEDAV												
		M2	REPORTE DE LOS INCIDENTES, Y/O ACCIDENTES TERRESTRES AERONÁUTICOS Y/O ENFERMEDADES EN EL CONTEXTO AERONÁUTICO. (ENFERMEDADES DEL AIRE).												
N	PROMOCIÓN Y PREVENCIÓN	N1	SENSIBILIZACIÓN Y PREVENCIÓN DE RIESGOS AEROMÉDICOS (CARDIO VASCULAR, AUDITIVA, OFTALMOLOGÍA, SALUD ORAL Y PSICOLOGÍA).												
		N2	IDENTIFICACIÓN Y SEGUIMIENTO DEL RIESGO CARDIO VASCULAR												
		N3	ESTADÍSTICA DE PATOLOGÍAS (HIPERTENSIÓN, OSTEOMUSCULARES, EXCUSAS TOTALES -PARCIALES ENTRE OTRAS) DE LOS FUNCIONARIOS PERTENECIENTES A LA AVIACIÓN POLICIAL.												
O	RIESGOS ASOCIADOS A LA FATIGA	O1	SENSIBILIZACIÓN CIENCIA APLICADA A GESTIÓN DE RIESGOS ASOCIADOS A LA FATIGA.												
		O2	IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS ASOCIADOS A LA FATIGA Y FUENTES DE PROCEDENCIA. (REACTIVO, PROACTIVO Y PREDICTIVO).												
		O3	ESTADÍSTICA Y EVALUACIÓN DE LOS PELIGROS ASOCIADOS A LA FATIGA.												
LOGRO					3	5	2	3	4	5	2	4	3	7	2

Fuente: Adaptado a partir de matriz de Seguridad Aérea Aviación de Estado (2019).

4. DISCUSIÓN

Es evidente que la seguridad en la industria aeronáutica es un concepto en constante evolución, y la flexibilidad es una característica fundamental para adaptarse a las cambiantes circunstancias. La cultura de seguridad juega un papel crucial en la identificación y gestión de los riesgos en la aviación. La adaptación de metodologías pertinentes para el manejo del elemento humano en las organizaciones de aviación es esencial para mitigar accidentes e incidentes y garantizar la seguridad de las operaciones aéreas.

A continuación, se presentarán estadísticas de la autoridad aeronáutica de operación en Colombia (UAEAC) relacionadas con los informes de eventos vinculados a la seguridad operativa, lo que proporcionará un contexto global del sector aéreo.

Factores humanos y estadística actual

El Sistema Integrador de Reportes e Información de Seguridad Operacional, conocido como IRIS y administrado por la Aeronáutica Civil, es una herramienta actualmente en uso. Acceder a estadísticas sobre la accidentalidad aérea en Colombia es de gran utilidad, ya que esta información contribuye

al cumplimiento de los lineamientos establecidos en la Política de Seguridad Operacional del Programa Estatal para la Gestión de Autoridad en Seguridad Operacional (PEGASO). El propósito principal de IRIS es promover el intercambio de datos relacionados con la seguridad operacional entre los proveedores de servicios aéreos y las autoridades.

Los datos estadísticos recopilados en la plataforma IRIS (ver Figura 14) representan la tasa de informes proporcionados por los proveedores de servicios aéreos, tanto de empresas privadas como de la aviación estatal. Cabe destacar que, de acuerdo con la denominación del Sistema de Clasificación y Análisis de Accidentes e Incidentes de Aviación por Factor Humano (HFACS), los riesgos vinculados a los Factores Humanos (FF.HH.) ocupan la novena posición en la clasificación. En el año 2021, se registraron un total de 5 informes relativos a este tipo de riesgos dentro de la muestra total de informes presentados.

Estos indicadores demuestran que la cultura del informe se está fortaleciendo y se ha ido desarrollando a lo largo de los años. Esto contrasta con períodos anteriores en los que no se disponía de estadísticas relacionadas con los Factores Humanos, y se prevé que esta tendencia conduzca a una mejora en la cultura de prevención en el futuro.

Figura 14.

Datos generados por la UAEAC, año 2021

Fuente: UAEAC, 2021. Datos recuperados del sistema integrador de reportes e información de Seguridad Operacional, Aeronáutica Civil.

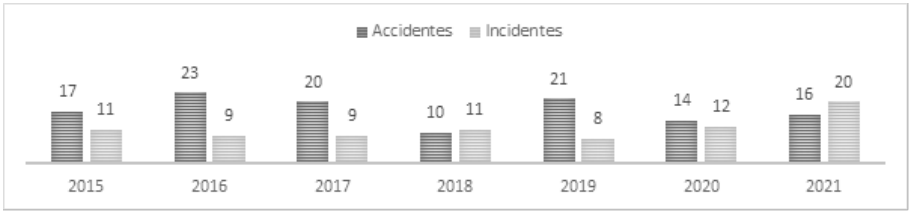
En la última década, Colombia ha mantenido una tasa de accidentalidad moderada en comparación con países como Estados Unidos, Canadá y el Reino Unido, con un total de 260 incidentes registrados. Esto pone de manifiesto la efectividad de los programas implementados en el sector aeronáutico para reducir las tasas de accidentalidad.

Este logro es resultado del esfuerzo conjunto de las autoridades reguladoras, las empresas de servicios aéreos, la aviación estatal y todos los profesionales que participan en la industria aeronáutica del país. Este éxito sienta un precedente importante para que otras empresas en diversos sectores consideren la adopción de medidas de prevención inspiradas en el sector aeronáutico como una herramienta para mejorar las condiciones relacionadas con los factores humanos en otras industrias.

En el caso de Colombia, la Figura 15 ilustra la variación en el número de accidentes e incidentes en la aviación, destacando el impacto positivo de la gestión de los factores humanos en la reducción de estos últimos.

Figura 15.

Accidentes e Incidentes, eventos por año (2015-2021)



Fuente: Datos recuperados de Iintegrador de reportes e información de Seguridad Operacional, Aeronáutica Civil 2021

El factor humano ha adquirido una importancia creciente en la actualidad, al punto de que muchos modelos de crecimiento económico y empresarial se centran en la gestión efectiva de los empleados que forman parte de las organizaciones (Schvarstein, 2005). Las empresas han reconocido la necesidad de invertir en su recurso más valioso, sus colaboradores. En este sentido, la gestión de recursos humanos asigna a los líderes organizacionales la responsabilidad de llevar a cabo los objetivos y metas de la empresa.

Es esencial eliminar por completo los factores que contribuyen a los accidentes o incidentes en la aviación. Aunque esto puede parecer imposible, la industria aérea no puede evitar los riesgos inherentes a su operación y a las maniobras que se realizan en su interior. Es importante reconocer que el recurso humano involucrado en la operación aérea no puede garantizar la ausencia de errores y, por lo tanto, sus posibles consecuencias.

5. CONCLUSIONES

Luego de revisar los conceptos presentados en este estudio, es evidente que la implementación de herramientas para mitigar riesgos en la aviación ha tenido un impacto significativo en el aumento de los niveles de seguridad y la reducción de la tasa de incidentes y accidentes, tanto en las operaciones como en el mantenimiento aeronáutico. Se vuelve fundamental promover una cultura de reporte adecuada para registrar todos los eventos que ocurran en la operación aérea.

La industria aeronáutica ha reconocido que, en el proceso de mejora y desarrollo continuo, el Factor Humano desempeña un papel fundamental, ya que lidera las operaciones aéreas, las actividades de mantenimiento y la cadena logística del sector. Por lo tanto, es esencial comprender multiculturalmente las características, expectativas, alcances y limitaciones de este recurso humano. Los procesos de inclusión exitosos muestran que la identificación, mitigación y gestión de los riesgos asociados al factor humano han sido constantes en la industria aérea. Estas acciones han demostrado ser efectivas en la reducción de incidentes y accidentes, contribuyendo a una aviación más segura con un personal altamente capacitado, competente y enfocado en la seguridad operativa. En este sentido, se valoran los esfuerzos realizados por la UAEAC para establecer estadísticas más precisas, oportunas y veraces que permitan aprender de experiencias pasadas.

Estas observaciones estadísticas deben desarrollarse en mayor detalle, ya que cada área de la aviación es autónoma para llevar a cabo investigaciones pertinentes. Por lo tanto, es posible contar con más datos para futuros estudios, lo que se convierte en una fortaleza dada la escala de la aviación colombiana en comparación con la de otros países.

La creación de canales adecuados de comunicación interinstitucional fomenta la interacción de experiencias entre los participantes de la aviación comercial y estatal. Esto permitirá identificar posibles patrones relacionados con los factores humanos en la accidentalidad aérea.

Las ciencias naturales y sociales, como la psicología, la medicina y la seguridad y salud en el trabajo en el ámbito aeronáutico tienen un fuerte impacto en el desarrollo del desempeño humano en la industria aérea. Estas disciplinas proporcionan una amplia gama de experiencias y métodos que contribuyen a los procesos relacionados con la reducción de la accidentalidad. Esto destaca la influencia de la complejidad humana en todas las actividades realizadas por el sector aéreo en todo el mundo. La formación competente de las tripulaciones y de todos los involucrados en la operación aérea es fundamental para mantener altos estándares de confiabilidad y seguridad operativa.

Al analizar las estadísticas nacionales, se puede identificar un patrón en la reducción de la accidentalidad aérea, en el que el factor humano ha desempeñado un papel crucial. Esta detección temprana se debe en gran medida a los procesos internos de las organizaciones, que han fortalecido las competencias laborales orientadas a la cultura aeronáutica y la seguridad operacional, logrando resultados excepcionales y generando una transformación corporativa sin precedentes.

Si bien no todo es perfecto, los avances tecnológicos y las mejoras en los procesos aéreos están promoviendo estándares de seguridad más altos y sólidos, consolidando a la industria aeronáutica como una de las más seguras en todo el mundo.

6. REFERENCIAS

Acuña, C. (2013). *El entrenamiento CRM (Crew Resource Management) aplicado al ámbito de la Fuerza de Submarinos de la Armada Argentina (Operaciones de Submarinos y de Buzos Tácticos*) (Tesis para magister universitario). Universidad Nacional del Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina.

Anca J. M. y Sarmiento M.. C. (1997). CRM is in the heart (of Asia). Ninth International Symposium on *Aviation Psychology*, 615-618.

Borenstein, S. (2011). Why can't US airlines make money? *American Economic Review*, 101(3), 233-237. http://dx.doi.org/10.1257/aer.101.3.2333

Botta, Néstor A. (2010). *Teorías y modelización de los Accidentes*, 3a edición.

Caballero, C., Hederich, C. & Johnson, P. (2010). El burnout académico: delimitación del síndrome y factores asociados con su aparición. *Revista Latino Americana de Psicología*, 42(1), 131-146.

Caldwell, J. A., Mallis. M., Caldwell, J. L., Paul, M. A., Miller, J. C. y Neri, D. F. (2009). Countermeasures in aviation. Aviation, *Space and Environmental Medicine*, 80, 29-59

Castillo, M. (2010). "¿Cuántas posibilidades tiene de sufrir un accidente de avión?". *Revista expansión*, 18 de febrero de 2010. Consulta electrónica: http://www.expansion.com/2010/02/18

Cequea, M. y Rodríguez-Monroy, C. (2012). Productividad y factores humanos. Un modelo con ecuaciones estructurales. *Interciencia,* 37(2), 121-127. https://www.redalyc.org/pdf/339/33922717007.pdf

Cooke, N. y Durso, F. (2007). *Stories of modern technology. Failures and cognitive engineering successes*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Cote, L. y García, A. M. (2016). Estrés como factor limitante en el proceso de toma de decisiones: una revisión desde las diferencias de género. *Avances en Psicología Latinoamericana*, 34(1), 19-28. http://dx.doi.org/10.12804/apl34.1.2016.02

Covello, A. (2005). *Factores Humanos, Seguridad y Calidad en la Aviación*. Serie Perspectivas Funde C: Buenos Aires.

DeHart, R. L. (2007). Aerospace Medicine. En: R. B. Wallace, (Ed.), *Public Health & Preventive Medicine* (15 ed.) (pp. 909- 918). New York: McGraw Hill.

Dekker, S. W. A. (2004). Why we need new accident models. *Human Factors and Aerospace Safety*, 4 (1), 1-18.

Di Nocera, F., Fabrizi, R., Terenzi, M. y Ferlazzo, F. (2006). Procedural errors in air traffic control: Effects of traffic density, expertise, and automation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine,* 77, 639-643.

Falconer, B. (2006). Organizational performance and culture in aviation: exploring and recasting existing theoretical approaches. *Human Factors and Aerospace Safety*, 6(3), 217-236.

Farmer, E.W. (2006). Crew resource management. In: Rainford, D.J.,Gradwell, D. P. *Aviation Medicine*. New York: Hodder Arnold Ltd.

Fuerza Aérea Colombiana. (2004). *Manual de Investigación de Accidentes Aéreos*. Bogotá: imprenta y Publicaciones Fuerzas Militares.

Gary, G. (2002). *Guidelines for the psychological evaluation of air crew personnel. Occupational Medicine: State of the Art Reviews*, Philadelphia, Hanley & Belfus, Inc.

Gaur, D. (2005). Human factors analysis and classification system applied to civil aircraft accidents in India. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 76, 501-5.

Glendon, A. I., Clarke, S. G., y Mckenna, E. F. (2006). *Human Safety and Risk Management* (2daEdición). Boca Raton, FL: Taylor & Francis.

Hein, L (2005). *Fatiga y Estrés, conceptos básicos de la fisiología de aviación*. Centro de Medicina Aeroespacial. Fuerza Aérea de Chile.

Helmreich, R.L., y Merritt, A.C. (1998). *Culture at Work in Aviation and Medicine. National, Organizational and Professional Influences*. Hampshire, UK: Ashgate.

Hispaviación 2.0. (05/02/2015). Hispaviacion 2.0. Obtenido de: «Síndrome de burnout». Una amenaza silenciosa a la seguridad de vuelo (consultado 17/05/2014). Obtenido de: Obtenido de: http://www.hispaviacion.es/sindrome-de-burnout-unaamenaza-silenciosa-a-la-seguridad-de-vuelo/

Inglis, M., Sutton, J. y McRandle, B. (2007). Human Factors Analysis of Australian Aviation Accidents And Comparison With The United States. ATSB Transport Safety Investigation Report. *Aviation Research and Analysis Report B2004*/0321 Final. Australia.

International Civil Aviation Organization, [ICAO] (2004). Human factors digest No.16. *Cross-cultural factors in aviation safety* (Circular 302-AN/175). Montreal, Canada.

Kotter J.P. y Keskett, J.L. (1992). *Corporate Culture and Performance*. Nueva York: The Free Press.

Li, W. C., y Harris, D. (2006). Pilot error and its relationship with higher organizational levels: HFACS analysis of 523 accidents. *Aviation, Space, and Environmental Medicine,* 77, 1056-1061.

Marshall, D. (2010). *Crew Resource Management: From patient safety to high reliability*. Denver, CO: Safer Healthcare Partners.

Maurino, D. E. (1999). Crew Resource Management: A time for reflection. In D. J. Garland, J. A. Wise & V. D. Hopkin (Eds.), *Handbook of aviation human factors* (pp. 215-234), Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates

O'Connor, P., Hahn, R. G. & Nullmeyer, R., (2010). The military perspective. In Kanki, B. G., Helmreich, R. L. & Anca, J. (Eds.), *Crew Resource Management* (pp. 445-466). San Diego, CA: Academic Press

Orford, R. R. y Silverman, W.S. (2008). Pilot health and aeromedical certification. En: J. R. Davis., R. Johnson, J. Stepanek y J. A. Fogarty (Eds.), *Fundamentals of Aerospace Medicine*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.

Osorio, J. E. y Cárdenas, L. (2017). Estrés laboral: estudio de revisión. *Diversitas: Perspectivas en Psicología*, 13(1), 91-100. https://doi.org/10.15332/s1794-9998.2017.0001.06

Paredes, L. (2011). *Seguridad y estrategia: los desafíos del futuro*. Fuerzas Armadas de Colombia.

Rathjen, T., Whitmore, M., McGuire, K., Goel, N., Dinges, D. F., Tvaryanas, A. P., Zehner, G., Hudson, J., Dismukes, R. K. y Musson, D. M. (2008). An introduction to human factors in aerospace. In: J. R. Davis, R. Johnson, J. Stepanek, y Fogarty, J. A. (Eds.), *Fundamentals of Aerospace Medicine*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.

Reason J. Safety in the operating theatre – Part 2: Human error and organizational failure. *Qual SafHealth Care*. 2005;14(1):56-60.

Reason, J. (1990). *Human Error*. New York: Cambridge University Press

Reason, J. (2000). Human error: Models and management. *British Medical Journal*, 320, 768-770. https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768

Rubio, S.T. (2015). Hispaviación 2.0. Obtenido de «Síndrome de burnout». Una amenaza silenciosa a la seguridad de vuelo (consultado 17/05/2014). Obtenido de: Obtenido de: http://www.hispaviacion.es/sindrome-de-burnout-una-amenazasilenciosa-a-la-seguridad-de-vuelo/

Sáiz, M. y Sáiz, D. (2012). El inicio de la psicología aplicada a la aviación: Desde el principio del siglo XX a la década de los años treinta. *Revista de Historia de la Psicología,* 33(4), 7-36.

Sánchez, L. M. (2008). Medicina Aeroespacial y factores humanos en aviación. La importancia de una aproximación transdisciplinaria a la salud. *Revista Med,* 16(2), 249-260.

Schein, Edgar (2004). *La cultura empresarial y el liderazgo*. La Habana: Félix Varela.

Schvarstein, L (2005). *La Inteligencia Social de las Organizaciones*. México: Editorial Paidós

Shappell, S. A. y Wiegmann, D. A. (2006). *Developing a Methodology for Assessing Safety Programs Targeting Human Error in Aviation*. (DOT/FAA/ AM-06/24) Washington, DC: Federal Aviation Administration, Office of Aviation Medicine.

Soeters, J. L. y Boer, P. C. (2000). Culture and flight safety in military aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 10(2), 111- 113.

Strong F. J., & Jaramillo J. M. (2014, 12 de febrero). En su trabajo de grado. La Fuerza Aérea Colombiana y la Acción Integral, doctrina y política de Estado.

Tourón, D., Pereira, J. y Lagreca, M. (2019). Avalição de riscos em atividades de manutenção aeronáutica através de brain games (Ponencia). Congresso abrisco 2019, Río de Janeiro, Brasil.

Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (2022). *Reporte sistema IRIS*. Bogotá D.C.

Walters, J. M. y Sumwalt, R. L. (2000). *Aircraft Accident Analysis: Final Reports*. New York: Mcgraw-Hill.

Wiegmann, D. A. y Shappell, S. A. (2003). *A human Error Approach to Aviation Accident Analysis: The Human Factors Analysis and Classification System*. Burlington: Ashgate.

Wiegmann, D., Zhang, H., von Thaden, T., Gibbons, A. and Sharma, G. (2004). Safety culture: An integrative review. *International Journal of Aviation Psychology* 14(2), 117-134.

GESTIÓN DE PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN Y PRODUCCIÓN MECÁNICA

CAPÍTULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN HÁBITAT CIENTÍFICO ANÁLOGO ESPACIAL

MY. Cesar Jimenez Lozano
https://orcid.org/0000-0002-9910-6344
Cesar.jimenez@fac.mil.co
Subjefatura de Estado Mayor Estrategia y Planeación.
Fuerza Aeroespacial Colombiana

Resumen

El documento tiene como objetivo proporcionar una guía para contribuir al programa espacial colombiano mediante el diseño de un hábitat análogo espacial, como parte de los primeros pasos en la carrera espacial del país. De acuerdo con Kennedy & Capps (2016), se entiende que los ambientes espaciales son inhóspitos para la vida humana y que los hábitats espaciales recrean el ambiente terrestre para sustentar la vida. Los hábitats análogos espaciales son configuraciones optimizadas que incluyen espacio de laboratorio, equipo de investigación y cuartos para la tripulación.

Los hábitats análogos son esenciales para simular misiones de exploración espacial en confinamiento durante diferentes períodos de tiempo, lo que pone a prueba diversos aspectos como transporte, logística, diseño, infraestructura y arquitectura. Estos entornos se utilizan en la Tierra para enfrentar riesgos más controlados antes de lanzarse al espacio y para perfeccionar las misiones espaciales.

Para el caso colombiano, se propone un hábitat compuesto por dos módulos que operen en ambientes desafiantes como la Antártida y la región del Vichada en Colombia. Estos lugares presentan similitudes climáticas, de aislamiento y geografía con otros entornos planetarios hostiles. El objetivo es desarrollar un hábitat funcional para operar en estos lugares y llevar a cabo simulaciones análogas al espacio mediante investigación científica.

El documento se divide en dos partes principales. La primera parte abarca la revisión de conceptos bibliográficos, mientras que la segunda parte se enfoca en aplicar estos conceptos a los escenarios operativos del hábitat propuesto. En resumen, este documento proporciona una guía para diseñar un hábitat análogo espacial que permita a Colombia participar en investigaciones y simulaciones espaciales, utilizando lugares en la Tierra para prepararse de manera efectiva para futuras misiones en el espacio.

Palabras clave: Ambientes, análogo, configuración hábitat, logística, y misiones.

Abstract. The paper aims to provide guidance to contribute to the Colombian space program through the design of a space analog habitat, as part of the first steps in the country's space race. According to Kennedy & Capps (2016), space environments are understood to be inhospitable to human life and space habitats recreate the terrestrial environment to sustain life. Space analog habitats are optimized configurations that include laboratory space, research equipment, and crew quarters.

Analog habitats are essential for simulating space exploration missions in confinement for different periods of time, which tests various aspects such as transportation, logistics, design, infrastructure, and architecture. These environments are used on Earth to face more controlled risks before launching into space and to perfect space missions.

For the Colombian case, a habitat composed of two modules operating in challenging environments such as Antarctica and the Vichada region of Colombia is proposed. These places have similarities in climate, isolation and geography with other hostile planetary environments. The objective is to develop a functional habitat to operate in these locations and to conduct space-like simulations through scientific research.

The paper is divided into two main parts. The first part covers the review of literature concepts, while the second part focuses on applying these concepts to operational scenarios of the proposed habitat. In summary, this paper provides guidance for designing a space analog habitat that will allow Colombia to participate in space research and simulations, using locations on Earth to effectively prepare for future space missions.

Keywords: Environments, analog, habitat configuration, logistics, missions.

1. INTRODUCCIÓN

La arquitectura espacial y la logística son áreas críticas para la exploración espacial, por lo que se requiere dar respuesta al siguiente planteamiento:

¿Cuál debería ser el diseño conceptual de un hábitat análogo espacial para el caso colombiano?

El propósito del presente documento representa una guía para contribuir al programa espacial colombiano, brindando unos lineamientos para el diseño de un hábitat análogo espacial, como parte del inicio de la carrera espacial de Colombia. Siguiendo las premisas de Kennedy y Capps (2016), se sugiere que los entornos espaciales se presentan como poco acogedores para el desarrollo de la vida humana.

De acuerdo con su enfoque, un hábitat espacial se concibe como una reproducción del entorno terrestre diseñada con la finalidad de mantener la existencia de seres humanos. Los hábitats análogos espaciales se configuran como espacios cuidadosamente optimizados en términos de sus dimensiones, y están equipados con instalaciones de laboratorio, equipos de investigación y áreas de alojamiento para la tripulación. Estos entornos espaciales enfrentan desafíos significativos, dado que están expuestos a factores como la gravedad, la radiación y el polvo planetario, todos los cuales representan desafíos fundamentales en el diseño de los hábitats espaciales.

En concordancia con lo mencionado, se destaca la significativa relevancia que poseen los hábitats análogos espaciales para el avance del programa espacial del país, tal como sugieren Kennedy y Capps (2016). Según sus planteamientos, los hábitats análogos espaciales adquieren un profundo interés para la humanidad, ya que proporcionan la oportunidad de llevar a cabo simulaciones de misiones de exploración espacial en condiciones de confinamiento durante períodos prolongados. En este contexto, se someten a pruebas diversos aspectos cruciales, tales como el transporte, la logística, el diseño, la infraestructura, los equipos y la arquitectura, entre otros elementos esenciales.

Estas áreas son sometidas a pruebas en la Tierra con el propósito de afrontar desafíos mayores en el espacio, permitiendo así el desarrollo de misiones espaciales con niveles cercanos a la perfección. Además, de acuerdo con la propuesta de Schalacht y Foing (2014), los hábitats análogos se definen como un proyecto enfocado en la creación de una instalación de simulación diseñada para imitar una misión en un entorno espacial extremo, tanto en la Tierra como en el espacio, con el objetivo de fomentar la innovación en el diseño de hábitats.

A continuación, se presentan los pasos utilizados en el diseño de un hábitat espacial, de acuerdo con los postulados de Kennedy & Capps (2016), quienes sugieren que los hábitats espaciales varían sus configuraciones según la duración de sus operaciones y la misión que llevan a cabo (consultar Tabla 1). Para el caso colombiano, se propone un hábitat compuesto por dos módulos destinados a operar en diferentes entornos, destacando la Antártida y la región del Vichada en Colombia. Estos lugares presentan similitudes con entornos planetarios hostiles en términos de clima, aislamiento y geografía.

Con base en lo anterior, el propósito es proponer un hábitat funcional que permita operar en estos territorios con facilidad y realizar simulaciones análogas al espacio a través de investigaciones científicas. La estructura del documento se divide en dos partes, la primera de las cuales se enfoca en la revisión de conceptos bibliográficos, mientras que la segunda parte se centra en la aplicación de estos conceptos en los escenarios operativos del hábitat propuesto.

Tabla 1.
Pasos para Diseño de Hábitat Espacial

Pasos	Consideraciones
1. Evaluar las limitaciones ambientales	• Vacío • Desechos • Gravedad • Radiación • Polvo
2. Evaluar las consideraciones humanas	• Psicología • Fisiología
3. Definir los elementos del sistema de habitación	• Subsistemas Internos • Sistemas externos e interfaces
4. Determinar las decisiones de diseño clave y los intercambios	• Medio ambiente • Humano • Subsistema
5. Evaluar la aplicación de diseño	• Orbital • Transferencia • Superficie planetaria

Fuente: (Kennedy, K. J. & Capps, S. D. (2000). Designing Space Habitation. Space 2000.)

2. METODOLOGÍA

El diseño metodológico se basa en los postulados de Kennedy y Capps (2016), quienes plantean las siguientes interrogantes:

> ***¿Cuál es el efecto de las tareas domésticas (mantenimiento de soporte vital) en la productividad científica?***
>
> **¿Cómo se utiliza el espacio público y privado? ¿Cómo se puede mejorar el diseño del hábitat?**

Por otro lado, se han realizado numerosos estudios análogos con miras a futuros viajes espaciales de larga duración. Estos estudios han centrado su atención principalmente en los efectos del aislamiento y el confinamiento, así como en las consecuencias psicológicas, mentales y físicas que puede acarrear una exposición prolongada en el espacio exterior para los seres humanos. Algunos de estos estudios se basan en las ideas de Binsted, Kobrick, Griofa, Bishop y Lapierre (2010), quienes argumentan que los estudios de investigación de factores humanos (HF) orientados a misiones de vuelos espaciales a largo plazo en entornos análogos relevantes son invaluables. Los experimentos de HF y los análisis de seguimiento permiten una mayor comprensión del desempeño humano en misiones a largo plazo, proporcionando lecciones aprendidas que optimizan la eficiencia y el éxito de la misión. Sin embargo, es importante señalar que los estudios de HF pueden ser prolongados y constituir un factor de estrés adicional para las tripulaciones. Por esta razón, es de importancia estratégica integrar los proyectos de HF en el programa general de ciencia de la misión para permitir la plena participación de la tripulación. Este enfoque evita la percepción de que se está agregando una tarea adicional a los ajustados plazos de la misión. En esta investigación, los autores describen lo que denominan estudios de HF, los cuales incluyen:

- FHFS-01: Contramedidas para el estrés y el aislamiento.
- FHFS-02: Análisis de dinámica de grupos.
- FHFS-03: Análisis de la habitabilidad del entorno de la estación, el desempeño cognitivo y el estrés y afrontamiento de los miembros de la tripulación.

- FHFS-04: Interrupción del sueño en condiciones de exploración de Marte.
- FHFS-05: Elección, preparación y satisfacción de alimentos. Profesionales para una Misión a Marte (Willson et al., 2014).
- Willson et al. (2014) describen el tipo de profesionales que deben conformar la tripulación de una futura misión al planeta Marte. Según la "Arquitectura de referencia de diseño 5.0" de la NASA, se espera que esta tripulación incluya científicos astronautas, como geólogos y astrobiólogos, con el objetivo de determinar si la vida alguna vez surgió en Marte. La exploración humana involucrará científicos astronautas que inspeccionarán formaciones geológicas en la superficie marciana en busca de evidencia de vida presente y pasada. Esta evidencia podría manifestarse en forma de moléculas orgánicas de origen biológico enterradas en los horizontes del suelo subterráneo o dentro de la superficie de la roca. También podría incluir fósiles visibles u otros indicios de actividad biológica pasada. Problemas Psicológicos en Misiones Espaciales (Wang & Wu, 2015).
- Por otro lado, Wang y Wu (2015) han investigado problemas psicológicos e interpersonales que han sido reportados por astronautas en misiones espaciales, y se han realizado estudios en entornos análogos para documentar estos problemas. Han observado que las emociones y las interacciones interpersonales de los miembros de la tripulación han ganado una atención significativa en este contexto. Cualquier extensión en la duración de una misión puede generar problemas psicosociales, como se discutió en estudios anteriores, incluyendo los efectos del tiempo en las emociones e interacciones humanas, el desplazamiento y los roles de liderazgo.
- También han encontrado que los astronautas pueden experimentar influencias negativas en su estado de ánimo y en las interacciones grupales a lo largo del tiempo. En una cápsula espacial, el entorno aislado, la comunicación limitada y el horario de trabajo monótono pueden agravar la soledad y la nostalgia, lo que a su vez puede desencadenar estados mentales negativos, como la depresión y la ansiedad. Los resultados de la Estación Espacial Internacional y Mir han demostrado que las experiencias emocionales de los astronautas durante las fases de transición de una misión, como las primeras

semanas en el espacio y el regreso a la Tierra, se vuelven irregulares. Se han documentado estados de ánimo negativos similares tanto en exploraciones polares como en experimentos análogos del espacio.

- En general, este estudio representa el primer experimento psicológico que se llevó a cabo en una estación espacial análoga en China, con una tripulación compuesta exclusivamente por miembros chinos. A pesar de las diferentes culturas, los resultados obtenidos se asemejan a los hallazgos de investigaciones anteriores realizadas en Mir y la Estación Espacial Internacional (ISS), donde los miembros de la tripulación eran de Estados Unidos y Rusia.
- Impactos Psicológicos de Vuelos Espaciales de Larga Duración, Nicolas y Gushin (2015) examinan los impactos psicológicos producidos por los vuelos espaciales de larga duración en condiciones confinadas y aisladas. Estos impactos son una gran preocupación y han adquirido gran importancia en la investigación (Kanas, 1997). El estrés se ubica como uno de los temas más críticos en el factor humano en este tipo de condiciones, siendo una causa frecuente de efectos perjudiciales que pueden influir en el bienestar y el éxito de una misión (Sandal, León y Palinkas, 2006). Las estaciones polares o análogas espaciales con condiciones extremas aisladas y confinadas (ICE) han brindado a los investigadores la oportunidad única de examinar los efectos del aislamiento y el confinamiento a largo plazo en el estrés y la recuperación. La experimentación Mars 105 tuvo como objetivo evaluar los resultados de una situación de ICE en variables psicológicas y fisiológicas. El presente estudio analizó el curso temporal del proceso psicológico de estrés y recuperación durante una simulación de espacio aislado y confinado de 105 días. Se encontró que durante la etapa inicial (de una a seis semanas), en el proceso de adaptación aguda a la microgravedad, se pueden detectar signos de tensión emocional y ansiedad. Después de 6 semanas, la influencia del aislamiento, la monotonía y la falta de comodidad provocó la aparición de fatiga, aburrimiento, depresión, alteraciones del sueño, ansiedad e irritabilidad. En la etapa final del vuelo, antes de aterrizar, se observó cierta euforia ligada a la perspectiva de regresar a la Tierra.

- Recuperación y Equilibrio, otro hallazgo significativo fue que los efectos de las respuestas al estrés también pueden provocar fallos en la recuperación, incluyendo el agotamiento y respuestas patológicas (Kellmann y Günther, 2000). La recuperación es un proceso individualizado que implica la restauración de recursos fisiológicos y psicológicos (Kellmann y Kallus, 2001; Meeusen et al., 2006). El ajuste y el rendimiento óptimo se pueden lograr si los participantes pueden recuperarse y encontrar un equilibrio entre la carga de trabajo de estrés y la recuperación adecuada (Rowbottom, Keast y Morton, 1998).
- Vida en Entornos Aislados y Confinados (ICE), Nicolas, Bishop, Weiss y Gaudino (2016) sostienen que la vida en entornos aislados y confinados (ICE) conlleva limitaciones significativas que pueden dar lugar a resultados psicosociales deteriorados. En su estudio, investigaron variables psicológicas, sociales, ocupacionales y culturales, que se encuentran entre los factores más importantes en la adaptación a una invernada de un año en la Antártida para 13 sujetos internacionales. Los autores afirman que vivir y trabajar en entornos extremos aislados y confinados, como los polares, submarinos o espaciales, está sujeto a limitaciones importantes que pueden generar resultados tanto positivos como negativos en los aspectos psicosociales y ocupacionales. La participación en ICE suele caracterizarse por un riguroso programa de tareas profesionales que combinan períodos de alta y baja carga de trabajo en un grupo social y cultural restringido. Los autores observaron diferencias en el apoyo percibido por el líder, la presión laboral y el control gerencial en misiones espaciales de larga duración entre estadounidenses y rusos en la estación orbital Mir. Por lo tanto, se sugiere que los antecedentes culturales pueden explicar los efectos perjudiciales sobre el estado de ánimo, el desempeño y, en un sentido más amplio, sobre los procesos de adaptación psicosocial. Además, Nicolas et al. (2016) recomiendan que la capacitación previa a la misión incluya habilidades prácticas en dinámica de grupos interpersonales, con ejercicios de formación de equipos que involucren tanto a los miembros de la tripulación como a la familia y al personal de control de la misión. A nivel individual, se destaca la importancia del autocontrol y la mejora en los repertorios de afrontamiento. Durante la misión, se sugiere que el apoyo esté

orientado a la tele-salud (medicina y psicología), con la posibilidad de recurrir a especialistas externos para atender a las personas en el lugar. Estas intervenciones y capacitaciones pueden resultar en mejores relaciones interpersonales y un rendimiento laboral más efectivo. Para misiones de larga duración en las que la consulta de expertos en tiempo real no sea factible, se plantea la necesidad de sistemas de inteligencia artificial a bordo dirigidos tanto al nivel individual como al grupo en su conjunto.

- Impacto del Retraso en la Comunicación en Misiones Espaciales, (Kintz & Palinkas, 2016) llevaron a cabo un estudio que se enfoca principalmente en cómo el retraso en la comunicación con el personal en Tierra afecta el desempeño de la tripulación en una misión espacial. Los autores afirman que tales retrasos pueden dificultar la capacidad del control de la misión para brindar apoyo a la tripulación, lo que a su vez podría tener un impacto negativo en el desempeño, el comportamiento y el estado de ánimo tanto de los individuos como del equipo, a menos que se cuente con las herramientas y la capacitación necesarias para superar o prevenir estos desafíos relacionados con la comunicación. Las preocupaciones acerca de los efectos adversos de los retrasos en la comunicación entre equipos distribuidos no son nuevas y no se limitan a las operaciones de vuelos espaciales. En resumen, la investigación sugiere que los retrasos en la comunicación pueden tener un impacto negativo en los procesos de trabajo en equipo, como la coordinación y la cohesión, así como en el bienestar individual, incluyendo las percepciones de estrés y los indicadores psicofisiológicos de tensión, como el agotamiento y la rotación. Además, estos retrasos en la comunicación también pueden afectar los resultados organizacionales, como el rendimiento del equipo. Algunos estudios han explorado cuestiones relacionadas con la comunicación de voz retrasada dentro del tema más amplio de la autonomía de la tripulación. Estos estudios sugieren que, durante las exploraciones del espacio profundo, los miembros de la tripulación necesitarán ser más autónomos con respecto al control de la misión. Además, la investigación realizada en entornos análogos en la Tierra indica que los retrasos en la comunicación están asociados con desafíos relacionados con el comportamiento y el rendimiento. Estos desafíos incluyen la disminución de la eficiencia en la realización de

tareas, la reducción de la conciencia de la situación y la comunicación debilitada entre los miembros de la tripulación y el personal de apoyo de la misión. Este estudio destaca la importancia de abordar los factores humanos en situaciones en las que las comunicaciones con el entorno externo están limitadas.

- Desafíos en Vuelos Espaciales de Larga Duración, Deming y Vasterling (2017) han identificado que los vuelos espaciales de larga duración presentan una serie de desafíos que pueden afectar el bienestar y el desempeño de los tripulantes astronautas. Estos desafíos incluyen el aislamiento, dificultades de comunicación, confinamiento, la capacidad limitada para abordar emergencias familiares, el estrés dentro de la dinámica del equipo, la carga de trabajo significativa, condiciones peligrosas y cambios psicológicos y de comportamiento, como el insomnio, la fatiga, las alteraciones del estado de ánimo, el retraimiento y la reducción de la motivación. La preparación para estas misiones puede también conllevar desafíos adicionales, como viajes extensos fuera del hogar y la familia, y requerimientos de capacitación intensiva que podrían extenderse por varios años. Se ha observado que las calificaciones promedio de estrés de los astronautas antes de la misión son elevadas. Por lo tanto, los autores argumentan que es necesario implementar contramedidas que aumenten la resiliencia psicológica antes del lanzamiento de la misión. Estas contramedidas no solo ayudarían a mitigar el estrés durante el vuelo espacial, sino que también abordarían los factores de estrés que los astronautas enfrentan durante la preparación para el vuelo espacial. Deming y Vasterling sugieren que el apoyo de otros, es decir, el apoyo social, en el entorno laboral, podría constituir la base de las contramedidas previas al vuelo para aquellos que se embarcan en vuelos espaciales de larga duración o que tienen la posibilidad de hacerlo.

Como se ha evidenciado, existe una extensa literatura en cuanto a la temática de misiones espaciales análogas. Esta literatura abarca no solo aspectos relacionados con la prueba de materiales, equipos y otros recursos en ambientes análogos a los de la Luna y Marte, sino también considera el bienestar, el desempeño y otros aspectos inherentes a la convivencia social entre personas en misiones espaciales. Numerosos estudios, como se ha mostrado anteriormente, han resaltado la importancia de los factores humanos

que deben ser considerados en la exploración espacial, especialmente en misiones de larga duración. Esto implica que no solo se deben tener en cuenta variables como los recursos materiales y tecnológicos, así como los aspectos de ingeniería, sino que también es crucial abordar las variables humanas, que incluyen aspectos mentales, emocionales, psicológicos y fisiológicos de los miembros de cada tripulación. Por lo tanto, las misiones análogas adquieren un valor mucho más importante debido a la amplia gama de variables que deben ser consideradas y controladas.

3. RESULTADOS

Para el desarrollo de la presente investigación, se partió, en primer lugar, de la experiencia en campo del autor Cesar Jiménez Lozano, expedicionario antártico que ha participado en tres expediciones científicas entre los años 2015 y 2020 en dicho continente. El autor posee un amplio conocimiento en logística en esta región inhóspita. Inicialmente, se plantearon dos escenarios de operación para las misiones análogas espaciales: la Antártida y el Vichada en Colombia. Teniendo en cuenta las necesidades de supervivencia y operación en ambientes similares a los espaciales, se estableció un comparativo con la analogía espacial, donde se encontraron varias similitudes de operación en la Tierra, siendo las expediciones antárticas las más extremas y las del Vichada las más moderadas.

La propuesta de diseño del Hábitat Análogo Espacial Colombiano (HACAE) busca optimizar recursos económicos, ya que se prevé que será temporal y, por lo tanto, "movible". Para lograr esto, se considera la necesidad de contar con los medios logísticos capaces de transportar el hábitat. En este sentido, la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), junto con la Fuerza Aérea Argentina y Chilena, posee la capacidad de transporte, ya que cuentan con equipos aéreos de gran calado para movilizarse por el escenario antártico. Además, la FAC tiene la capacidad de acceder a zonas distantes tanto en el territorio nacional como internacional a través de estos medios. Por estas razones, se dispone de aeronaves de carga C-130H (Ver Figura 1) y helicópteros medianos B-412 (Ver Figura 2) para el transporte necesario.

Además, el diseño del HACAE se basa en una revisión analítica de la literatura, que incluye referencias bibliográficas, en su mayoría de origen estadounidense. Estas referencias se fundamentan en las misiones a la Luna, la Estación Espacial Internacional y las misiones iniciales al planeta Marte.

Figura 1.
Aeronave C-130H FAC en operaciones Logísticas en la Antártida

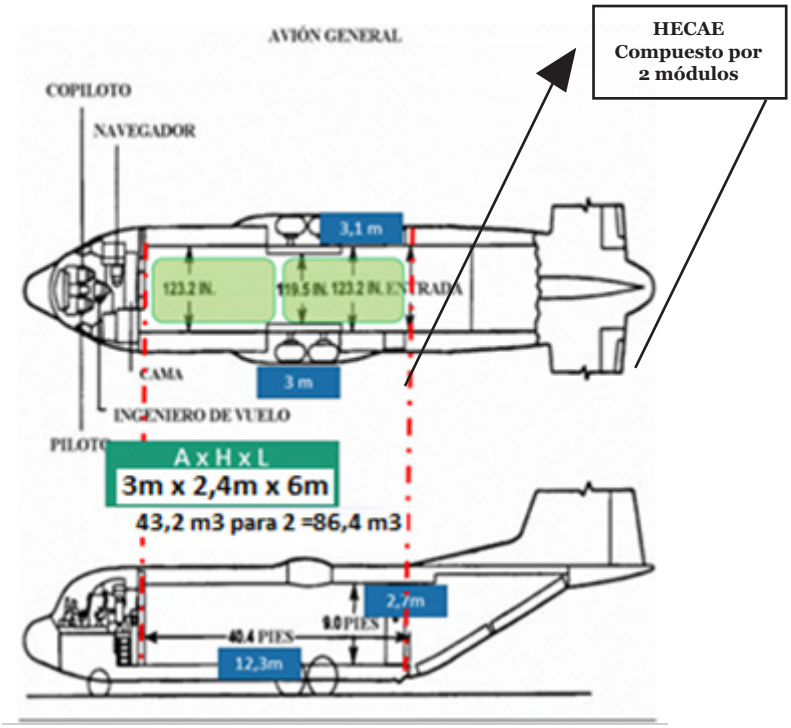
Fuente: Fuerza Aérea Colombiana, 2020

Figura 2.
Helicóptero B-412 Fuerza Aérea Argentina en Operaciones Logísticas en la Antártida

Fuente: Infodefensa, 2019

Después de analizar aspectos relevantes, como el volumen de las aeronaves de transporte y los pesos de carga útil, se pueden realizar inferencias para el diseño conceptual del hábitat. En este sentido, se cuenta con la siguiente información:

Figura 3.
Estimación Volumen Hábitat Fuselaje Avión Hércules

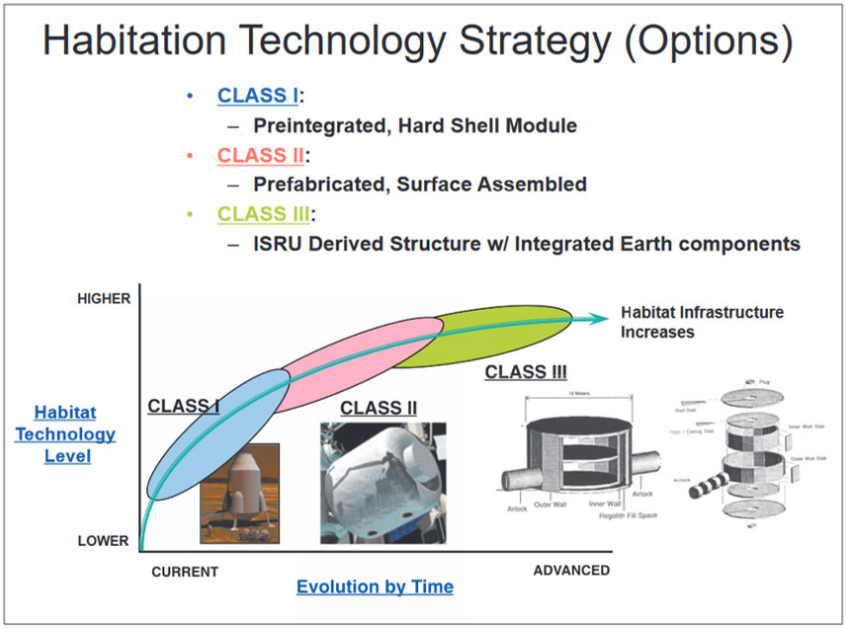


Fuente: Manual C-130

Considerando los dos escenarios de operación (ver Figura 3), se ha tomado la decisión de seleccionar un hábitat clase I. Este hábitat se caracteriza por estar previamente armado, contar con una estructura de carcasa sólida y haber sido preprobado en sus sistemas básicos, como la energía eléctrica y el sistema de carreteo. Además, este hábitat se ajusta al volumen y la masa de los dispositivos de carga, lo que permite su operación inmediata una vez que se despliegue en el escenario de operación.

Figura 4.

La tecnología de los hábitats espaciales evoluciona hacia volúmenes mayores y el uso de materiales locales



Fuente: Sherwood, 2000

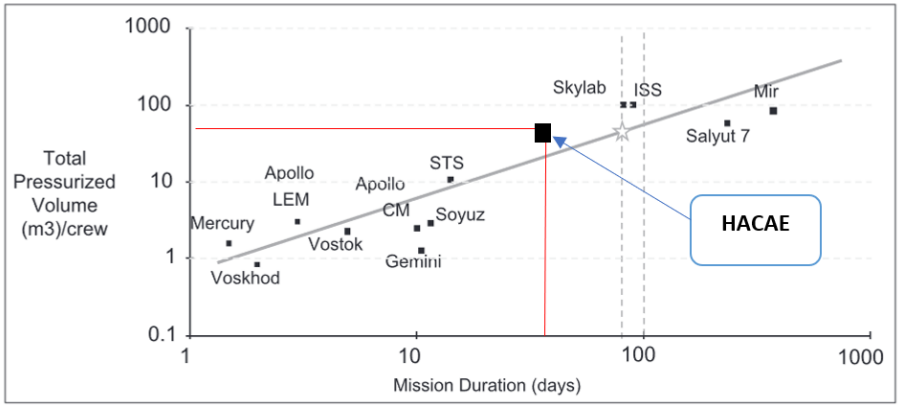
Ya establecidas las características iniciales del hábitat se puede llegar a representar la siguiente tabla de características de diseño del HACAE así:

Tabla 2.
Características de Diseño del HACAE

Análisis Características de Rendimiento		**Características Finales del Diseño del HACAE (02 módulos)**	
Funcionabilidad:	Portátil	**Sistema Portátil Terrestre:**	**Hacoon**
Transporte:	C-130H	Sistema Helicoportado:	04 puntos de anclaje en la parte superior cada hábitat
	B-412	Peso c/u:	2300 kg
Investigadores:	6 per.	Tripulación:	06 investigadores
		Volumen c/u:	43,2m3 = 86,4m3
		Dimensiones c/u:	3m A x 2.4m A x 6m L

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Figura 5.
Histórico de Volumen presurizado del hábitat espacial



Fuente: Sherwood, 2000

Conforme a la Figura 5, el "HACAE" se ubica en un volumen total de 86,3 metros cúbicos y está diseñado para una operación inicial de hasta 60 días, que es el tiempo mínimo permitido en el escenario Antártico. Es evidente que, de acuerdo con los datos iniciales, el "HACAE" se sitúa en un valor medio muy cercano a la línea de tendencia general de otros hábitats creados.

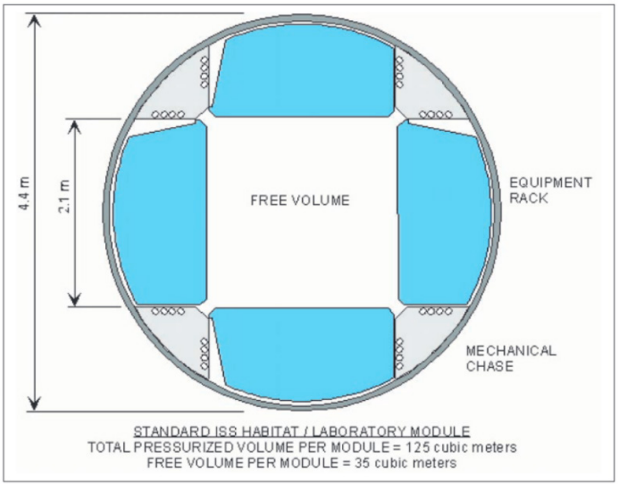
El diseño del hábitat "HACAE" se fundamenta en los postulados de Kennedy & Capps (2016), quienes sostienen que:

> *"…Los diseños del hábitat pueden llegar a ser diferentes en su diseño dependiendo de sus requerimientos independiente de su destino son:*
>
> 1. *Apoyo fisiológico y psicológico aceptable para los humanos.*
> 2. *Alojamiento exitoso de los objetivos de la misión*
> 3. *Integridad estructural confiable con márgenes de seguridad adecuados.*
> 4. *Modos de falla indulgentes (fuga antes de la ruptura).*
> 5. *Capacidad para ser probado a un alto nivel de confianza antes de ser puesto en servicio.*
> 6. *Capacidad de integrarse con los sistemas de lanzamiento disponibles.*
> 7. *Equipamiento y mantenimientos sencillos.*
> 8. *De fácil mantenimiento.*
> 9. *Larga vida de diseño.*
> 10. *Comunalidad a nivel de sistema o subsistema".*

Las configuraciones del hábitat varían de acuerdo con los requerimientos de uso dependiendo del destino y la misión. Casi siempre son requeridas unas funciones básicas enfocadas atender los requerimientos de supervivencia: comida, agua, oxígeno, higiene personal, administración de desechos.

El proceso de diseño del hábitat se centra en comprender las necesidades de diseño del ambiente y los objetivos de la misión trasladando esto a la funcionabilidad en numerosas soluciones de diseño. Los requerimientos para el diseño y estimación de parámetros pueden rápidamente estrechar las opciones de diseño y permitir el desarrollo y análisis de más opciones enfocadas.

Figura 6.
ISS rack-based, four-standoff module section configuration



Fuente: Sherwood, 2000

Con base a la Figura 6, podemos establecer la siguiente tabla comparativa de los volúmenes estimados del "HACAE" Vs ISS así:

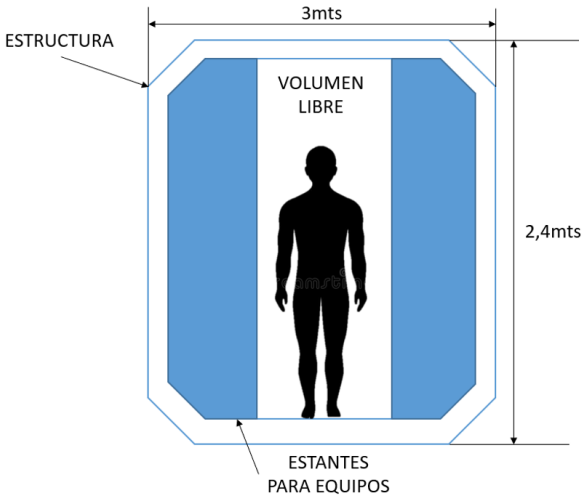
Tabla 3.
Comparación de Parámetros ISS versus HACAE

PARÁMETRO	ISS	HACAE	DIFERENCIA
ALTO	4.4 m	2.4 m	2 m
ANCHO	4.4 m	3 m	1.4 m
LARGO	-	6 m	-
VOLUMEN TOTAL	125 m3	43.2 m3	81.8 m3

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Como se puede observar en la columna de diferencia de la Tabla 3, existen parámetros similares entre los hábitats. Sin embargo, es importante destacar que, al adoptar la Clase I de diseño para el HACAE, este se ajusta al volumen y masa de los dispositivos de carga. Como resultado, se han identificado las diferencias ilustradas en la Tabla 3.

Figura 7.
Configuración módulo HACAE



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Es de gran importancia destacar cómo la configuración del HACAE afecta ciertos factores críticos que deben ser analizados para el desarrollo de operaciones análogas en el HACAE. Esta evaluación se basa en la experiencia acumulada por la NASA a lo largo de diversas misiones, como las relacionadas con la Luna y la Estación Espacial Internacional, y se encuentra estandarizada en el informe NASA/TM-2011-217352.3. A continuación, se exponen estos aspectos clave:

Tabla 4.

Principales factores estresantes psicológicos experimentados durante la habitación Ambiente aislado y Confinado de larga duración relacionados con el volumen habitable o el diseño según la clasificación de NASA/TM-2011-217352.3

Asignación de Espacio	*Falta de espacio personal *Falta de privacidad *Sensación de hacinamiento	*Confinamiento *Separación del hogar (física) *Involucrada gestión logística y almacenamiento ineficiente o inexistente
Espacio de trabajo	*Trabajo sin sentido *Aburrimiento de la carga de trabajo *Diseño o diseño defectuoso	*Procedimientos defectuosos *Equipo defectuoso
Control General e Individual sobre el Medio Ambiente	*Falta de control individual sobre el entorno	*Falta de adaptación/ personalización para diferencias culturales o preferencias personales
Monotonía sensorial	*Falta de estimulación sensorial *Privación sensorial *Sub-estimulación	*Mal diseño estético *Falta de frescura y variedad de alimentos *Monotonía física (muscular, táctil, etc.)
Monotonía Social	*Aislamiento *Privación social *Comunicación limitada *Separación de familiares y amigos	*Problemas familiares *Separación de la rutina familiar *Conexiones emocionales con género mixto
Composición de la tripulación	*Composición *Reclutamiento y selección	*Entrenamiento
Fisiología y medicina	*Separación de higiene *interrupción del sueño *Procedimientos médicos	*CO_2 *Nutrición *Radiación
Preparación para contingencias	*Evento (algo externo que requiere planificación de contingencia)	*La seguridad *Falta de vehículos duplicados

Fuente: NASA, 2014

Después de analizar los factores estandarizados por la NASA, procedemos a explicar cada uno de ellos para entender de qué manera pueden ser abordados mediante la configuración de diseño del HACAE. A continuación, se detallan estos factores:

Tabla 5.

Mitigación de Principales factores estresantes psicológicos experimentados durante la habitación Ambiente aislado y Confinado de larga duración relacionados con el volumen habitable o el diseño según la clasificación de NASA/TM-2011-217352.3 en el HACAE

NASA/TM-2011-217352.3			DISEÑO EN EL HACAE
Asignación de Espacio	*Falta de espacio personal *Falta de privacidad *Sensación de hacinamiento	*Confinamiento *Separación del hogar (física) *Involucrada gestión logística y almacenamiento ineficiente o inexistente	Se provee el empleo de dormitorios tipo "CASULA" los cuales brindan privacidad y espacio ergonómico suficiente por cada tripulante.
Espacio de trabajo	*Trabajo sin sentido *Aburrimiento de la carga de trabajo *Diseño o diseño defectuoso	*Procedimientos defectuosos *Equipo defectuoso	El diseño de las estaciones de trabajo es abatible y está contemplado de manera individual para cada tripulante con una silla ergonómica y con espacio amplio para un PC portátil y cuadernos y/o libros de investigación o herramienta.
Control General e Individual sobre el Medio Ambiente	*Falta de control individual sobre el entorno	*Falta de adaptación/ personalización para diferencias culturales o preferencias personales.	Cada tripulante puede llevar en su equipaje, fotos familiares y/o que hagan sentir calor de hogar para emplear en el dormitorio y/o estación individual de trabajo.

Monotonía sensorial	*Falta de estimulación sensorial *Privación sensorial *Sub-estimulación	*Mal diseño estético *Falta de frescura y variedad de alimentos *Monotonía física (muscular, táctil, etc.)	Para la estimulación sensorial se provee iluminación led multicolor graduable a los horarios internos con texturas de diseño en techo interno y piso alfombrado con colores llamativos.
Monotonía Social	*Aislamiento *Privación social *Comunicación limitada *Separación de familiares y amigos	*Problemas familiares *Separación de la rutina familiar *Conexiones emocionales con género mixto	La tripulación contará con servicio de internet satelital para tener vinculo social con sus familias y/o amigos mediante videollamadas.
Composición de la tripulación	*Composición *Reclutamiento y selección	*Entrenamiento	La tripulación está compuesta por 6 investigadores de carreras interdisciplinarias con experiencia en investigación aeroespacial y a su vez realizarán ejercicios en equipo como caminatas a un nevado y/o senderos para unirlos como tripulación.
Fisiología y medicina	*Separación de higiene *interrupción del sueño *Procedimientos médicos	*CO_2 *Nutrición *Radiación	Cada tripulante contará con un set de pañitos húmedos para higiene personal y se tendrá una ducha cada dos semanas. Asimismo, contará con 3 menús diarios de comida diferentes tipos ración, así como se contará con persianas y aislantes como supresores de ruido para conciliar el sueño.
Preparación para contingencias	*Evento (algo externo que requiere planificación de contingencia)	*La seguridad *Falta de vehículos duplicados	El HACAE está compuesto por dos módulos para cubrir una contingencia por falla de alguno de los dos, así mismo contaran con extintores y salidas de emergencia para mitigar cualquier riesgo que se presente.

Fuente: Adaptado de NASA, 2014.

Una vez identificado cómo se abordarán los factores de diseño en el HACAE de acuerdo con los estándares de la NASA/TM-2015-218564, se procede a revisar los parámetros de la misión de acuerdo con los dos escenarios propuestos, como se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6.

Sumario HACAE de acuerdo con la NASA Mars Design Reference Architecture 5.0 mission parameters as referenced in NASA/TM-2015-218564

	ESCENARIOS PROPUESTOS	
	Antártida	**Vichada**
Total, de Duración de la Misión	02 meses	02 meses
En tránsito para	20 días	01 día
En el objetivo	40 días	40 días
En tránsito desde	1 mes (preparación)	1 mes (preparación)
Tamaño de Tripulación	N=6	N=6
Composición de la Tripulación	Piloto, Ingeniero Aeronáutico, Ingeniero electrónico, Ingeniero de sistemas, Biomédico, Médico	
Mezcla de Género	Una mujer y 5 hombres	
Mezcla Cultural	Centro, oriente y costa colombiana	
Tiempo de Misión	Periodo largo alternado con actividades de investigación consistente en logística del hábitat, medición de parámetros médicos de la tripulación, mediciones sensoriales con sensores electrónicos entre otras.	
Retrasos en la Comunicación	20 minutos por interferencia de tormentas por mal tiempo.	
Autonomía desde el suelo	Aumenta con el inicio de la misión y disminuye con el regreso a la base origen.	

Fuente: Adaptado de Whitmire et al. (2015).

Considerando los controladores del hábitat, como señaló Sherwood (2000), se nos permite vincular el diseño del HACAE con las prácticas comerciales actuales. Además, es esencial comprender cómo se configuraría la guía de este controlador o, mejor aún, cómo se incorporaría en el HACAE. A continuación, se presenta la información al respecto:

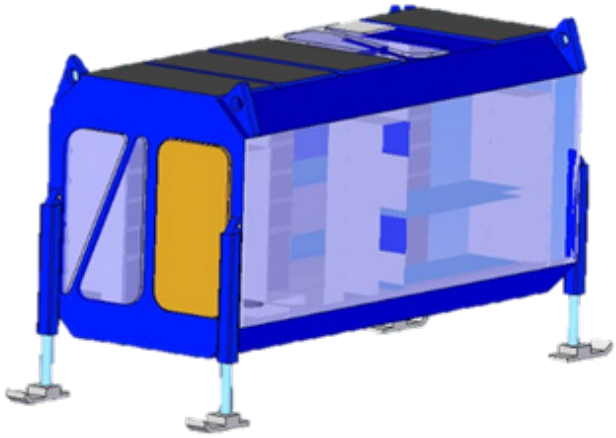
Tabla 7.
Oficios y directrices de diseño de habitabilidad espacial HACAE

CONTROLADOR DE CONFIGURACIÓN	COMERCIO	GUÍA
Función del Hábitat	Hábitat diseñado para misiones largas	El HACAE tiene dos módulos, un ala científica y la otra habitacional.
Número de Tripulantes	Se tiene un volumen de 86,2m3	Se traen dormitorios, baño y puestos de trabajo con suficiente espacio para trabajar y convivir.
Estructura	Aluminio	Para hábitat preintegrado y liviano para su transporte.
Soporte vital	Suministro de agua potable en bidones comerciales, así como raciones de comida	Diseñado el HACAE para cumplir misiones cortas y largas.
Tratamiento y gestión de datos	El HACAE contará con sensores internos visuales y sonoros de control atmosférico y externos de visualización básicos y fácilmente encontrados comercialmente	El HACAE contará con sensores atmosféricos internos y externos los cuales dependerán de constante monitoreo por la tripulación con la finalidad de evitar riesgos a la seguridad del hábitat.
Control Térmico	Hay ventilaciones manuales muy comunes y eficientes en el mercado	De acuerdo con los sensores atmosféricos la tripulación del HACAE regula la temperatura interna del hábitat.

Energía	Paneles Solares 500WATT Grupo electrógeno 6000WATT	Se emplean paneles solares en cada módulo para alimentar la energía eléctrica consistente en iluminación y soporte de PC portátiles y una lavadora secadora.
Acomodación de Tripulación	Trotadora, bicicleta estática, y dormitorios tipo capsulas comunes en el mercado de hotelería y turismo para brindar confort y privacidad	Cada tripulante contará con un dormitorio privado encerrado en su totalidad y con el bienestar de poder emplear una bicicleta estática y trotadora para aliviar la rutina.
Protección del ambiente	Sellamiento comercial como el empleado en carros y aeronaves.	Se contará con puertas herméticas y ventanas también para evitar el ingreso de partículas de arena y a su vez aislar del ambiente externo.
Riesgos	Energéticamente se cuenta con dos tipos de sistema y con la comida y agua una estimación de acuerdo a estándares NASA manejables en caso de predecir una posible escasez.	La tripulación monitoreara diariamente los sistemas de supervivencia para prever una posible falla de estos a tiempo.

Fuente: Adaptado de Sherwood, 2000.

Figura 8.
Sketch HACAE 01 módulo



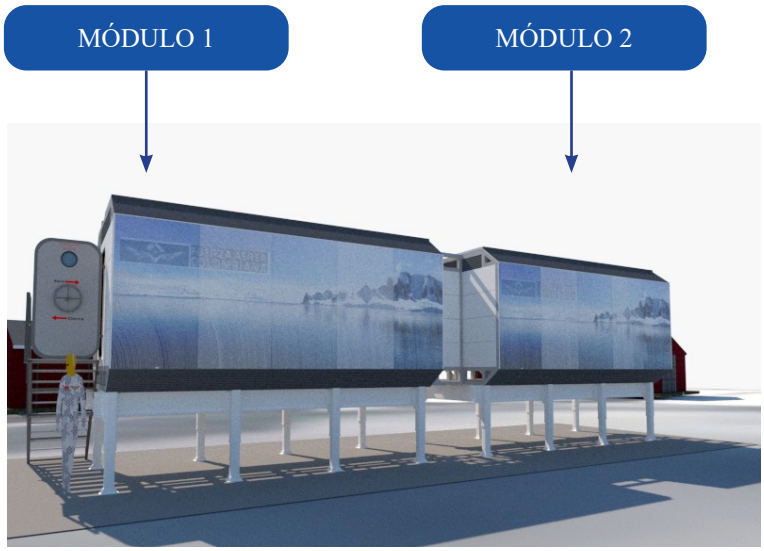
Fuente: Elaboración propia, 2022

Fuente: Elaboración propia, 2022

Figura 9.
Sketch HACAE sección de ala científica

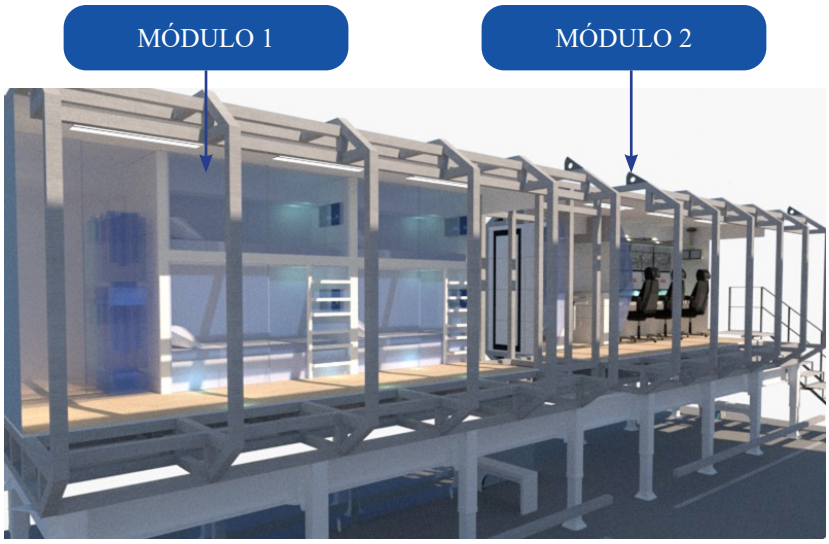
Fuente: Elaboración propia, 2022

Figura 10.
Configuración final módulo HACAE



Fuente: Elaboración propia, 2022

Figura 11.
Estructura final módulo HACAE



Fuente: Elaboración propia, 2022

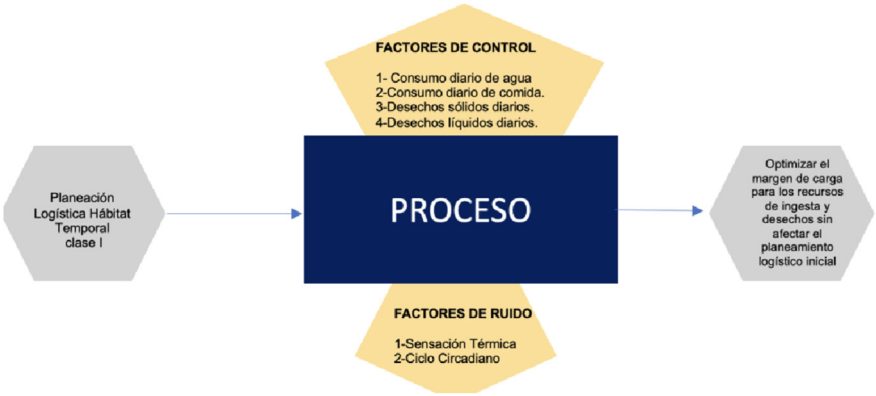
Figura 12.
Configuración interna módulo HACAE

Fuente: Elaboración propia, 2022

Después de establecer la conceptualización del diseño del HACAE con una configuración para las dos misiones iniciales, resulta de vital importancia analizar los factores de supervivencia, tomando como referencia los aspectos relacionados con la comida y los desechos generados por la tripulación (NASA, 2014). El objetivo es optimizar el margen de carga para los recursos de ingesta y sus desechos sin afectar el plan logístico inicial para la misión análoga espacial, garantizando una permanencia de 60 días para un equipo de 6 personas.

La inviabilidad de lograr esto se traduce en la escasez neta de capacidad de entrega en la misión, lo que requiere abstraer las modificaciones de configuración necesarias. En este contexto, se propone el siguiente esquema de Diseño de Experimento (DOE) (ver Figura 13):

Figura 13.
Esquema DOE Logística HACAE



Fuente: Elaboración propia, 2022

Figura 14.
Factores control DOE del HACAE

FACTORES CONTROLABLES	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA
AGUA	Cant. de líquido que consume la tripulación.	Kilogramos (Kg)
COMIDA	Cant. de raciones que consume la tripulación.	
ORINA	Cant. de líquido desecho por la tripulación	
DESECHO SÓLIDO	Cant. de sólidos desechos por la tripulación	

Nota. En el contexto de la misión análoga espacial, es esencial asegurar la gestión eficiente de los recursos de ingesta y el manejo adecuado de los residuos generados por la tripulación. Los factores relacionados con la ingesta serán monitoreados diariamente para prever cualquier posible desabastecimiento. Por otro lado, al finalizar la campaña, los residuos serán depositados en un recipiente estandarizado tipo caneca de 55 galones (55 GLN). Es importante destacar que la producción de desechos se ajustará de acuerdo con la demanda, que corresponde a un período de 60 días, sin permitir exceder este plazo.

Fuente: Elaboración propia, 2022

Para el presente DOE, se plantea el método Taguchi, teniendo en cuenta la robustez del experimento y la experiencia in situ, ya que abarca muchas aristas logísticas que en conjunto impactan el desarrollo de las operaciones dentro del hábitat. En este contexto, se emplean dos niveles, que dependen de la misión óptima o moderada, con una tolerancia de +/- 10 días como afectación, teniendo en cuenta posibles condiciones climáticas adversas y otras variables logísticas.

Se han identificado cuatro factores que afectan el margen de carga, según las directrices de la NASA (2014). Para abordar este análisis, se opta por el empleo de un arreglo ortogonal con 8 repeticiones y 2 factores de ruido.

Tabla 8.
Matriz DOE

FACTORES \ NIVELES	NIVEL 1 OPTIMO	NIVEL 2 MODERADO	OBSERVACIÓN
DRINKING WATER (2kg/Day per person)	720Kg	840Kg	NASA-STD-3001 VOLUME 2 Rev. A Page 36 6.3.2.1 Drinking wáter quantity
FOOD AND NUTRITION	1.043.000 Kcal	1.217.000 Kcal	NASA-STD-3001 VOLUME 2 Rev. A Page 72 7.1.1.3 FOOD CALORIC CONTENT
BODY WASTE CAPACITY (150 g per member two defecations per day)	108.000 g	126.000 g	NASA-STD-3001 VOLUME 2 Rev. A Page 80 7.3.2 BODY WASTE CAPACITY
URINE CAPACITY (The body waste management system shall be capable of collecting 1 L (33.8 oz) of urine per event with up to six urination events per crewmember per day.)	2.160 L	2.520 L	NASA-STD-3001 VOLUME 2 Rev. A Page 196 7.3.2.5 URINE CAPACITY

Fuente: Elaboración propia, 2022

4. DISCUSIÓN

Esta investigación ha impulsado la creación de una nueva capacidad para la Fuerza Aérea Colombiana con el propósito de desarrollar investigaciones análogas espaciales de manera autónoma y con independencia tecnológica. Esta iniciativa es de suma importancia para la FAC, ya que le permitirá centralizar todos los aspectos relacionados con la exploración espacial y potenciarlos en una sola dirección, alineándose con el Plan Estratégico de la FAC y los objetivos del país en este campo.

Cabe destacar que actualmente hay una tripulación de la FAC en entrenamiento en Polonia, adquiriendo experiencia en un entorno análogo espacial y desarrollando investigaciones. Esto sienta las bases para futuras implementaciones de esta capacidad en la institución, como se mencionó anteriormente.

5. CONCLUSIONES

En la investigación se ha logrado establecer un diseño conceptual del HACAE para el caso colombiano, que se adapta a las características de volumen de los medios logísticos disponibles y cumple con las misiones en los dos escenarios propuestos: Antártida y el Vichada.

En el ámbito del soporte logístico y la operación vital del HACAE, se ha propuesto el empleo de estándares de la NASA. Inicialmente, estos estándares se aplicarán a la operación, y se llevará a cabo un diseño de experimento en campo para determinar si el modelo de la NASA se ajusta al HACAE o si es necesario realizar ajustes.

La investigación ha logrado abordar de manera objetiva los dos objetivos específicos, aprovechando la experiencia de misiones espaciales y misiones en la Antártida.

6. REFERENCIAS

C. Heinicke, M. A. (2021). A review of existing analog habitats and lessons for future lunar and Martian habitats. *ELSEVIER*, 33.

Castillo, N. (12 de 04 de 2021). *Ciencia UNAM*. Obtenido de http://ciencia.unam.mx/leer/1108/como-reacciona-el-cuerpo-humano-al-aislamiento-extremo-un-joven-mexicano-en-una-mision-analoga

Clancey, W. J. (2022). A Framework for Analog Studies of Mars Surface Operations - Using the Flashline Mars Artic Research Station. *In F. Crossman and R. Zubrin (eds.), On to Mars: Colonizing a New World, Burlington, Canada: Apogee* (pág. 17). Moffett Field: NASA.

Kitmanyen, V., Disher, T. J., Kobrick, R. L., & Kring, J. P. (2017). Human factors for small net habitable volume: The case for a close-quarter space habitat analog. En 47th International Conference on Environmental Systems. Recuperado de https://commons.erau.edu/publication/524

Manfred Thallner, D. S.-M. (2018). Flexhab Working Module - Architectural Requiriments and Prototyping. *69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany* (pág. 11). Bremen: IAC-18. E5.1.10x44461.

Mars, K. (19 de 05 de 2020). *NASA*. Obtenido de https://www.nasa.gov/analogs/hera/about

Microsiervos. (25 de 06 de 2018). Obtenido de https://www.microsiervos.com/archivo/espacio/misiones-analogas-nasa.html

NASA. (2014). *Human Integration Design Handbook (HIDH) Volume 2*. Washington: National Aeronautic and Space Administration.

Perez, J. (07 de 07 de 2020). *NASA*. Obtenido de https://www.nasa.gov/analogs/nsrl

Schlacht, I. L., & Bernard, F. (2014). Lesson Learned From Space Hab For Disaster Management Lab: Spin-In/Out Of Technology And Knowledge For Disaster Management Facility. In *International Astronautical Congress: Iac Proceedings* (pp. 1-10). FRA. Kennedy, K. J., & Capps, S. D. (2000). Designing space habitation. In *Space 2000* (pp. 49-71). Loff, S. (07 de 08 de 2017). *NASA*. Obtenido de https://www.nasa.gov/image-feature/neemo-undersea-crew-tests-tools-and-techniques-for-future-spacewalks

Sherwood, A. S. (2000). *Out of this World the New Field of Space Architecture*. Maryland: AIAA.

Smink, V. (16 de 09 de 2015). *BBC News mundo*. Obtenido de https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/09/150915_ciencia_marte_nasa_argentino_vivienda_vs

Vorgelegt Von, M. o. (2012). *Space Habitability - Integrating Human Factors into the Design Process to Enhance Habitability in Long Duration Missions*. Berlin: Published from the Technische Universität Berlin.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DE LOS INYECTORES DEL MOTOR PT6A A TRAVÉS DE VISIÓN ARTIFICIAL

Cristian Lozano Tafur
https://orcid.org/0000-0002-6653-6188
cristianlozanotafur@cedoc.edu.co
Escuela de Aviación del Ejército – ESAVE

Pedro Fernando Melo Daza
https://orcid.org/0000-0002-0734-9358
pfmelod@libertadores.edu.co
Fundación Universitaria Los Libertadores

Jeison Fabián Cruz Sanabria
jeisoncruzsanabria@cedoc.edu.co
Escuela de Aviación del Ejército – ESAVE

Juan Andrés Bermúdez Gómez
juanbermudezgomez@cedoc.edu.co
Escuela de Aviación del Ejército – ESAVE

Kevin Andrés Castañeda Acevedo
kevinastanedaaacevedo@cedoc.edu.co
Escuela de Aviación del Ejército - ESAVE

Resumen

El ángulo de pulverización y la homogeneidad de aspersión son aspectos críticos en los inyectores de un motor. Su desempeño tiene un impacto significativo en el rendimiento del motor y su potencia. Por lo tanto, en una aeronave, estos factores afectarían directamente el consumo de combustible, el empuje y la aerodinámica. Este trabajo presenta un método de evaluación utilizando visión artificial para analizar el cono de aspersión de los inyectores del motor PT6A.

En primer lugar, se utiliza una cámara industrial junto con un sistema de iluminación artificial para capturar imágenes de la aspersión en un banco de lavado de inyectores. Luego, se aplica un algoritmo a través del software LabVIEW que transforma las imágenes mediante la binarización. Finalmente, se calcula la homogeneidad de la aspersión y se evalúa la condición del inyector utilizando los criterios definidos en el manual de mantenimiento.

Palabras clave: cono de inyección, inyector de combustible, LabVIEW, procesamiento de imágenes, Visión artificial

Keywords: fuel spray nozzle, image processing, injectors cone, LabVIEW, machine vision

1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles líquidos y su combustión han estado presentes desde los inicios de la aviación. Su objetivo consiste en convertir la energía química en energía térmica. Para el análisis de esta transformación, un parámetro clave del combustible ha sido relevante en el diseño y rendimiento de los motores de aeronaves: la densidad energética (Epstein, 2014; Turns, 2000). La densidad energética se define como la cantidad de energía almacenada en un volumen determinado, y los combustibles líquidos son los más relevantes en la obtención de energía para las aeronaves (Edwards, 2003).

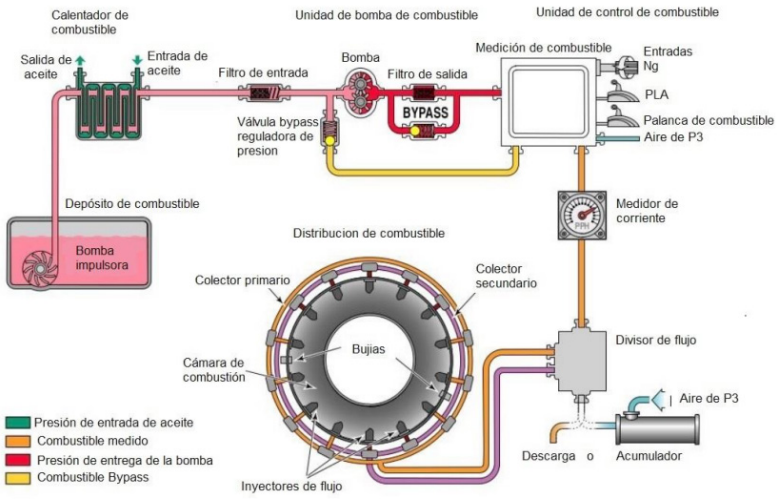
La combustión depende de dos parámetros clave: el ángulo de aspersión y la uniformidad. El tamaño del ángulo de aspersión desempeña un papel importante en las características de distribución del combustible en la cámara

de combustión. Mientras tanto, la uniformidad de la aspersión es fundamental para lograr una distribución adecuada del combustible y del gas. El exceso de combustible aumentará las emisiones de gases de escape y el humo, mientras que la falta de combustible no favorecerá la estabilidad de la combustión. Ambos casos deterioran la calidad del campo de temperatura de la combustión y reducirán su eficiencia (Huang & Long, 2011).

Además de los desafíos de aspersión, existen otros retos relacionados con la amplia gama de caudales a los que están sometidos los inyectores durante las operaciones de la aeronave, que incluyen encendido, ralentí, despegue, crucero y aterrizaje. Estos retos se pueden abordar mediante sistemas de presión múltiples (Karl & Bauer, 2019).

Un inyector de combustible es parte integral del sistema de combustible de las aeronaves. Su función principal es enviar y pulverizar el combustible medido en la cámara de combustión. Durante el funcionamiento del motor, este combustible es encendido por las bujías para provocar la combustión, y la energía de la combustión se entrega finalmente a la turbina (Garrido, 2011). La Figura 1 describe el sistema de combustible de un motor PT6A, y se puede observar la ubicación de los inyectores alrededor de la cámara de combustión.

Figura 1.
Sistema de combustible de un motor PT6A



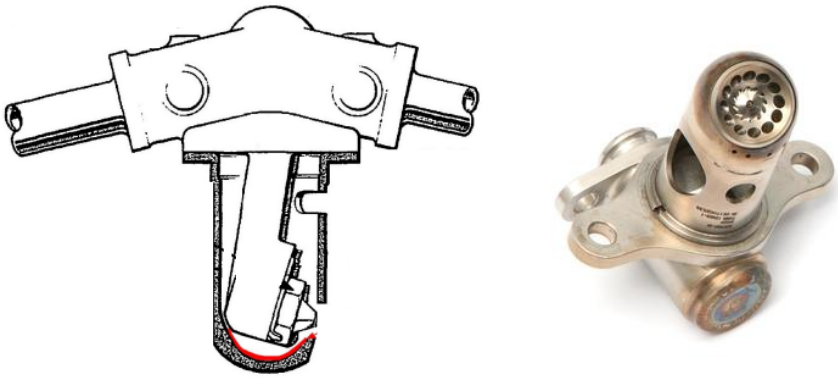
Fuente: (Pratt & Whitney, 1966)

Los inyectores del motor PT6A se clasifican en tipos simplex y dúplex. Los inyectores simplex solo tienen un orificio por el cual el combustible se pulveriza. Su desventaja radica en las operaciones en las que el combustible se distribuye a baja presión. En contraste, los inyectores dúplex poseen dos orificios: uno primario y otro secundario. Este tipo de inyectores corrige los problemas de presión que presentan los inyectores simplex (Rivas, 2003). La Figura 2 muestra una representación del inyector utilizado en el motor PT6A. El proceso de pulverización experimenta diferentes etapas a medida que aumenta la presión de inyección del combustible. Estas etapas son las siguientes: etapa de goteo, lápiz distorsionado, etapa de cebolla, etapa de tulipán y atomización completa. Todas estas etapas se representan en la Figura 3.

El manual de mantenimiento especifica procedimientos de inspección que incluyen la prueba de pulverización de los inyectores de combustible a dos presiones diferentes. A baja presión, se evalúa la forma del cono de pulverización y sus características geométricas, mientras que a presión más alta, se inspeccionan los posibles defectos en el patrón de pulverización. El manual de mantenimiento describe los defectos potenciales en la pulverización del combustible, que incluyen las rayas (streakiness), los vacíos (voids), la asimetría (skewness), el goteo (drooling) y el salpicado (spitting), los cuales se presentan cuando hay grandes cantidades de combustible no atomizado de manera intermitente (Pratt & Whitney, 1966). Estos defectos se muestran en la Figura 4.

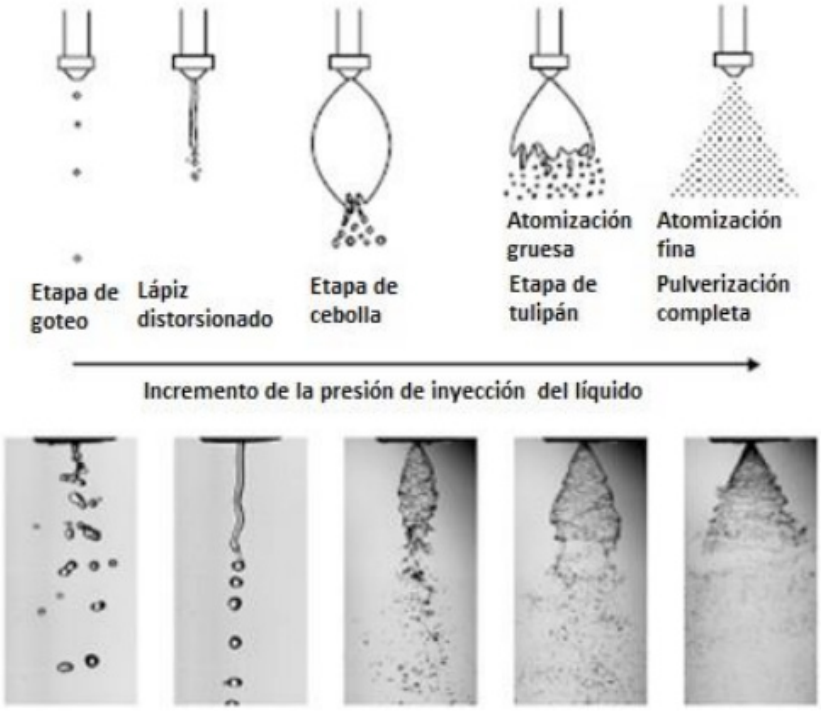
El manual de mantenimiento proporciona límites aceptables para cada uno de los defectos. En este caso, una pulverización de combustible se considera aceptable si presenta vacíos o rayaduras en el cono de aspersión de un máximo del 20%, como se muestra en las Figuras 4 y 5 (Pratt & Whitney, 1966).

Figura 2.
Representación del inyector



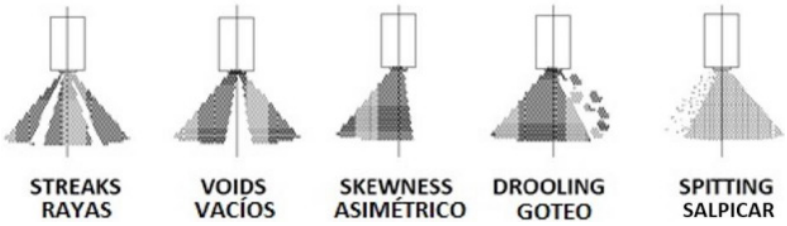
Fuente: (Nordicnozzle, 2022)

Figura 3.
Etapas de pulverización en inyectores



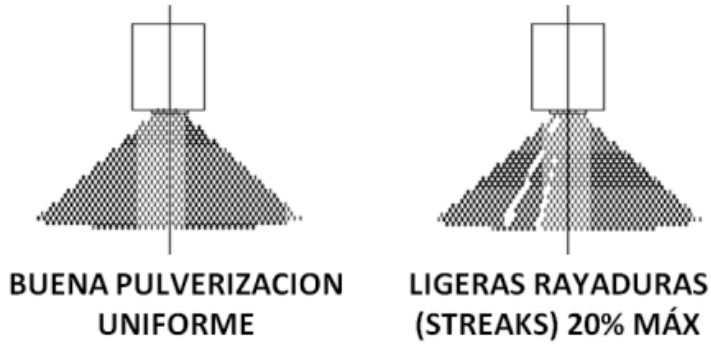
Fuente: (Lefebvre & V McDonell, 2017)

Figura 4.
Defectos de pulverización



Fuente: (Pratt & Whitney, 1966)

Figura 5.
Pulverización aceptable



Fuente: (Pratt & Whitney, 1966)

Técnicas de medición no intrusivas son las más recomendadas para comprender el rendimiento de los inyectores y las características de pulverización correspondientes. En las últimas décadas, la mayoría de la tecnología para evaluar la pulverización se ha centrado en las técnicas de diagnóstico óptico. La ventaja de estas técnicas radica en la capacidad de realizar mediciones sin perturbar físicamente la pulverización (Bachalo, 2000; McDonell & Samuelsen, 2000).

Existen diversas formas de clasificar el diagnóstico de un inyector. Algunos métodos utilizados para medir el ángulo del cono de pulverización incluyen el método del triángulo artificial, la holografía láser, la detección de difracción y dispersión láser, la detección de la cámara CCD, entre otros. En cuanto a los

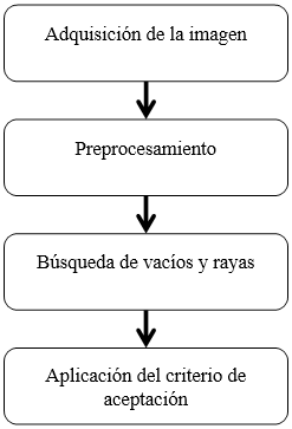
métodos para evaluar la uniformidad de la atomización, se pueden mencionar el método visual artificial, el método de la balanza y el método de la capacitancia (Hildenbrand et al., 2007; Huang & Long, 2011). Sin embargo, estos métodos pueden presentar defectos como baja precisión, escasa repetibilidad o ser adecuados únicamente para entornos de laboratorio. Estos análisis pueden incluir mediciones puntuales, mediciones en línea de vista del flujo total, mediciones planas y mediciones mecánicas (Fansler & Parrish, 2015; Lefebvre & McDonell, 2017; Settles & Hargather, 2017; Smith & Neal, 2016).

Actualmente, la inspección de inyectores se lleva a cabo de dos maneras. En primer lugar, un técnico de mantenimiento puede realizar una inspección visual, y la duración de este procedimiento depende directamente del nivel de experiencia del técnico. En segundo lugar, el inyector puede ser enviado a fabricantes o talleres especializados que cuentan con equipos disponibles. En ambos casos, los tiempos de mantenimiento aumentan, y los costos también pueden incrementarse (Huang & Long, 2011; Karl & Bauer, 2019). El objetivo de este trabajo es desarrollar una solución que permita automatizar la evaluación de los inyectores utilizando visión por computadora. El objetivo es garantizar una calidad uniforme de la pulverización, con un máximo del 20% de espacios en blanco ligeros en el rocío, de acuerdo con los parámetros establecidos por el manual de mantenimiento de la aeronave. Además, se busca lograr esto con un presupuesto más reducido, lo que permitiría su implementación en diferentes entidades aeronáuticas.

2. METODOLOGÍA

La Figura 6 muestra el diagrama de bloques utilizado para la evaluación de inspección de los inyectores del motor PT6A.

Figura 6.
Diagrama de bloques evaluación de inspección de los inyectores



Fuente: Elaboración propia

2.1. Adquisición de imagen

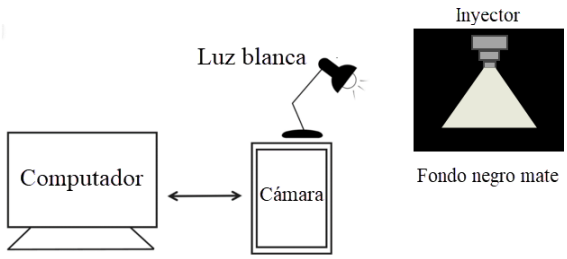
El proceso de adquisición de imágenes se llevó a cabo en el banco de lavado de inyectores perteneciente al BAMAV1 de la Aviación del Ejército de Colombia, como se muestra en la Figura 7. En este banco, se adaptaron los equipos necesarios para la adquisición de imágenes.

Figura 7.
Banco de lavado de inyectores BAMAV1, Aviación del Ejército de Colombia

Fuente: Elaboración propia

La obtención de las imágenes se realizó mediante un dispositivo móvil de 48 MP, utilizando una luz artificial frontal. Además, se colocó un fondo negro mate para evitar reflexiones de la luz no deseadas (González Marcos et al., 2006). La elección de la luz artificial frontal se debe a que el agua refracta la luz blanca en múltiples longitudes de onda de diferentes colores que se mueven en la misma dirección que la fuente de luz, lo que permite distinguir los detalles de los objetos, como su forma y otros parámetros (Valencia & Miscione, s.f.), (González Marcos et al., 2006). Al utilizar la técnica de iluminación frontal, es fundamental contar con un fondo opaco que evite los reflejos, por lo tanto, se utilizó un fondo negro mate (Hueso et al., 2007), evitando que las ondas de luz se dirijan hacia la lente de la cámara, lo que podría causar perturbaciones y ruido en la imagen. La Figura 8 muestra un esquema del proceso de adquisición de imágenes.

Figura 8.
Diagrama de la adquisición de fotografías del rociado de los inyectores



Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 9 y 10 muestran las imágenes de los inyectores utilizados en las aeronaves Cessna Grand Caravan y Beechcraft King Air de la Aviación del Ejército de Colombia. En la Figura 9, se observa un inyector en buen estado, con un rociado adecuado. Por otro lado, en la Figura 10, se aprecia un inyector con una obstrucción en la boquilla.

Figura 9. *Cono de aspersión de inyector en buen estado*

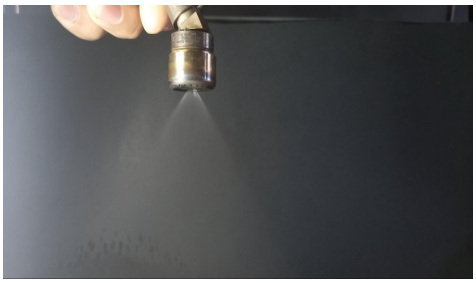


Figura 10. *Cono de aspersión de inyector defectuoso*

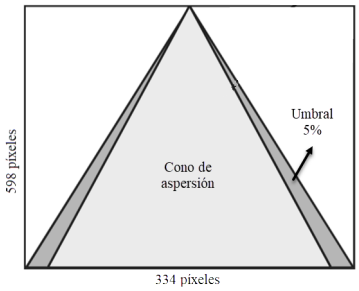
Fuente: Elaboración propia

2.2. Preprocesamiento

El primer paso del preprocesamiento consiste en ajustar el tamaño de la imagen y centrar el cono de aspersión. La imagen se estandarizó a un tamaño aproximado de 598x334 píxeles. Luego, se aplicaron algoritmos de escalado para aumentar la imagen y se realizó una traslación, limitando la región de interés a los bordes inferiores del cono de aspersión, con un umbral del 5%, como se ilustra en la Figura 11.

Figura 11.

Imagen de referencia del tamaño y centralización del cono de aspersión



Fuente: Elaboración propia

El preprocesamiento de las imágenes es esencial para corregir imperfecciones como el ruido, el desenfoque y las perturbaciones causadas por el hardware utilizado al tomar las fotografías. Esto garantiza una base sólida para el análisis posterior, ya sea realizado por software o por humanos. Después de la adquisición de imágenes, se sometieron a una serie de operaciones de mejora de la imagen antes de utilizarlas en el software desarrollado en LabVIEW. Estas operaciones incluyeron zonificar y priorizar la zona de rocío, aumentar el brillo, ajustar el contraste, y reducir los colores negros, entre otras. El objetivo era obtener imágenes que fueran más adecuadas para el reconocimiento por parte del software.

Inicialmente, las imágenes se encontraban en formato de vectores. Para aplicar los algoritmos necesarios, se convirtieron en matrices, transformando así toda la imagen en una única matriz RGB. Luego, se aplicó un filtro de mediana a las imágenes, que sustituye cada píxel por la mediana de todos los píxeles en su vecindario. Este filtro elimina el ruido y suaviza la imagen sin afectar los detalles ni los bordes.

Las Figuras 12 y 13 muestran ejemplos del preprocesamiento realizado en las imágenes, tanto para el inyector en buen estado como para el inyector defectuoso.

Figura 12.
Imagen con filtro de mediana inyector en buen estado

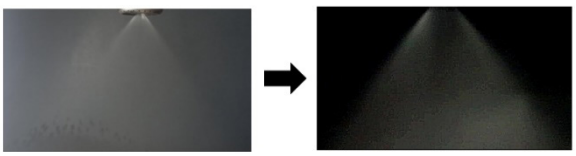
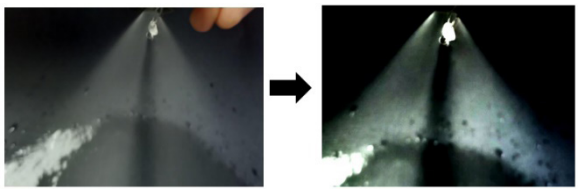


Figura 13.
Imagen con filtro de mediana inyector defectuoso

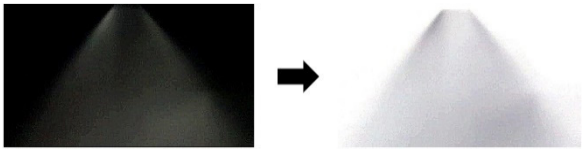


Fuente: Elaboración propia

Una vez aplicado el filtro de mediana, se utilizó un algoritmo de inversión que calcula el valor inverso (1/valor) para cada píxel de la imagen. Posteriormente,

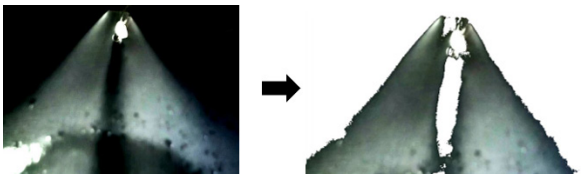
para determinar la proporción del área que presenta el rocío del cono, se optó por la técnica de binarización, que consiste en examinar cada píxel individualmente y cambiar su valor a blanco o negro según corresponda, basándose en la comparación de los valores hexadecimales de color. Las Figuras 14 y 15 muestran los resultados de la inversión y la binarización para el inyector en buen estado y el inyector defectuoso, respectivamente (González Marcos et al., 2006).

Figura 14.
Algoritmo de inversión inyector en buen estado



Fuente: Elaboración propia

Figura 15.
Algoritmo de inversión inyector defectuoso



Fuente: Elaboración propia

Después de aplicar la binarización, se realizó un paso adicional para convertir el fondo de la imagen en color negro. Esto se logró mediante condicionales en formato hexadecimal, también conocido como código de colores RGB. Se estableció la condición de que los colores #EFFFFF se transformaran en el color #000000, lo que permitió conservar el color del rocío del inyector evaluado sin afectar el fondo. Los resultados de este proceso se muestran en la Figura 16 y la Figura 17.

Figura 16.
Binarización inversa inyector en buen estado

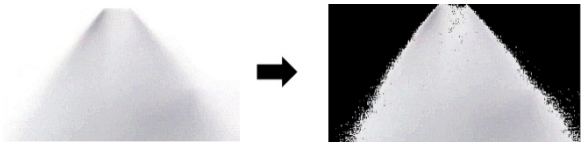


Figura 17.
Binarización inversa inyector defectuoso

Fuente: Elaboración propia

La fase de preprocesamiento finaliza con una inversión de colores y una segmentación binaria. Esta etapa permite definir los bordes del rocío y separarlos del fondo de la imagen. Como resultado, se obtiene el área de rocío del inyector evaluado en color negro, mientras que el fondo aparece completamente blanco. Esta segmentación binaria facilitará un análisis más eficiente del área de rocío para el software. Puedes ver el resultado final de la imagen en la Figura 18 y la Figura 19, que corresponden a los dos inyectores analizados.

Figura 18.
Imagen final inyector en buen estado

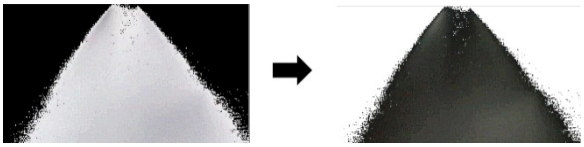


Figura 19.
Imagen final inyector defectuoso

Fuente: Elaboración propia

2.3. Búsqueda de vacíos y rayas

El análisis de las imágenes se llevó a cabo utilizando descriptores de región. Se utilizó una medida de área, que implica contar los píxeles en el área de aspersión del inyector, incluyendo tanto los píxeles negros como los blancos. Luego se realizó un conteo de huecos, que consiste en contar los píxeles de color blanco (con un valor numérico de 0) dentro de la región de rocío del inyector.

La Figura 20 representa un esquema de una imagen binarizada, donde se pueden apreciar diferentes elementos, como la segmentación del borde del cono de aspersión marcada con "X", el cono de aspersión en negro representado con "1", los vacíos dentro del cono y el fondo de la imagen en blanco representado con "0". La ecuación (1) describe el cálculo general del área.

Figura 20.
Esquema de imagen binarizada

0	0	0	0	0	0	0	**X**	**1**	**1**	**X**	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	**X**	**1**	**1**	**1**	**1**	**X**	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	**X**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**X**	0	0	0	0	0
0	0	0	0	**X**	**1**	**1**	**1**	0	0	**1**	**1**	**1**	**X**	0	0	0	0
0	0	0	**X**	**1**	**1**	**1**	**1**	0	0	**1**	**1**	**1**	**1**	**X**	0	0	0
0	0	**X**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	0	0	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**X**	0	0
0	**X**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	0	0	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**X**	0
X	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	0	0	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**X**

Fuente: Elaboración propia

$$Área = \sum_{h=min(\ filas\ )}^{max(\ filas\ )} max\big(columna(h)\big) - min\big(columna(h)\big) \quad (1)$$

2.4. Aplicación del criterio de aceptación

El criterio de aceptación de los inyectores se basa en el Manual de Mantenimiento e Inspección de la Aeronave (Part N° 3021442), que establece que como máximo el 20% del área de aspersión puede tener vacíos o rayas sin combustible. A partir de este criterio, se han definido los condicionales expresados en las ecuaciones (2) y (3).

Inyector aceptado;

$$AT\ x\ 0{,}2 < AH \qquad (2)$$

Inyector rechazado;

$$AT\ x\ 0,2\ \geq\ AH \quad (3)$$

Donde:

AT = Área total del cono de aspersión

AH = área total de huecos dentro del cono de aspersión

3. RESULTADOS

El algoritmo desarrollado, como se muestra en la Figura 21, abarca todo el proceso desde el preprocesamiento hasta la aplicación del criterio de aceptación. Se analizaron 5 inyectores, de los cuales tres eran defectuosos y dos estaban en buen estado. Gracias al escalado y procesamiento, el tiempo de análisis se mantuvo en aproximadamente 0.02 segundos, y el área de conteo era de alrededor de 550 píxeles. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1, y se logró una efectividad del 100% en las pruebas realizadas.

El algoritmo se diseñó con una interfaz de usuario que permite cargar la imagen inicial y ver el resultado de inmediato. Cuando el inyector está en buen estado o cumple con el criterio de aceptación, el LED en el entorno cambia a verde. Además, la interfaz proporciona información sobre la cantidad de píxeles en el área de rocío y la cantidad de píxeles que representan huecos en el área de rocío, como se muestra en la Figura 22.

Tabla 1.

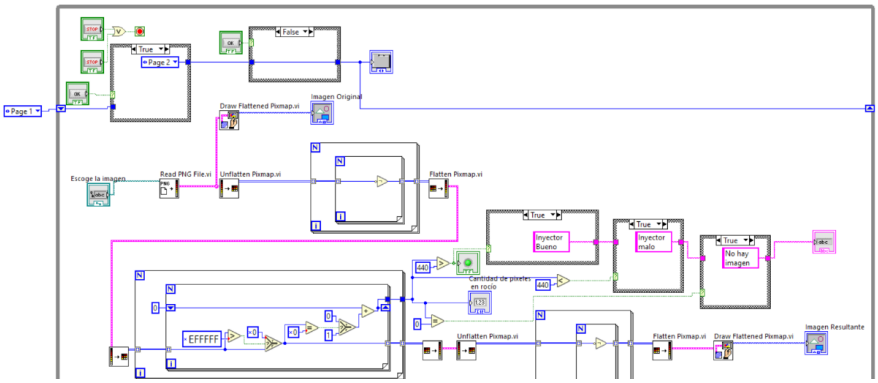
Resultado del análisis de inyectores de referencia

	Inyector 1 (Buen estado)	Inyector 2 (Defectuoso)	Inyector 3 (Defectuoso)	Inyector 4 (Defectuoso)	Inyector 5 (Buen estado)
AT	500	520	530	550	545
AH	90	130	159	116	11
Cirterio	18%	25%	30%	21%	2%
	Aceptado	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Aceptado

Fuente: Elaboración propia

Figura 21.

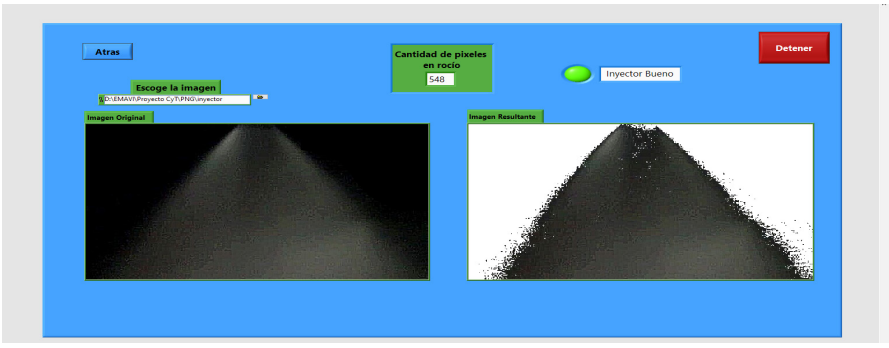
Diagrama de bloques en LabVIEW



Fuente: Elaboración propia

Figura 22.

Interfaz del algoritmo para el análisis de inyectores en buen estado



Fuente: Elaboración propia

4. DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio destacan varios aspectos importantes. Las variables que afectan los resultados del software incluyen el protocolo de adquisición de imágenes, el ambiente, el tipo de luz, la cámara, el fondo y la concordancia de la imagen con las características establecidas. Es fundamental observar que la iluminación frontal y el fondo tienen un impacto significativo en la obtención de detalles necesarios para caracterizar el cono de aspersión. El preprocesamiento de imágenes realizado en forma matricial proporciona no solo la detección de defectos sino también una caracterización geométrica del cono. Otro aspecto relevante es la reducción significativa del tiempo de inspección lograda por el algoritmo, lo que es crucial para la confiabilidad de las aeronaves. Además, la creación de una interfaz de usuario facilita que los operadores realicen el análisis sin necesidad de conocimientos profundos en el área de análisis de imágenes.

Este análisis se diferencia de otros estudios porque aplicó una metodología ágil para el preprocesamiento y análisis de imágenes. Además, se logró una precisión del 100% en los inyectores analizados, aunque es importante señalar que el proceso debe ser validado con una inspección visual detallada para confirmar los resultados.

5. CONCLUSIONES

Debido a la alta intensidad de trabajo que desarrolla un taller aeronáutico y la baja eficiencia de la prueba visual en la detección precisa de la uniformidad de aspersión, se propone la visión artificial como una tecnología emergente. El sistema propuesto contiene una cámara CCD, una fuente de luz blanca, un fondo negro mate y un ordenador.

El preprocesamiento de la imagen es indispensable en el análisis de área; depende de la binarización y segmentación del borde del cono de aspersión. El criterio de evaluación de los inyectores se puede adaptar fácilmente a cualquier metodología comparativa de áreas.

Como resultado de la investigación, se determinó que el algoritmo desarrollado permite evaluar de manera eficaz la condición del inyector casi de manera

instantánea, permitiendo una inspección asertiva y rápida, reduciendo el trabajo en taller y mejorando la confiabilidad de las aeronaves.

Adicionalmente, se proporcionó una interfaz de usuario que permite realizar una inspección del cono de aspersión a los técnicos de las aeronaves, sin la necesidad de conocer los procesos de visión computarizada ni los algoritmos aplicados.

Finalmente, el trabajo abre la puerta al desarrollo de un algoritmo de machine learning a través del análisis de imagen que permita predecir más características del cono de aspersión, del inyector e incluso del motor.
Los resultados experimentales muestran que este método puede identificar si el inyector está calificado, y el efecto de identificación es bueno.

6. REFERENCIAS

Bachalo, W. D. (2000). Spray diagnostics for the twenty-first century. Atomization and Sprays, 10(3–5), 439–474. https://doi.org/10.1615/ATOMIZSPR.V10.I3-5.110

Edwards, T. (2003). Liquid fuels and propellants for aerospace propulsion: 1903-2003. Journal of Propulsion and Power, 19(6), 1089–1107. https://doi.org/10.2514/2.6946

Epstein, A. H. (2014). Aeropropulsion for commercial aviation in the twenty-first century and research directions needed. AIAA Journal, 52(5), 901–911. https://doi.org/10.2514/1.J052713

Fansler, T. D., & Parrish, S. E. (2015). Spray measurement technology: A review. In Measurement Science and Technology (Vol. 26, Issue 1). Institute of Physics Publishing. https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/1/012002

Garrido, S. G. (2011). *Operación y mantenimiento de centrales de ciclo combinado*. Ediciones Díaz de Santos.

González Marcos, A., de Pisón Ascacíbar, F. J., Alba Elías, F., Castejón Limas, M., Ordieres Meré, J. B., & Vergara González, E. P. (2006). Técnicas y Algoritmos Básicos de Visión Artificial. https://publicaciones.unirioja.es/catalogo/monografias/mdi24.shtml

Hildenbrand, S., Staudacher, S., Brüggemann, D., Beyrau, F., Weikl, M. C., Seeger, T., & Leipertz, A. (2007). Numerical and experimental study of the vaporization cooling in gasoline direct injection sprays. Proceedings of the Combustion Institute, 31 II(2), 3067–3073. https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.092

Huang, X., & Long, Y. (2011). Application of computer vision in performance test of aircraft engine nozzle. 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, ICEICE 2011 - Proceedings, 1186–1189. https://doi.org/10.1109/ICEICE.2011.5777501

Hueso, J. A. P., Ruiz, A. E., & Peralta, R. C. (2007). La química del color. Cinvestav, 46–57. https://www.researchgate.net/publication/221939709_La_quimica_del_color

Karl, C., & Bauer, F. (2019). Spray Characterization of an Aircraft Gas Turbine Engine Hybrid Fuel Nozzle. https://tspace.library.utoronto.ca/handle/1807/105117

Lefebvre, A., & V McDonell. (2017). Atomization and Sprays. Boca Raton. Boca Raton: CRC Press. https://www.routledge.com/Atomization-and-Sprays/Lefebvre-McDonell/p/book/9781498736251

McDonell, G. V., & Samuelsen, G. S. (2000). Measurement of fuel mixing and transport in gas turbine combustion. Measurement Science and Technology, 11(7), 870–886. https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/7/304

Nordicnozzle. (2022). NordicNozzle | PT6A, PT6C. https://nordicnozzle.no/pt6a-pt6c-2/

Pratt & Whitney. (1966). PT6A Turboprop Engine: Maintenance Manual. (Rev.). United Aircraft of Canada Limited.

Rivas, A. G. (2003). MOTORES DE TURBINA DE GAS MOTORES TURBOEJES. https://pdfcoffee.com/a-g-rivas-motores-de-turbina-de-gas-pdf-free.html

Settles, G. S., & Hargather, M. J. (2017). A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques. In Measurement Science and Technology (Vol. 28, Issue 4). Institute of Physics Publishing. https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5748

Smith, B. L., & Neal, D. R. (2016). Particle image velocimetry. In Handbook of Fluid Dynamics: Second Edition (pp. 48.1-48.27). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68852-7

Turns, S. R. (2000). An introduction to combustion: concepts and applications. In System (Vol. 499, p. 411). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121

Valencia, A., & Miscione, G. Pietro. (n.d.). La luz: color y mucho más. Óptica cuántica.

CAPÍTULO 5

INVESTIGACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA SEGUNDA CARGA ÚTIL AL SISTEMA SATELITAL FACSAT-2, PARA EL ANÁLISIS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

CT. Lorena Paola Cárdenas Espinosa[*]
https://orcid.org/0000-0003-2473-0932
lorena.cardenas@fac.mil.co

Erick Enrique Gutiérrez Bossa[*]
https://orcid.org/0000-0001-8403-1936
erick.gutierrez@epfac.edu.co

MY. Wilmer Chacón Ardila[*]
https://orcid.org/0000-0001-9082-6321
wilmer.chacon@fac.mil.co

Iván Rodrigo Plata Arango
ivan.plata@ecopetrol.com.co
Ecopetrol

Cristian David Moreno Ortega[*]
cristianmore05@gmail.com

[*] *Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) –*
Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez".
Fuerza Aeroespacial Colombiana

Resumen

En el contexto del diseño de la misión satelital FACSAT-2 Chiribiquete, se ha llevado a cabo una vigilancia tecnológica con el propósito de evaluar las opciones de cargas útiles secundarias, específicamente dirigidas a la medición de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Como resultado de esta vigilancia tecnológica, y en consideración de los requisitos y limitaciones de la misión satelital, se ha determinado la viabilidad técnica del sensor ARGUS 2000 de la casa matriz Thoth. Este sensor se ha consolidado como la única opción en el mercado que cuenta con Certificación Espacial y cumple con las especificaciones técnicas necesarias para ser implementado como carga útil en el nanosatélite FACSAT-2.

El sensor ARGUS 2000 es un espectrómetro de rejilla de bajo costo que opera en las bandas infrarrojas de onda corta (SWIR) en el rango de 1000 a 1650 nm. Presenta características como una masa inferior a 280 g, un ángulo de visión de 0,15 grados, una óptica frontal de 15 mm y un consumo de energía inferior a 1 W. Su integración en el bus satelital de FACSAT-2 tiene como objetivo obtener firmas espectrales de absorción que facilitarán la identificación de GEI, principalmente en el territorio colombiano.

Palabras clave: Carga útil, espectrómetro, FACSAT-2, gases de efecto invernadero, monitoreo remoto, sensores satelitales.

Abstract. As part of the design of the FACSAT-2 Chiribiquete satellite mission, technological surveillance is carried out to verify the options of second payloads, whose objective is the measurement of Greenhouse Gases (GHG). As a result of this technological surveillance and based on the requirements and restrictions of the satellite mission, the technical feasibility of the ARGUS 2000 sensor of the parent company Thoth is verified, consolidating as the only sensor in the market with Space Certification that meets the technical specifications required to be payload of the FACSAT-2 nanosatellite. The ARGUS 2000 sensor is a low-cost grating spectrometer operating in the shortwave infrared (SWIR) bands in the range of 1000 to 1650 nm, a mass of less than 280 g, a viewing angle of 0.15 degrees and a 15 mm front optic, and a power consumption of less than 1 W. Integrated in the FACSAT-2 satellite bus, this instrument is expected to obtain absorption spectral signatures that will allow the identification of GHGs, mainly over the Colombian territory.

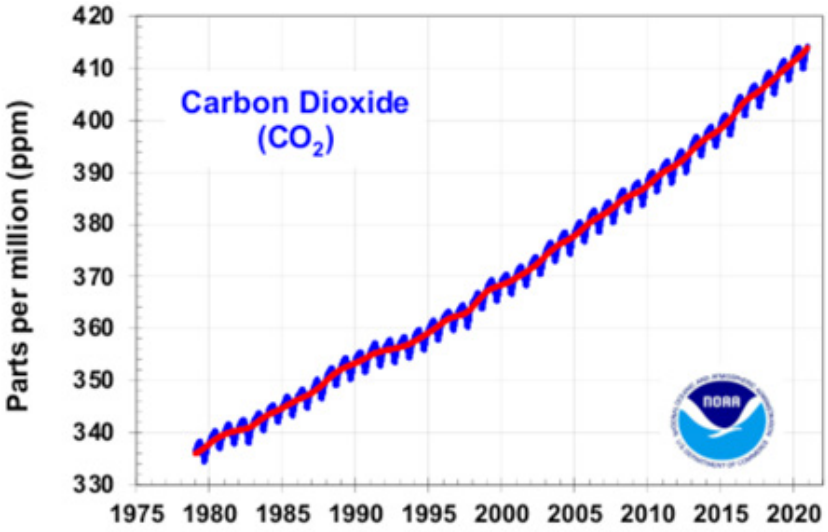
Keywords: Greenhouse gases, payload, remote sensing, FACSAT-2, satellite sensor, spectrometer.

1. INTRODUCCIÓN

Según el último informe del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), publicado en agosto de 2021, se atribuye a las actividades humanas un calentamiento de aproximadamente 1,1 ºC desde 1850-1900 debido a las emisiones de gases de efecto invernadero. Se prevé que la temperatura mundial promediada durante las dos próximas décadas alcance o supere un calentamiento de 1,5 ºC. El informe concluye que, a menos que las emisiones de gases de efecto invernadero se reduzcan de manera inmediata, rápida y a gran escala, la meta de limitar el calentamiento a cerca de 1,5 ºC o incluso a 2 ºC será inalcanzable.

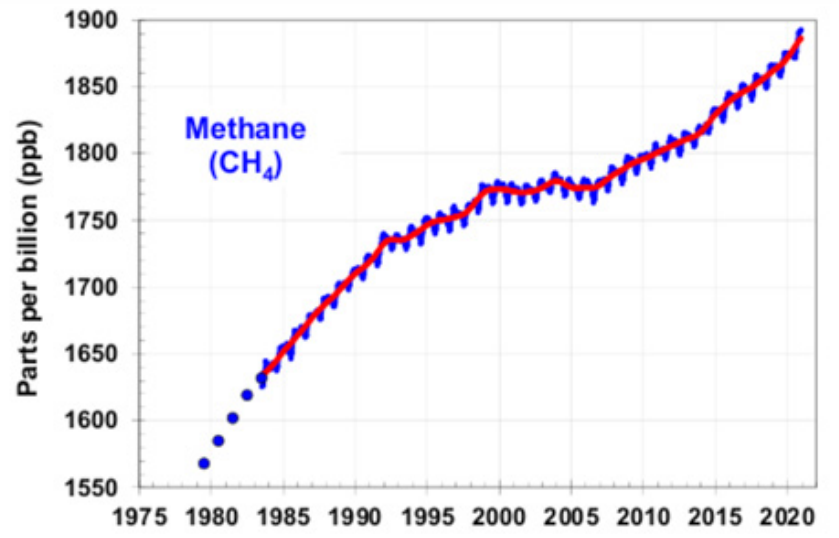
El Índice Anual de Gases de Efecto Invernadero (AGGI, por sus siglas en inglés) enumera el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los clorofluorocarbonos (CFC-11, CFC-12) como los cinco principales gases de efecto invernadero que contribuyen alrededor del 96% del aumento del calor atrapado en la atmósfera debido a la actividad humana desde 1750, marcando el inicio de la Revolución Industrial. Actualmente, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) representan más del 80% del total de emisiones antropogénicas (Boesch et al., 2021). Como se muestra en la Figura 1, las concentraciones atmosféricas de CO_2 han aumentado desde 344 ppm en 1984 (Yue et al., 2016) a 410 ppm en 2020 (Boesch et al., 2021). Tras el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) es el segundo gas emitido por la actividad humana que más contribuye al efecto invernadero. Desde 1980, su concentración global en la atmósfera ha aumentado en aproximadamente 300 PPB, como se ilustra en la Figura 2.

Figura 1.
Histórico de dióxido de carbono



Fuente: NOAAGlobal Monitoring Laboratory.

Figura 2.
Histórico de dióxido de metano



Fuente: NOAAGlobal Monitoring Laboratory

En Colombia, se identifican cinco efectos del calentamiento global que requieren atención inmediata: el derretimiento de los glaciares, el blanqueamiento de los corales, la pérdida de playas y la erosión costera, la aparición de eventos climáticos extremos y la pérdida de biodiversidad. Por este motivo, en el marco de la actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) conforme a los Acuerdos de París, que establecen los compromisos de cada país para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y adaptarse al cambio climático, Colombia se ha fijado como objetivo reducir sus emisiones en un 51% para el año 2030 (Sostenibilidad, 2018).

Adicionalmente, el CONPES 3983 (2020) en calidad de política pública exige la implementación de estrategias que promuevan el conocimiento y la curiosidad científica en asuntos espaciales. Esto tiene como finalidad superar las barreras para el emprendimiento y el desarrollo tecnológico, impulsar la demanda de bienes y servicios relacionados con el espacio y potenciar las condiciones que habiliten el cumplimiento de la Política de Desarrollo Espacial y Competitividad Nacional (CONPES, 2020).

En este artículo de revisión, se propone una metodología para llevar a cabo la vigilancia tecnológica de misiones e instrumentos de monitoreo de Gases de Efecto Invernadero (GEI), con énfasis en misiones de nanosatélite que emplean espectrómetros en el infrarrojo cercano. Los resultados de esta vigilancia tecnológica se presentan en la sección de resultados, que incluye detalles técnicos de los instrumentos a implementar, ejemplos de adquisición de datos y productos obtenidos en misiones satelitales de referencia. Finalmente, en la sección de discusión, se argumenta el potencial impacto a nivel global y local que tendrá la incorporación del espectrómetro ARGUS 2000 en la misión satelital FACSAT-2.

2. METODOLOGÍA

En consonancia con la Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial de la Proyección Espacial, la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) asume un papel de liderazgo en el desarrollo de capacidades espaciales nacionales, orientadas a garantizar la autonomía y libertad de acción necesarias para proteger los intereses del país. En este contexto, el Gobierno de Colombia,

bajo la Presidencia de la República, se ha fijado la meta de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en un 51% para el año 2042. Para alcanzar este objetivo, es esencial llevar a cabo un monitoreo preciso del impacto generado por las industrias y evaluar los resultados de los planes de acción destinados a la mitigación de la generación de GEI (Fuerza Aérea Colombiana, 2019).

Por otro lado, el Grupo Ecopetrol se ha propuesto reducir sus emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en un 25% de acuerdo con las proyecciones estimadas para 2030. Esta reducción implicaría una disminución de entre 5 y 6 millones de toneladas de CO_2 en esta década, equivalente a la restauración de aproximadamente 500,000 hectáreas de tierra, lo que representa 13 veces el área urbana de Bogotá. Este compromiso contribuye significativamente a los objetivos nacionales relacionados con la reducción de emisiones (Ecopetrol, 2021). Para cumplir con estos compromisos, se requiere el desarrollo de un estudio que establezca capacidades técnicas y operativas en el ámbito de la observación terrestre a través de un satélite. Esto se alinea con la política pública CONPES 3983 (2020), que busca promover el conocimiento y el interés científico en cuestiones espaciales, superar obstáculos relacionados con el emprendimiento y la tecnología, y estimular la demanda de bienes y servicios relacionados con el espacio para fomentar la Política de Desarrollo Espacial y Competitividad Nacional.

La Fuerza Aeroespacial Colombiana cuenta con una experiencia sólida de más de tres años en la operación autónoma del nanosatélite FACSAT-1. Como parte de su continuo compromiso con el desarrollo espacial, la FAC está inmersa en el codiseño de la misión FACSAT-2 y la posterior puesta en órbita de este nanosatélite (Rueda R., 2022). Al mismo tiempo, Ecopetrol tiene la necesidad de acceder a mediciones continuas para avanzar en su objetivo de reducir un 51% las emisiones de GEI para 2030. Esto implica la independencia de programaciones comerciales y la obtención de una resolución óptima, lo que a menudo no se logra con satélites de agencias espaciales tradicionales (véase Figura 3).

Figura 3.
Necesidades por parte de la FAC y ECOPETROL

Fuente: Elaboración propia

En el contexto actual, se identifican dos misiones corporativas que, a través de la colaboración, pueden contribuir a abordar una necesidad evidente tanto a nivel nacional como internacional. En este sentido, una de las metodologías fundamentales para diseñar una misión espacial implica la especificación de las cargas útiles necesarias para cumplir con los objetivos de la misión. Por lo tanto, en el proceso metodológico de diseño de la misión FACSAT-2, que representa el segundo satélite de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), es esencial llevar a cabo una vigilancia tecnológica como método de verificación para identificar posibles cargas útiles. Estas cargas útiles no solo deben cumplir con los requisitos técnicos del satélite FACSAT-2, sino que también deben contribuir al objetivo planteado por ECOPETROL (la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero o GEI).

Por lo tanto, se ha llevado a cabo una vigilancia tecnológica enfocada en satélites y sensores diseñados para medir GEI, tomando en cuenta las restricciones impuestas por el bus satelital FACSAT-2, que es un CubeSat de 6 unidades. Dado que la carga útil principal del satélite, que es una cámara multiespectral, ya ocupa el 25 % de su volumen, se genera una restricción de tamaño para una posible segunda carga útil.

La vigilancia tecnológica comienza con la identificación de instrumentos diseñados para la medición de GEI, que se basan principalmente en la radiación solar reflejada por la superficie terrestre. Sin embargo, algunos de estos instrumentos pueden utilizar la radiación emitida por láseres en la Tierra o satélites artificiales. Los instrumentos que miden la radiación en longitudes de onda específicas se conocen como espectrómetros.

Como resultado de la revisión bibliográfica y la vigilancia tecnológica, se han identificado investigaciones a nivel regional y mundial relacionadas con los GEI y su impacto en el cambio climático. Este proceso permite establecer un punto de referencia para los desarrollos requeridos en este proyecto. A continuación, se presentan algunas misiones que están actualmente activas y otras que han cumplido su ciclo de vida útil. Estas misiones están equipadas con cargas útiles diseñadas para medir GEI utilizando diversos métodos y sensores, y se consideran importantes referencias para el proyecto.

En las últimas dos décadas, se han desarrollado dispositivos instalados en satélites que permiten estimar las concentraciones de gases de efecto invernadero, especialmente CO2, CH4 y NO2. Estas estimaciones se basan en la radiación solar reflejada por la superficie terrestre y detectada una vez que atraviesa la atmósfera. Agencias aeroespaciales de renombre mundial, como la Agencia Espacial Europea (ESA), la Administración Nacional Aeronáutica y Espacial (NASA) y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), han desempeñado un papel crucial en el despliegue de instrumentos de monitoreo de GEI a bordo de satélites. Estos satélites emplean diversos tipos de espectrómetros que se diferencian en términos de robustez, resolución espacial, rango y resolución espectral.

2.1. SCIAMACHY

De acuerdo con el Informe del Comité de Observación de la Tierra, la misión satelital SCIAMACHY representó una contribución nacional a la carga útil del satélite ENVISAT, proporcionada por países como Alemania, los Países Bajos y Bélgica. ENVISAT fue lanzado el 28 de febrero de 2002 y operó hasta el 8 de abril de 2012. Este satélite fue colocado en una órbita polar sincrónica con el sol, a una altitud de 790 km, con un período orbital de 100,6 minutos y un período de repetición de rastreo de 35 días (equivalente a 501 órbitas por ciclo).

SCIAMACHY fue el primer satélite que contó con un sensor espacial diseñado específicamente para llevar a cabo observaciones espectrales en las bandas del espectro cercano al infrarrojo (NIR) y en el infrarrojo de onda corta (SWIR) de la luz solar reflejada. Estas observaciones podían ser utilizadas para obtener estimaciones de concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). SCIAMACHY recopiló espectros de resolución moderada en las bandas de absorción de CO_2 en el infrarrojo de onda corta (SWIR) cerca de 1580 y 1610 nm, así como en la banda de absorción de CH_4 cerca de 1670 nm. Además, adquirió espectros de alta resolución en las bandas de absorción de CO_2 cercanas a 1940 y 2040 nm, y en las bandas de absorción de CH_4 comprendidas entre 2265 y 2385 nm. Es relevante mencionar que, durante gran parte de la misión, estos canales de alta resolución se vieron afectados por la deposición de hielo de agua en los detectores (Zhang, 2018).

2.2. GOSAT (ibuki)

El Satélite de Observación de Gases de Efecto Invernadero (GOSAT), también conocido como Ibuki, es un proyecto conjunto llevado a cabo por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), el Instituto Nacional de Ciencias Ambientales (NIES) y el Ministerio de Medio Ambiente (MOE) de Japón. GOSAT fue lanzado el 23 de enero de 2009 y ha estado transmitiendo datos científicos desde abril de 2009 (Kuze, Suto, Shiomi, Nakajima, & Hamazaki, 2009). Tras completar su misión científica nominal en 2014, GOSAT actualmente se encuentra en su misión extendida. El satélite opera en una órbita sincrónica con el sol, ubicada a una altitud de 666 km y con una inclinación de 98°, con un período de repetición de seguimiento en tierra de 3 días (44 órbitas). A continuación, se presentan las características clave de este satélite (Zhou et al., 2021):

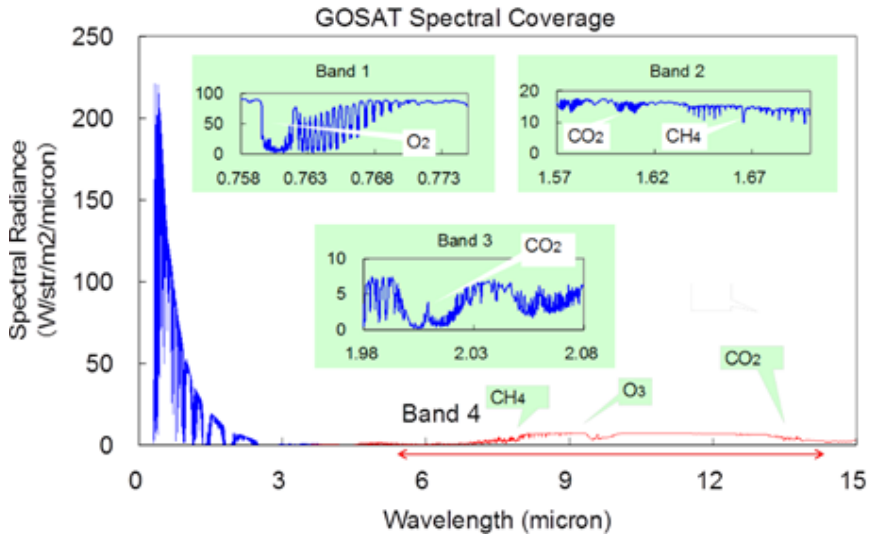
- Altitud orbital: 666 km
- Inclinación orbital: 98°
- Período de repetición de seguimiento en tierra: 3 días (44 órbitas)

El equipo de GOSAT se compone de dos instrumentos principales, que son el espectrómetro por transformada de Fourier (FTS) del sensor térmico e infrarrojo cercano para observaciones del carbono (TANSO) y el generador de imágenes de nubes y aerosoles (CAI) de TANSO. Estos instrumentos

fueron los primeros en ser diseñados para el monitoreo global de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) en una amplia variedad de rangos espectrales y resoluciones espaciales. Las observaciones realizadas por GOSAT (consulte la Figura 4) han sido fundamentales para restringir los flujos de CO_2 y CH_4 en la biosfera y los océanos a nivel regional, además de estudiar las fuentes antropogénicas de estos gases (Zhou et al., 2021).

Figura 4.

Identificación de líneas de absorción observadas por TANSO FTS (GOSAT) del CO_2 y CH_4



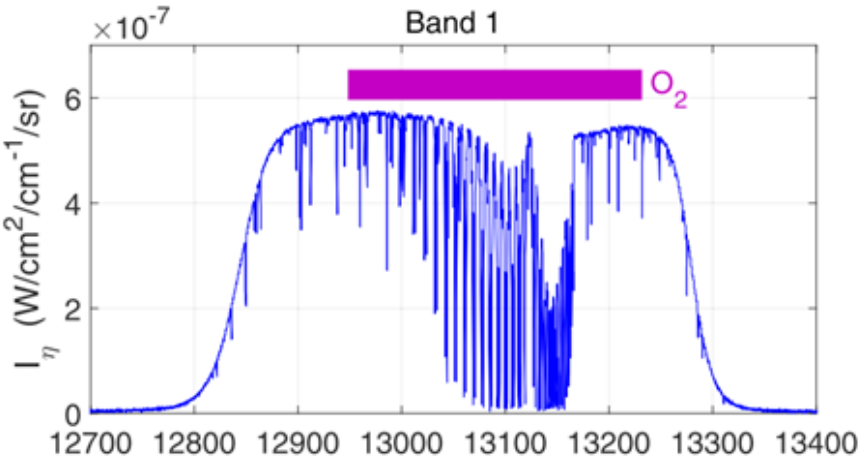
Fuente: NASA-JPL / JAXA

El instrumento TANSO FTS, detecta radiación en 4 bandas, las cuales se presentan en las siguientes ilustraciones, permitiendo evidenciar la presencia de ciertos gases como son O_2, CH_4, CO_2, H_2O, respectivamente: Bandas 1 visible entre 12800 -13300 cm^{-1}(Figura 5) banda 2 visible entre 5400 - 6600 cm^{-1} (Figura 6) y banda 3 visible 4600 - 5400 cm^{-1} (Figura 7) en la región de infrarrojo cercano del espectro electromagnético y banda 4 visible entre 800y 1600 cm^{-1} (Figura 8), en el infrarrojo térmico (Wang et al., 2021).

El instrumento TANSO FTS detecta radiación en cuatro bandas, que se presentan en las siguientes ilustraciones, permitiendo la detección de la presencia de ciertos gases como el oxígeno (O_2), el metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O). Estas bandas se describen a continuación:

- **Banda 1:** Visible entre 12,800 y 13,300 cm^-1 (consulte la Figura 5).
- **Banda 2:** Visible entre 5,400 y 6,600 cm^-1 (consulte la Figura 6).
- **Banda 3:** Visible entre 4,600 y 5,400 cm^-1 (consulte la Figura 7) en la región de infrarrojo cercano del espectro electromagnético.
- **Banda 4:** Visible entre 800 y 1,600 cm^-1 (consulte la Figura 8) en la región del infrarrojo térmico (Wang et al., 2021).

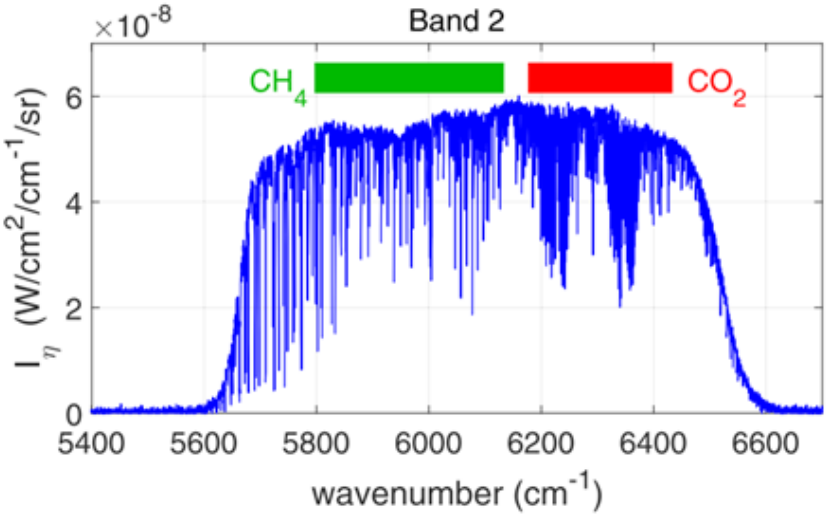
Figura 5.
Ejemplo de espectro adquirido por GOSAT TANSO-FTS, banda 1 (O2)



Fuente: Zhao et al. (2022).

Figura 6.

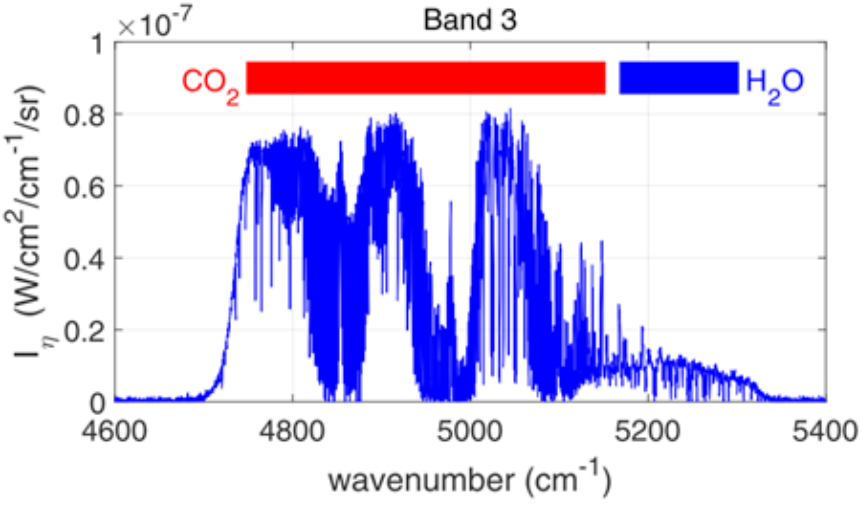
Ejemplo de espectro adquirido por GOSAT TANSO-FTS, banda 2 (CH4 y CO2)



Fuente: Zhao et al. (2022).

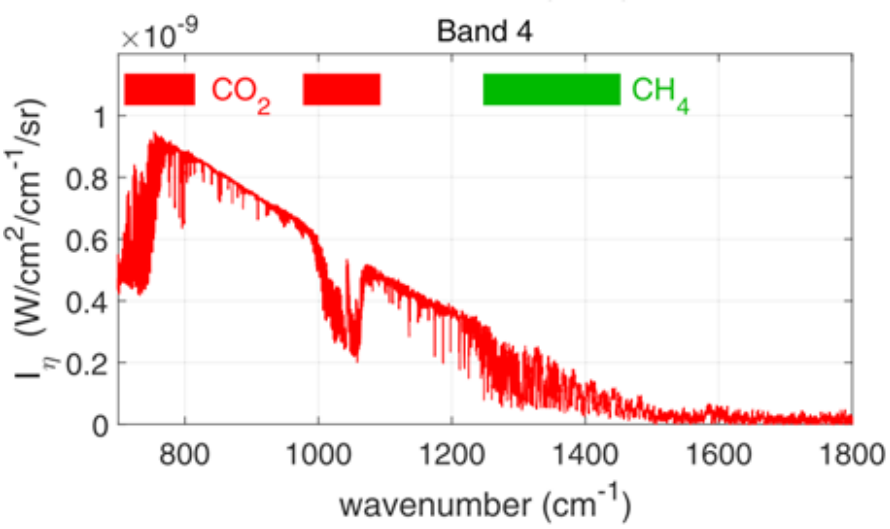
Figura 7.

Ejemplo de espectro adquirido por GOSAT TANSO-FTS, banda 3 (CO2 y H2O)



Fuente: Zhao et al. (2022).

Figura 8.
Ejemplo de espectro adquirido por GOSAT TANSO-FTS, banda 4 (CO2 y CH4)



Fuente: Zhao et al. (2022).

Figura 9.
Satélite GOSAT

Fuente:(for Environmental Studies, 2022)

Tabla 1.
Características Satélite GOSAT

Característica	Valor
Dimensiones	2,0 m x 1,8 m x 3,7 m
Masa	1750 kg
Resolución espacial	0.5 km en UV/VIS/NIR y 1.5 en SWIR
Swath width	1000 km en UV/VIS/NIR y750 km en SWIR
Altura	613 km

Fuente: (for Environmental Studies, 2022)

2.3. OCO-2

Según lo expuesto por los autores en el artículo "Monitoring Greenhouse Gases from Space," el Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) es un dispositivo diseñado exclusivamente para el monitoreo de CO2 en tres (3) bandas: 0.76 µm (O2), 1.61 y 2.06 µm (CO2). Fue desarrollado por la NASA y lanzado el 2 de julio de 2014. El OCO-2 forma parte de la Constelación de la Tarde (A-Train) y se encuentra a una altitud de 705 km. Opera en una órbita sincrónica al sol con un período de 98.8 minutos y una hora local media de 13:36 para su nodo ascendente. Además, tiene un período de repetición en Tierra de 16 días (233 órbitas) (L´Ecuyer & Jiang, 2010).

El OCO-2 completó su comprobación en órbita y comenzó a enviar observaciones científicas el 6 de septiembre de 2014. Luego de completar su misión nominal de 2 años en octubre de 2016, ha continuado en una misión extendida de 3 años. En la Figura 10 y la Tabla 2 se presentan las características generales de este satélite.

Las observaciones de CO2 y SIF del OCO-2 realizadas durante sus primeros 4 años en órbita proporcionan una descripción global de alta resolución del ciclo del carbono atmosférico. Estas observaciones indican una intensa reducción primaveral en el hemisferio norte asociada a la biosfera terrestre. También se observan anomalías persistentes de CO2 sobre regiones con intensa combustión de combustibles fósiles, como Europa occidental y las costas orientales de China y Norteamérica. Las zonas con una intensa quema de biomasa, como el

centro de África, el Amazonas y el sudeste asiático, también muestran un CO2 anormalmente alto en algunas épocas del año (Boesch et al., 2021).

Figura 10.
Satélite OCO-2

Fuente: (NASA, 2022)

Tabla 2.
Características principales satélite OCO-2

Característica	Valor
Dimensiones	2,0 m x 1,8 m x 3,7 m
Masa	409 kg
Resolución espacial	Tres espectrómetros de alta resolución 1.29 km × 2.25 km
Swath width	10.6 km
Altura	700 km

Fuente: (NASA, 2022).

2.4. TanSat

El satélite chino de observación del CO2, TanSat, se lanzó el 22 de diciembre de 2016 y comenzó su misión científica nominal tres años y nueve meses después. TanSat fue desarrollado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de China (MOST), la Academia China de Ciencias (CAS) y la Administración Meteorológica de China (CMA). Inicialmente se insertó en una órbita

sincrónica al sol de aproximadamente 708 km de altitud, con una inclinación de 98.07°, 13:39 hora local media (ascendente) y un período de repetición de seguimiento en tierra de 16 días (233 órbitas).

Esta órbita estaba ubicada aproximadamente 2.5 km por encima de la altitud media de la constelación A-Train, pero era algo más elíptica, de modo que TanSat pasaba por la A-Train con un período sinódico de aproximadamente 134 días. Sin embargo, actualmente no hay planes para que TanSat se convierta en miembro de la constelación A-Train debido a la complejidad de las operaciones necesarias para el vuelo en formación.

TanSat integra dos cargas útiles: el espectrómetro de rejilla de CO2 atmosférico (ACGS) y el captador de polarización de nubes y aerosoles (CAPI). Los sondeos registrados por el ACGS se utilizarán para recuperar el CO2, mientras que los datos del CAPI se emplearán para corregir las interferencias de las nubes y los aerosoles. El ACGS es un espectrómetro de rejilla de imagen de alta resolución espectral con 3 canales, similar al espectrómetro OCO-2 (Bi, Yang, & Wang, 2017).

2.5. TROPOMI

En 2017, la Agencia Espacial Europea (ESA) puso en funcionamiento el instrumento Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) a bordo del satélite Copernicus Sentinel-5 Precursor. Equipado con un espectrómetro multiespectral, TROPOMI mide en cuatro (4) bandas dentro del rango UV-SWIR, lo que le permite monitorear los principales agentes químicos en la atmósfera, incluido el metano. Ninguno de los picos de CO2 se encuentra dentro de las bandas de detección de radiación de este instrumento.

Figura 11.
Satélite Tropomi

Fuente: (Netherlands Space, 2022)

Tabla 3.

Características principales satélite TROPOMI

Característica	Valor
Dimensiones	1.4 m x 0.65 mx 0.75m3
Masa	206.6 kg
Resolución espacial	7 x 20 km en UV y 7 X 7 km en SWIR
Swath width	2600 km
Altura	824 km

Fuente: (NASA, 2022).

2.6. Misiones homólogas

Después de verificar los principales sistemas satelitales y sensores, se procede a evaluar misiones satelitales que puedan ser homólogas o cuyos sensores cumplan con las especificaciones técnicas para formar parte de la misión satelital tipo CubeSat FACSAT-2. A continuación, se presenta una breve exposición de estas misiones y en la sección de resultados, se proporciona información detallada de las mismas como resultado de la vigilancia tecnológica realizada en este artículo de revisión. Se presenta un resumen de las características técnicas más relevantes de las misiones e instrumentos para la medición de gases de efecto invernadero (GEI) en las Tablas 4 y 5. Estos instrumentos varían en robustez y se centran en la detección de CO_2 y CH_4.

En abril de 2008, el Argus 1000 desarrollado por Thoth Technology se lanzó como carga útil principal a bordo de la misión del nanosatélite CanX-2, desarrollado por UTIAS/SFL (University of Toronto, Institute for Aerospace Studies/Space Flight Laboratory). Este espectrómetro fue diseñado para registrar espectros de radiancia en el rango infrarrojo de 900 a 1700 nm. Sus mediciones permitieron recuperar concentraciones de CO_2 en algunas regiones de Canadá (Jagpal, 2011).

En el año 2020, como resultado de un proyecto de colaboración entre la Universidad de Ciencia y Tecnología de Khalifa (KUST) y la Universidad Americana de Ras AlKhaimah (AURAK), con financiamiento de la Agencia Espacial de los Emiratos Árabes Unidos (UAE-SA), se lanzó con éxito al espacio el CubeSat de 3U llamado MeznSat. Este nanosatélite cuenta con el Argus 2000 como carga útil principal. Este espectrómetro permite monitorear las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera realizando observaciones de radiancia (Jallad et al., 2019).

Tabla 4.

Compendio de características técnicas de los sensores que monitorean CH4 y CO2

Satélite (Fecha)/ Senso	Resolución espacial [km	Swath [km]	Masa [kg]/ Dimensiones [m]]	Rango / resolución espectral (nm)	Objetivo
Envisat (2002.3)/ SCIA-MACHY	30 × 60	960	198 kg 1.8 m × 0.9 m × 1.0 m	214 - 334 / 0.24 300 - 412 / 0.26 383 - 628 / 0.44 595 - 812 / 0.48 773 - 1063 / 0.54 971 - 1773 / 1.48 1934 - 2044 / 0.22 2259 - 2386 / 0.26	CH_2O, CH_4, CO, CO_2 H_2O, NO, NO_2, NO_3 N_2O, O_2, O_3, SO_2
AQUA (2002.5)/ AIRS	13.5	1650	177 kg 1.4 m × 0.5 m × 0.76 m	410 - 940 (N/A) 3740 - 4608 / 4.25 6200 - 8224 / 6.76 8803 - 15385 / 11.83	CH_4, CO_2, H_2O, NO_2 O_3, SO_2
AURA (2004.7)/ TES	0,53	5.3 × 8.5	385 kg — m × — m × — m	3279 - 5263 / 0.16 5128 - 9091 / 0.49 8696 - 12195 / 0.88 11111 - 15385 / 1.40	CH_4, CO, CO_2, H_2O, NO, NO_2, N_2O, O_3, SO_2
MetOp (2006.10)/ IASI	24	130	236 kg 1.2 m x 1.1 m x 1.3 m	3623 - 5000 / 0.63 5000 - 8265 / 1.71 8265 - 15504 / 6.01	CH_4, CO, CO_2, H_2O, NO, NO_2, N_2O, O_3, SO_2
CanX-2 (2008.04) Sathyamba-Sat(2016)/ ARGUS 1000	1.4	1	0.228 kg 1.05 m × 1.06 m × 0.08 m	900 - 1700 / 6	CH_4, CO, CO_2,H_2O, O_2

GOSAT (2009.1)/ TANSO-FTS	10.5	790	329 kg 1.2 m × 1.1 m × 0.7 m	758 - 775 / 0.01 1562 - 1724 / 0.06 1923 - 2083 / 0.09 5556 - 14286 / 4.08	CH_4, CO, CO_2, H_2O, NO, NO_2, N_2O, O_2, O_3, SO_2
OCO2 (2014.7)/ OCO	1.29 ×2.25	10 km	150 kg 1.6 m × 0.4 m × 0.6 m	758 - 772 / 0.04 1594 - 1619 / 0.08 2042 - 2082 / 0.10	CO_2

Nota. Recopilado de Streets (2013) y Wang (2021) y la base de datos OSCAR (https://space.oscar.wmo.int)

Tabla 5.

Compendio de características técnicas de los sensores que monitorean CH4 y CO2

Satélite (Fecha)/ Sensor	Resolución espacial [km]	Swath [km]	Masa [kg]/ Dimensiones[m]	Rango / resolución espectral [nm]	Objetivo
TanSat (2016.12) /	3 × 4	18	180 kg	758 - 776 / 0.044 1594 - 1624 / 0.125	CO_2
ACGS				2041 - 2081 / 0.165	
Sentinel- 5P (2017.10) / TROPOMI	7	2600	204.3 kg 1.40 m x 0.65 m x 0.75 m	270 - 495 / 0.55 710 - 775 / 0.55 2305 - 2385 / 0.25	CH_4, CO, H_2O, NO, NO_2, N_2O, O_2, O_3, SO_2
FY-3 (2017.11) / GAS	10	100	—	752 - 769 / 0.04 1563 - 1724 / 0.08 1923 - 2083 / 0.12 2198 – 2381 / 0.15	CO_2,CH_4, N_2O
GF-5 (2018.5) / GMI	10.3	800	109 kg 0.79 m x 0.69 m x 0.575 m	759 - 769 / 0.027 1568 - 1583 / 0.067 1642 - 1658 / 0.067 2043 - 2058 / 0.113	CO_2, CH_4

GOSAT2 (2018.10), /TANSO-FTS2	10.5	790	329 kg	753 - 772 / 0.01 1560 - 1689 / 0.06 1919 - 2381 / 0.11 5587 - 8403 / 1.41 8403 - 14306 / 4.09	CH_4, CO, CO_2, H_2O, NO, NO_2, N_2O, O_2, O_3, SO_2
PRISMA (2019.03) / PRISMA	30	30	<90 kg 0.77 m x 0.59 m x 0.78 m	400 - 1010 / 12 920 - 2505 / 12	CH_4, CO, CO_2, H_2O, NO, NO_2, N_2O, O_2, O_3, SO_2
MenzSat (2020.03) / ARGUS 2000	1.25	1	0.228 kg 0.045 mx 0.05 m x 0.08 m	1000 – 1600 / 6	CO_2, H_2O, O_2

Nota. Recopilado de Streets (2013) y Wang (2021) y la base de datos OSCAR (https://space.oscar.wmo.int)

3. RESULTADOS

Después de la vigilancia tecnológica, se propone la implementación de un espectrómetro de grado espacial en el satélite de observación de la Tierra FACSAT-2. A través de un programa de transferencia de tecnología y conocimiento con un aliado tecnológico, se llevará a cabo la integración de la carga secundaria con el propósito de crear capacidades para el monitoreo de gases de efecto invernadero (GEI) (Thoth-Technology-Inc, 2018).

Este resultado del estudio se basa en una exhaustiva vigilancia tecnológica en la que se identificaron las siguientes misiones tipo CubeSat de referencia:

MiniCarb (ver Figura 12): es una misión conjunta de 6U CubeSat con un instrumento novedoso diseñado para medir los gases de efecto invernadero atmosféricos en una órbita terrestre baja. Se ha desarrollado un bus CubeSat

6U para soportar la carga útil de 4U basado en la arquitectura CubeSat Next Generation Bus (C-NGB) de 3U y diseño (Pool, 1999). El radiómetro láser heterodino de 4U desarrollado por el equipo MiniCarb se basa en un instrumento terrestre similar desarrollado en el Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA para mediciones de CO2, CH4 y H2O en la columna atmosférica. El equipo realizó algunas modificaciones al diseño inicial para reducir la masa, el volumen y la potencia del LHR, así como para eliminar el uso de piezas móviles problemáticas como la óptica, que fue sustituida por un interruptor óptico. Uno de los desafíos más importantes para los autores es que los interruptores ópticos no están diseñados para su uso a ~1550 nm, donde las características de absorción del metano tienen una intensidad de línea lo suficientemente fuerte como para ser medida en la atmósfera (las características de absorción del CO2 y H2O, en cambio, también tienen buena intensidad de línea en longitudes de onda más bajas, como la región de 1570 nm). Por esta razón, estos componentes no suelen funcionar con la máxima eficiencia y es probable que, a medida que avance la tecnología, el rendimiento de este diseño también mejore (Wilson et al., 2017). Mini-Carb observa la región entre la troposfera superior y la estratosfera inferior, entre 9.6 y 29 km sobre la superficie de la Tierra, con un radiómetro láser heterodino de 15 x 20 x 10 cm y menos de 3 kg (Krebs, 2022).

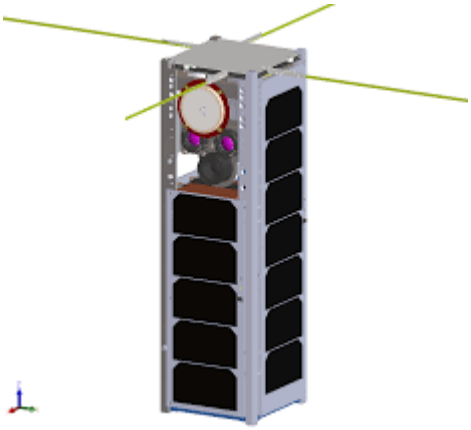
Figura 12.
Satélite MiniCarb

Fuente: (Wilson et al.,2017)

- **BeaverCube**

BeaverCube es un CubeSat 3U construido por estudiantes que tiene dos objetivos principales: uno científico y otro tecnológico. El objetivo científico de BeaverCube es demostrar que es posible desarrollar y aplicar plataformas que puedan aprovechar las relaciones estadísticas entre la temperatura y las propiedades bio-ópticas, como la absorción de luz por la materia orgánica. El objetivo tecnológico de BeaverCube es demostrar la propulsión por electrospray para CubeSats. BeaverCube se lanzó a finales de 2020 utilizando un NanoRacks CubeSat Deployer y fue desplegado desde la Estación Espacial Internacional (ISS) en una órbita de aproximadamente 410 km de altitud y 51,6° de inclinación (ver Figura 13). Para realizar las mediciones de temperatura de la superficie del mar y de la cima de las nubes, BeaverCube albergará tres cámaras como cargas útiles: dos cámaras infrarrojas FLIR Boson y una cámara VIS mvBlueFOX. Las cámaras están orientadas hacia el nadir durante las mediciones. La cámara infrarroja de longitud de onda larga FLIR es una cámara de imagen térmica de costo relativamente bajo que utiliza un conjunto de microbolómetros de óxido de vanadio no refrigerados. El equipo de BeaverCube eligió esta cámara por su disponibilidad comercial, rango espectral, resolución espacial y características de baja masa. El sensor de la cámara FLIR Boson y la lente pesan 38 g, y su baja masa permite incorporar dos de estas cámaras al diseño de la carga útil. Una cámara se encarga de adquirir las imágenes de control, mientras que la otra adquiere las imágenes utilizando el filtro de bloqueo óptico con un rango espectral de 750 - 1350 nm. Además, la cámara LWIR tiene una distancia focal de 13,5 mm y un campo de visión (FOV) de 16°, lo que proporciona una resolución en tierra de 348 m y una huella de 9.911 km² a una altitud orbital de 400 km y 51,6°. BeaverCube medirá las emisiones infrarrojas de la superficie de las nubes y del océano, y el espectro de longitud de onda visual de la misma trayectoria terrestre (Pereira et al., 2020).

Figura 13.
Satélite BeaverCube



Fuente: (Pereira et al., 2020)

- **QBITO**

El CubeSat QBito es uno de los 50 CubeSats que se están desarrollando para el proyecto QB50, que tiene como objetivo realizar mediciones multipunto in situ en la baja termosfera e investigar la reentrada en la atmósfera. Estos 50 CubeSats son desarrollados por una red internacional de más de 90 universidades e instituciones de investigación de todo el mundo que trabajan y comparten conocimientos para lograr una misión exitosa. De los 50 CubeSats, 40 son CubeSats dobles equipados con sensores atmosféricos, y 10 son CubeSats dobles o triples destinados a demostraciones científicas y tecnológicas (ver Figura 14).

La principal motivación educativa del proyecto QBito es formar a estudiantes en tecnologías espaciales y en ingeniería de sistemas espaciales. Su tarea principal es operar el INMS (Espectrómetro de masas de iones neutros), que es la carga útil principal a bordo del CubeSat, y estudiar las propiedades de la termosfera inferior. Las simulaciones de campos de temperatura y viento a dos altitudes en la termosfera se realizan calculando las temperaturas y los vientos mediante un modelo termosférico de circulación general en 3D (Fernandez Fraile et al., 2014).

Figura 14.
Satélite Qbito

Fuente: (Fernández Fraile et al., 2014).

- **COPPER**

COPPER es una misión CubeSat del SSRL (Space Systems Research Laboratory) de la Universidad de Saint Louis (SLU), Saint Louis, MO, EE. UU. Su propósito principal es estudiar el uso de un conjunto de microbolómetros en órbita terrestre baja (LEO). La misión COPPER se centra en probar en vuelo la capacidad de un conjunto de microbolómetros compactos no refrigerados disponibles en el mercado para capturar imágenes infrarrojas de los océanos y la atmósfera de la Tierra (EO, 2012).

Además, busca mejorar el modelo de rendimiento predictivo de los efectos de la radiación en los pequeños y modernos dispositivos electrónicos espaciales al recopilar datos de colisión de partículas de radiación de los experimentos de monitorización electrónica y transmitir esos datos a tierra. El SSRL presentó la misión COPPER al concurso UNP-6 (University Nanosat Program) en enero de 2011, pero no fue seleccionada para el vuelo en el programa UNP-6. Sin embargo, fue aceptada en el programa de servicios de lanzamiento ELaNa-4 de la NASA (Massey, 2012). Este satélite forma parte del programa Argus, que consiste en una serie de al menos una docena de satélites tipo CubeSat que se lanzarán a lo largo de varios años. El objetivo del programa Argus es llevar a cabo experimentos de modelización de los efectos de la radiación en órbita y comparar las tasas de eventos en órbita con las predicciones en tierra

para calibrar nuevos modelos de predicción desarrollados por los fabricantes. Argus utiliza sistemas CubeSat COTS (Commercial off the Shelf) y requisitos de carga útil extremadamente simples para poner en marcha una serie de plataformas automatizadas y de bajo costo.

La misión COPPER es el primer CubeSat 1U construido por estudiantes, con una potencia media diaria de 2 W y una masa de 1.3 kg. El bus del CubeSat 1U es el SCARAB (SLU Core Aerospace Research Application Bus), que incluye elementos como:

- El microcontrolador CubeSat Kit basado en PIC24
- El EPS Clyde Space 1U con batería de polímero delitio
- Células solares CIC de triple unión Spectrolab(montadas en el cuerpo)
- El transceptor UHF/VHF AstroDev Helium-100.

El CubeSat COPPER fue lanzado el 20 de noviembre de 2013 (01:15:00) como carga secundaria en la misión ORS-3 (Operationally Responsive Space-3) (EO, 2012).

Figura 15.
Satélite Copper

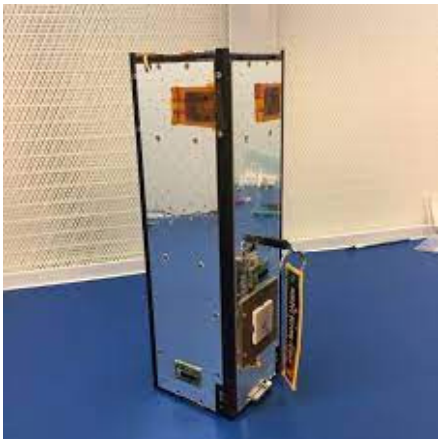
Fuente:(Massey, 2012)

- **Phoenix**

El CubeSat Phoenix es un satélite de 3U cuyo objetivo principal es proporcionar educación en el diseño de misiones espaciales a estudiantes. Además, tiene un propósito científico que implica el estudio de las islas de

calor urbano en órbita terrestre baja mediante la teledetección infrarroja de siete ciudades de los Estados Unidos. Esto contribuye a la investigación del fenómeno conocido como el efecto isla de calor urbano (Urban Heat Island, UHI en inglés). (ver Figura 16).

Figura 16.
Satélite Phoenix



Fuente:(Rogers et al., 2020)

Para estudiar el efecto de las Islas de Calor Urbano (UHI), el equipo de Phoenix seleccionó la cámara IR Tau 2 de FLIR como carga útil. Esta cámara está disponible en un formato compacto y ofrece una variedad de lentes. Para investigar el impacto de las UHI, era necesario que las imágenes pudieran discriminar áreas de tamaño similar al de manzanas. Esta resolución permitiría distinguir las diferencias regionales en el uso del suelo y las propiedades térmicas, conocidas como Zonas Climáticas Locales (LCZ), dentro de las ciudades observadas. Por lo tanto, se requería que la carga útil tuviera una resolución espacial mínima de al menos 110 metros por píxel, cubriera un área de 9 kilómetros y proporcionara una sensibilidad térmica de 200 mK.

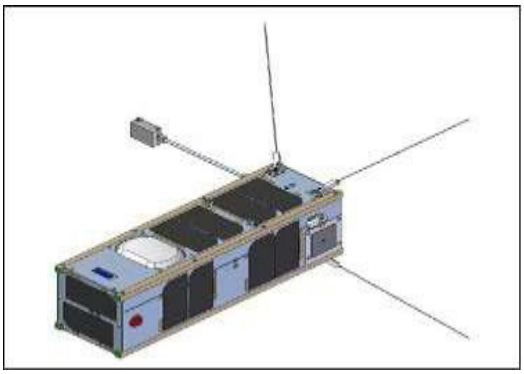
En combinación con un objetivo de 100 mm, el generador de imágenes ofrece una resolución de 640 x 512 píxeles con un campo de visión de 6,2° x 5,0°. Esto resulta en una resolución espacial en el suelo de hasta 68 metros por píxel en un campo de visión de 32 x 43,5 kilómetros desde una órbita de 400

kilómetros. Además, el Tau ofrece una sensibilidad térmica de 50 mK, lo que cumple con los requisitos científicos. Esta carga útil ocupa aproximadamente 1,5 unidades de volumen (1,5 U). (Rogers et al., 2020).

- **CANX -2**

Can-X2 es un nano satélite perteneciente al programa *Canadian Advanced Nanospace experiment* de University of Toronto Institute for Aerospace Studies. (Figura 16)

Figura 17.
Satélite CanX-2



Fuente: (Rankin, 2005)

La estructura del satélite CanX-2 triplica el tamaño de su antecesor CanX-1, con dimensiones de 10 x 10 x 34 cm y una masa de alrededor de 3,5 kg (estándar de triple cubo). Este diseño del CubeSat permite un triple de volumen disponible para las cargas útiles y una mayor superficie para la generación de energía. El bus satelital utiliza una bandeja de Aluminio 6061-T6 para simplificar el montaje e integración. La mayoría de los subsistemas se montan directamente en una bandeja, al igual que la mayoría de los paneles solares rodean la estructura. Externamente, cuatro raíles de aluminio sirven como superficies de contacto con el lanzador del CubeSat, el XPOD (X-Picosatellite Orbital Deployer), un sistema de separación personalizado e independiente diseñado y construido en UTIAS/SFL.

La energía es proporcionada por 22 células solares de GaAs de triple unión montadas en la superficie, con una potencia promedio de 4 W (que varía de 2 a 7 W dependiendo de la orientación del bus y la órbita). La energía eléctrica se almacena en baterías de iones de litio con una capacidad de 4,8 Ah.

El ADCS (Subsistema de Determinación y Control de Actitud) utiliza tres bobinas para el magnetorque (dipolo magnético máximo de 0,13 A m^2). Además, utiliza una rueda de reacción, desarrollada por UTIAS/SFL en colaboración con Sinclair Interplanetary. Se trata de una rueda de 30 mNms basada en un diseño de motor personalizado (escalable). La rueda utiliza una grasa de vacío y no requiere un recinto presurizado. La actitud se detecta con un conjunto de sensores solares y un magnetómetro de 3 ejes (el magnetómetro se despliega en un brazo). El objetivo es lograr tanto la determinación de la actitud como el apuntamiento con una precisión de ±10° y mantener una estabilidad de apuntamiento de ±1°.

CanX-2 cuenta con un OBC (Ordenador de a Bordo), desarrollado en UTIAS/SFL, que utiliza procesadores basados en ARM-7 de 32 bits (unidades redundantes en dos placas) con 6 MB de memoria SRAM y software EDAC (Detección y Corrección de Errores) para las posibles fallas que se puedan producir en la fase LEOP (Launch and Early Orbit Phase). En esta fase, el satélite se separa del cohete o vehículo de lanzamiento, y desde Tierra se toma el control de los diferentes subsistemas para verificar su debido funcionamiento, incluyendo procesos como el despliegue de antenas y paneles solares.

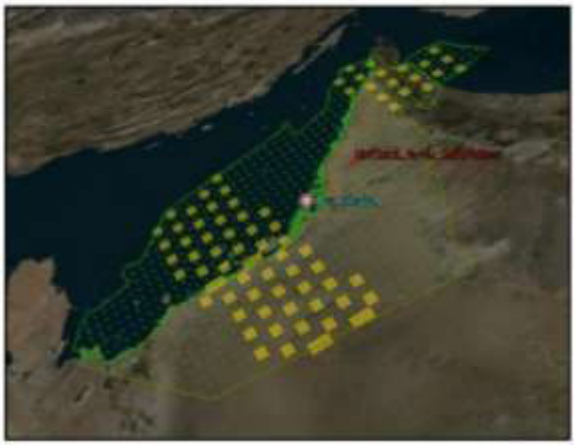
Utilizando los periféricos a bordo y un UART (transmisor-receptor asíncrono universal) cuádruple, el OBC principal interactúa con todos los subsistemas de CanX-2. Es responsable de todas las operaciones normales del satélite, incluyendo a) la adquisición periódica de telemetría para el registro de datos durante toda la órbita, b) la ejecución de los algoritmos de determinación y control de actitud, c) el telecomando de las cargas útiles del experimento y d) la comunicación con Tierra.

El OBC de las cargas útiles emplea un diseño diferente al del OBC principal y forma parte de los experimentos implementados en esta misión con el fin de obtener herencia con un conjunto diferente de componentes. También se utiliza para registrar y almacenar datos de experimentos GPS.

El programa canadiense Advanced Nanospace eXperiment (CanX) tiene como objetivo desarrollar nano satélites de alta capacidad, es decir, satélites de menos de 10 kilogramos, con vidas útiles de 2 a 3 años, ofreciendo un acceso rápido al espacio y a bajo costo para científicos, desarrolladores de tecnología y misiones con capacidad de respuesta operativa. El Laboratorio de Vuelo Espacial (SFL), del Instituto de Estudios Aeroespaciales de la Universidad de Toronto (UTIAS), ha desarrollado el nanosatélite CanX-2, que se lanzó en abril de 2008.

La misión CanX-2 se caracteriza por sus cargas útiles netamente científicas y de ingeniería, con la finalidad de crear herencia para futuras misiones espaciales con las mismas características. La misión principal de CanX-2 fue probar y demostrar varias tecnologías en vuelo, incluyendo un sistema de propulsión de gas frío hecho a medida, una rueda de reacción de 30 mN-m-s para nanosatélites como parte de un subsistema de control de actitud de tres ejes estabilizados, y un receptor GPS para experimentos

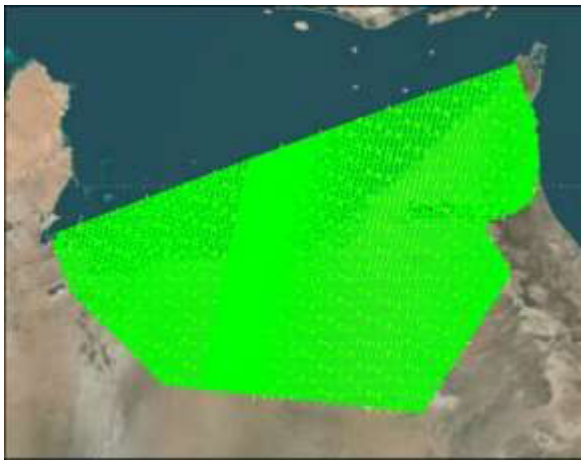
Figura 18.
Cobertura del espectrómetro en los Emiratos Árabes Unidos durante un período de seis meses



Fuente:(Shah et al., 2009)

Figura 19.

Análisis de cobertura del espectrómetro durante 36 meses



Fuente: (Shah et al., 2009)

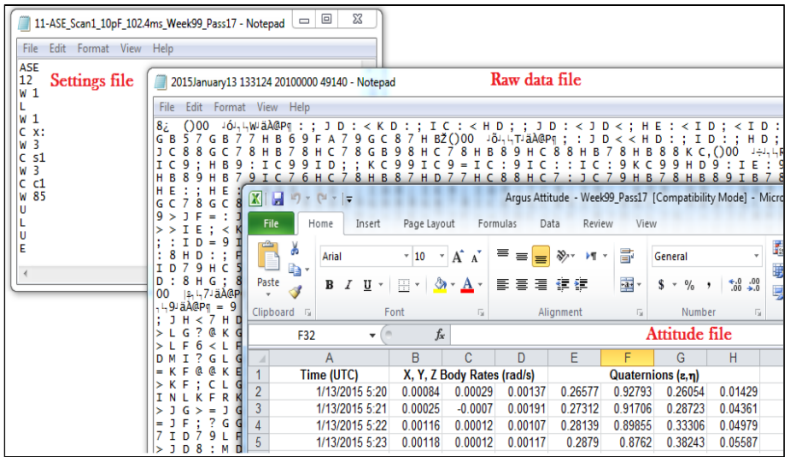
La Figura 20 muestra archivos de datos proporcionados por el Instituto de Estudios Aeroespaciales de la Universidad de Toronto (UTIAS), recolectados en las primeras campañas desarrolladas en la misión CanX-2. Se obtuvo información del Subsistema de Determinación y Control de Actitud (ADCS) y datos crudos del espectrómetro ARGUS 1000.

Además, entre los resultados significativos obtenidos con este satélite se encuentra la comparación y verificación de la relación entre las condiciones de cielo nublado vs. cielo despejado y las posibles implicaciones en términos de la cantidad de absorción de CO. La Figura 21 presenta tres casos expuestos por Alsalem et al. (2018) con un conjunto de datos de tres pases o adquisiciones con diferentes características de nubosidad obtenidas por el espectrómetro ARGUS 1000.

Los espectros rojos se recopilaron sobre nubes y, por lo tanto, muestran una alta radiación solar, mientras que los espectros azules se recopilaron en condiciones de cielo despejado y muestran menos radiación.

En la Figura 21, en la primera fila, el autor presenta firmas espectrales rojas correspondientes a datos adquiridos con nubosidad y firmas espectrales azules correspondientes a datos adquiridos con baja nubosidad, evidenciando el efecto en la intensidad de estas firmas en relación con la cantidad de radiación solar en cada caso. En la segunda fila de esta ilustración, el autor presenta la relación normalizada entre las firmas espectrales presentadas en la primera fila, y en la tercera fila, el autor muestra una imagen óptica de las condiciones de nubosidad. Se concluye que la diferencia entre los espectros nublados y libres de nubes cerca de la banda de absorción de CO de 1575 nm es de aproximadamente un 5%, lo que implica que la absorción de CO en ausencia de nubes es aproximadamente un 5% mayor que cuando las nubes están presentes. Este 5% equivale a unas 20 partes por millón (ppm) de la relación de mezcla del CO, lo que representa un cambio significativo en el proceso de recuperación. Por lo tanto, se destaca la importancia de excluir los datos nublados en los algoritmos de recuperación, una lección importante para el desarrollo de la misión FACSAT-2 (Alsalem et al., 2018).

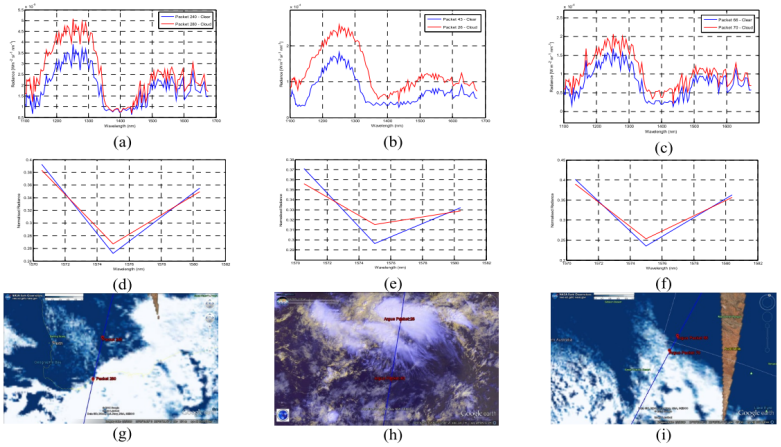
Figura 20.
Archivos de datos proporcionados por el Instituto de Estudios Aeroespaciales de la Universidad de Toronto (UTIAS) para cada pase en cada campaña de observación



Fuente: Al Salem, N. et al (2018).

Figura 21.

El espectro completo de escenas nubladas y despejadas (primera fila) para la semana 41, pase 34, semana 9, pase 36 y la semana 77 pasan 28, respectivamente. La segunda fila muestra espectros nublados y claros normalizados en el CO banda 1575 nm. La tercera fila muestra la nubosidad real



Fuente: Al Salem, N. et al (2018)

- **MeznSat**

MeznSat es un CubeSat de 3U con un microespectrómetro infrarrojo de onda corta (SWIR) como carga útil principal. Su objetivo es derivar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a través de observaciones en la región de longitud de onda de 1000-1650 nm. Este satélite es el resultado de una colaboración entre la Universidad Khalifa de Ciencia y Tecnología (KUST) y la Universidad Americana de Ras Al-Khaimah (AURAK), financiado por la Agencia Espacial de los Emiratos Árabes Unidos (UAE-SA). La carga útil principal, Argus 2000, es un espectrómetro en miniatura de bajo costo calificado para uso espacial y opera en las bandas de infrarrojos de onda corta (SWIR).

La pequeña apertura del campo de visión (FoV) del espectrómetro Argus 2000 requiere un apuntamiento preciso y un sistema avanzado de Determinación y Control de Actitud (ADCS), que ocupa al menos 0,8U. Dado que las cargas útiles requieren una estimación de 1U, el equipo de diseño optó por una plataforma de 3U para MeznSat.

El ADCS es capaz de controlar los tres ejes utilizando tres ruedas de reacción con un impulso máximo de 1,77 mNms y un par máximo de 0,23 mNm, además de tres magnetorques. El conjunto de sensores incluye un magnetómetro desplegable, dos cámaras CMOS (una para la detección fina del sol y otra para el horizonte), diez sensores solares gruesos y un rastreador de estrellas que permite un control de movimiento del satélite preciso.

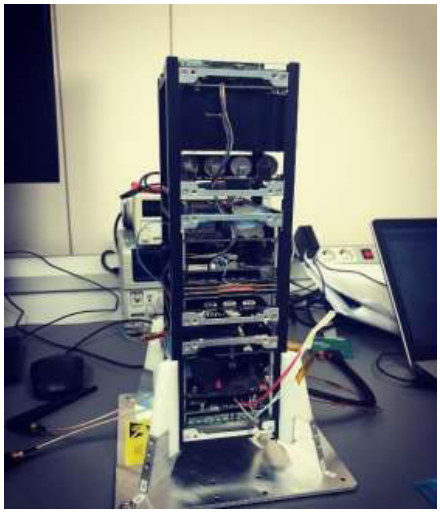
Para la generación de energía, se utilizaron un total de 22 células solares distribuidas alrededor de la estructura, junto con un paquete de baterías de iones de litio con una densidad de 38,4 Whr. El Sistema de Potencia Eléctrica (EPS) puede cargar la batería de Li-Ion sin interrumpir el funcionamiento de la carga útil.

El Subsistema de Comando y Manejo de Datos (CDHS) es responsable de ejecutar el software de vuelo y gestionar todos los datos a bordo del satélite. El componente central del CDHS es el Ordenador a Bordo (OBC), basado en un procesador ARM9 de 400 MHz con 64 MB de RAM, 1MB de NOR flash para el almacenamiento de código, 256 KB de FRAM para almacenamiento crítico y dos tarjetas microSD de 2 GB. Utilizan I2C como bus principal para el satélite y UART para la gestión de datos entre el OBC y las cargas útiles.

Argus 2000 es una unidad robusta con una masa inferior a 230g y un consumo de energía inferior a 1 W. Además, tiene un ángulo de visión de 0,15 grados y una óptica frontal de 15 mm. La carga útil secundaria consta de una cámara de alta definición (HD) que permitirá el post-procesamiento para lograr la alta precisión de geolocalización necesaria para los datos del espectrómetro SWIR. La combinación de las bandas visible y SWIR hace de MeznSat una misión CubeSat única que generará un interesante conjunto de datos para explorar los algoritmos de corrección atmosférica que emplean los datos SWIR para procesar los canales visibles (Jallad et al., 2019).

Figura 22.

Satelite MeznSat



Fuente: (Abdul-Halim Jallad, 2019)

Para poder utilizar la información de este satélite, es necesario aplicar un algoritmo de recuperación de transferencia radiativa y contar con conocimiento sobre las condiciones y topografía de las nubes en la superficie. Utilizando una configuración cercana al nadir, el espectrómetro puede registrar la radiación infrarroja emitida desde la superficie y la atmósfera de la Tierra al espacio.

Los objetivos de la misión MeznSat son los siguientes:

- **Científica:** Monitorizar los niveles de metano y dióxido de carbono en la atmósfera utilizando un espectrómetro SWIR.
- **Científica:** Estudiar la viabilidad de combinar la detección SWIR con imágenes RGB para estimar la concentración de nutrientes en las aguas costeras y predecir la posibilidad de floraciones de algas.
- **Académica:** Proporcionar experiencia educativa a los estudiantes universitarios de los Emiratos Árabes Unidos en la construcción y diseño de misiones espaciales.

3.1. Verificación de Espectrómetro Óptimo

Con base en la revisión de las misiones cuyo objetivo es el estudio de gases de efecto invernadero y de misiones homólogas o en estándar CubeSat, se verifica que el sensor que se puede encontrar disponible en el mercado, y que cumple con las características para ser posiblemente la segunda carga útil de la misión satelital FACSAT-2 Chiribiquete, es el ARGUS 2000 de la casa matriz Thoth, el cual ya tiene herencia espacial en misiones como MeznSat y en una versión anterior, en misiones como CANX-2. A continuación, se presenta un pequeño resumen de las características principales del sensor ARGUS 2000.

ARGUS 2000

Luego de llevar a cabo la vigilancia tecnológica, se plantea la implementación de un espectrómetro de grado espacial en el satélite de observación de la Tierra FACSAT-2. Por medio de un programa de transferencia de tecnología y conocimiento con un aliado tecnológico, se ejecutará la integración de la carga secundaria con el fin de crear capacidades para el monitoreo de gases de efecto invernadero.

El espectrómetro Argus 2000, fabricado por Thoth Technology, sucesor del Argus 1000, es el instrumento de grado espacial a implementar. Este instrumento de detección es un espectrómetro en miniatura, de bajo coste y apto para el espacio, que opera en las bandas infrarrojas de onda corta (SWIR) en el rango de 1000 a 1650 nm, con una masa inferior a 280 g, un ángulo de visión de 0,15 grados, una óptica frontal de 15 mm y un consumo de energía inferior a 1 W.

Este instrumento permite realizar el monitoreo de gases de efecto invernadero, y las estimaciones de CO_2 y CH_4 pueden hacerse a partir de medidas remotas espaciales en la región del infrarrojo cercano (NIR), en la región de infrarrojo de onda corta (SWIR), particularmente en el rango de 1600 a 2500 nm, y en la región del infrarrojo térmico (TIR) (Guanter, 2021; Streets, 2013). Dependiendo de la versión del sensor, se puede tener un rango específico de absorción. Las referencias con las que cuenta el instrumento ARGUS 2000 se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6.

Rangos espectrales instrumento ARGUS 2000

Código	Descripción
01	700 nm – 1150 nm
02	1000 nm – 1650 nm
03	1240 nm – 2000 nm
04	1730 nm – 2200 nm

Fuente: (Thoth-Technology-Inc, 2018)

A través del espectrómetro ARGUS 2000 será posible recuperar concentraciones de CO_2 y de CH_4 (de forma limitada, con pérdidas en la resolución espectral) a partir de sus picos de absorción débiles. Además, la información integrada de la cámara Carga útil principal y el espectrómetro Argus 2000 permitirá ampliar las capacidades investigativas para el estudio de escenarios de nubosidad y el efecto de diferentes superficies reflectantes en la recuperación de gases de efecto invernadero (GEI) (Thoth-Technology-Inc, 2018).

4. DISCUSIÓN

De acuerdo con la Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial de la Proyección Espacial, la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) liderará las capacidades espaciales nacionales para garantizar la autonomía o libertad de acción que contribuya a la protección de los recursos del país. Asimismo, la Presidencia de la República tiene como meta la reducción del 51% de los GEI para el 2042, para lo cual se requiere la monitorización del impacto generado por las industrias y los resultados de los planes de acción para la mitigación en la fuente de generación (Fuerza Aérea Colombiana, 2019).

Adicionalmente, para el año 2030, el Grupo Ecopetrol busca reducir en un 25% sus emisiones de CO_2. Según la estimación de emisiones proyectadas a 2030, esta reducción representaría entre 5 y 6 millones de toneladas menos de CO_2 en esta década, equivalente a restaurar aproximadamente un área de 500 mil hectáreas, es decir, 13 veces el área urbana de Bogotá. Esto contribuiría significativamente al cumplimiento del compromiso recientemente anunciado por Colombia, en línea con la política pública CONPES 3983 (2020). Por lo

tanto, se requiere el desarrollo de este estudio con el objeto de establecer capacidades técnicas y operativas en el satélite de observación terrestre (Ecopetrol, 2021).

Por lo tanto, y con base en la vigilancia tecnológica realizada, se puede concluir que la mejor opción para cumplir con las necesidades del país, teniendo en cuenta las restricciones de tamaño y masa que impone un nanosatélite, es la implementación del sensor ARGUS 2000. Se selecciona ARGUS 2000 debido a que es el dispositivo que se ha probado en el espacio con la versión ARGUS 1000 en la misión satelital CANX-2, y luego con la versión de ARGUS 2000 en la misión satelital Meznsat; además, se han encontrado otros estudios en los que se vincula su aplicación.

Otras opciones que se pudieron verificar con el estudio son: el radiómetro heterodino láser de 4 U para mediciones de metano (CH4) y dióxido de carbono (CO2) de un CubeSat de visualización de ocultación, que se encuentra en el satélite MINICARB, y el radiómetro de imagen espectral infrarroja (ISIR) mediante microbolómetros compactos no refrigerados para tomar imágenes infrarrojas de los océanos y la atmósfera de la Tierra, y que se encuentra en el satélite COPPER. Las características principales se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7.
Características principales de posibles sensores para la misión FACSAT-2

Alternativa	Descripción General	Restricción
ARGUS 2000	Se ha probado en el espacio con la versión Argus 1000 en la misión satelital CANX- 2, y luego con la versión de Argus 2000 en la misión satelital MEZNSAT; además, se han encontrado otros estudios en los que se vincula su aplicación	Se cuenta con procedimientos generales para realizar la geolocalización, y no se tiene muestra de los datos producidos por el espectrómetro
Radiómetro Heterodino Láser (LHR)	Se basa en un instrumento terrestre similar que se desarrolló en el Goddard Space de la NASA para mediciones de CO2, CH4 y H2O sobre la atmósfera, y es el que lleva el satélite Minicarb.	Se encuentra diseñado para un CubeSat de cuatro unidades (4U) y su desarrollo no es comercial.

FLIR TAU 320	Es un radiómetro de imagen espectral infrarroja (ISIR) mediante microbolómetros compactos no refrigerados para tomar imágenes infrarrojas de los océanos y la atmósfera de la Tierra, y que se encuentra en el satélite COPPER	En la búsqueda se encuentra fuera del Stock de la compañía FLIR, en la que se presentan otras versiones (TAU 336, TAU 640) que están más enfocadas hacia Aeronaves no Tripuladas y que no definen un rango espectral enfocado en la medición de Gases de Efecto Invernadero (7.5 - 13.5 μm).

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, y basándonos en la comparación presentada, el sensor ARGUS 2000 es el único sensor que cumple con las características de volumen y masa óptimas para satisfacer los requisitos y restricciones de la misión satelital FACSAT-2. Los demás sensores generalmente fueron fabricados específicamente para la misión diseñada, no se encontraron en el mercado disponibles o no cumplen con el tamaño o masa para FACSAT-2.

La misión satelital FACSAT-2 posee ventajas técnicas en comparación con los programas satelitales de nanosatélites mencionados, CANX-2 y MeznSat. La principal ventaja con respecto a CanX-2 consiste en la implementación de un espectrómetro de grado espacial con características mejoradas (como ángulo de visión y resolución espacial) integrado en la carga útil principal. Por otro lado, la principal ventaja con respecto a la Misión MeznSat es que, a pesar de utilizar el mismo espectrómetro, el ARGUS 2000, en el FACSAT-2 el espectrómetro se integrará con la cámara multiespectral MultiScape100 CIS con 8 bandas en el espectro VNIS (450 - 900 nm), capaz de adquirir imágenes con una resolución de 4096 píxeles, mucho más robusta que la cámara RGB utilizada en la misión MeznSat, que registra imágenes de 1280 píxeles.

La principal ventaja de la integración de un espectrómetro de grado satelital, en comparación con otros instrumentos satelitales, es que no se han desarrollado misiones satelitales en el territorio colombiano para la investigación y el monitoreo de gases de efecto invernadero. A través del monitoreo de GEI, será posible supervisar los agentes de emisión de carbono, contribuyendo al aprovechamiento sostenible de los recursos de hidrocarburos del país. La sostenibilidad de las actividades relacionadas con la emisión de GEI comprende

el desarrollo de mejores prácticas e integración funcional de actividades de optimización ambiental, como la reducción de GEI y la neutralidad de carbono.

Tener una base de datos de registros satelitales (imágenes y espectros) adquiridos por un programa satelital local posibilita la aplicación de técnicas novedosas de inteligencia artificial, específicamente con la implementación de algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo para la clasificación y el análisis de imágenes, así como para la recuperación de concentraciones de GEI. La estrategia de la aplicación de redes neuronales artificiales como potencial innovador permite facilitar el tratamiento de grandes volúmenes de datos obtenidos a través de sensores espaciales, instrumentación geodésica espacial e imágenes satelitales multiespectrales.

5. CONCLUSIONES

- Como resultado de la Vigilancia Tecnológica realizada, se destaca que para misiones cuyo objetivo es el estudio de GEI, la gran mayoría de misiones diseñan y fabrican sus propias cargas útiles, siendo un objetivo adicional de la misión el testeo y la generación de patrimonio de estas cargas útiles.

- Para satélites en el estándar CubeSat, generalmente las misiones implementan cámaras que les permitan realizar estudios ambientales. Estas cámaras o sensores suelen tener volúmenes mayores a 1U.

- El único sensor que se presenta en este momento en el mercado mundial que tiene herencia y certificación espacial es el espectrómetro ARGUS 2000.

6. REFERENCIAS

Boesch, H., Liu, Y., Tamminen, J., Yang, D., Palmer, P. I., Lindqvist, H., Cai, Z., Che, K., Di Noia, A., Feng, L., Hakkarainen, J., Ialongo, I., Kalaitzi, N., Karppinen, T., Kivi, R., Kivimäki, E., Parker, R. J., Preval, S., Wang, J., … Chen, H. (2021). Monitoring {G}reenhouse {G}ases from {S} pace. Remote Sensing, 13(14). https://doi.org/10.3390/rs13142700

CONPES. (2020). Política de desarrollo espacial: Condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional. *El Documento CONPES 3983*, 45. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/E conómicos/3983.pdf

CEOS. (2018). A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space. CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team

Ecopetrol. (2021). Grupo Ecopetrol anuncia compromiso y plan para lograr cero emisionesnetas de carbono en 2050. *Portal Ecopetrol*, 5190. https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?1dmy&page=-detalleNoticias&urile=wcm: path:/ecopetrol_wcm_library/as_es/noticias/noticias%2B2021/reduccion-emisiones

EO. (2012). COPPER (Close Orbiting Propellant Plume and Elemental Recognition) CubeSat. https://www.eoportal.org/satellite-missions/copper#copper-close-orbiting- propellant-plume-and-elemental-recognition-cubesat

Fernandez Fraile, J. J., Laverón-Simavilla, A., Calvo,D., & Moreno Benavides, E. (2014). The QBito CubeSat: Applications in Space Engineering Education at Technical University of Madrid. *40th COSPAR Scientific Assembly*, *40*, PE.2-7- 14.

Fuerza Aérea Colombiana. (2019). Estrategia para el desarrollo aéreo y espacial de la Fuerza Aérea Colombiana. *Fuerza Aérea Colombiana*, *53*(9), 1689–1699. https://d2r89ls1uje5rg.cloudfront.net/sites/default/files/estrategia_para_el_desarrollo_aereo_y_espacial_fuerza_aerea_colombiana_2042.pdf

Garner, R. M. (2017). A 4 U laser heterodyne radiometer for methane (CH4) and carbon dioxide (CO2) measurements from an occultation-viewing CubeSat. MeasurementScience and Technology, 28(3), 035902.

GOSAT Project (2010). Extraído de: https://www.cger.nies.go.jp/publications/pamphlet/gosat_pamphlet_en_201607.pdf

Hakkarainen J, Ialongo, I., Maksyutov, S., & Crisp, D. (2018). Global XCO2 anomalies as seen by Orbiting Carbon Observatory-2, Atmos. Chem. Phys Discuss

Hardwick, S., & Graven, H. (2016). Satellite observations to support monitoring of greenhouse gas emissions. Grantham Institute: Imperial College London.

Issa, H., Marpu, P., Jallad, A. H., & Al Marar, A. Mission Operations and Science Plan for the MeznSat CubeSat Mission for GreenhouseGases Monitoring. In IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 5454-5457). IEEE.

Jagpal, R. K. (2011). *Calibration and Validation of Argus 1000 Spectrometer -- A Canadian Pollution Monitor*. York University (Canada).

Jallad, A. H., Marpu, P., Aziz, Z. A., Al Marar, A., &Awad, M. (2019). MeznSat-A 3U CubeSat for monitoring greenhouse gases using short wave infrared spectrometry: Mission concept and analysis. *Aerospace*, *6*(11). https://doi.org/10.3390/aerospace6110118

Jimenez, H., Rincon, S., & Cárdenas, L. (2019). FACSAT1 GROUND STATION PERFORMANCE. IAF Space Communications and Navigation Symposium 2019, 194.

Kuang, Z., Toon, D., Crisp, D., Margolis , G., & Yung, Y. (2002). Spaceborne measurements of atmospheric CO2 by highresolution NIR spectrometry of reflected sunlight: An introductory study, Geophysical Research Letters. 11.

Krebs, G. D. (2022). minicarb@space.skyrocket.de. MiniCarb (CNGB). https://space.skyrocket.de/doc_sdat/minicarb.htm

Kuze, A., Suto, H., Shiomi, K., Nakajima, M., & Hamazaki, T. (2009). On-orbit performanceand level 1 data processing of TANSO-FTS and CAI on GOSAT, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIII, edited by Roland Meynart, Steven P. Neeck, Haruhisa

Massey, S. (2012). *COPPER: IR Imaging and Radiation Studies Overview*

Payloads Spacecraft Bus Conclusion. http://mstl.atl.calpoly.edu/~bklofas/Presentatio ns/SummerWorkshop2011/Massey_COPPER.pdf

Matsunaga T. & Maksyutov S. (eds.) (2018) *A Guidebook on the Use of Satellite Greenhouse Gases Observation Data to Evaluate and Improve Greenhouse Gas Emission Inventories*. Satellite Observation Center, National Institute for Environmental Studies, Japan. https://www.nies.go.jp/soc/en/documents/guidebook/

NASA. (2022). *index @ ocov2.jpl.nasa.gov*. OrbitingCarbon Observatory-2. https://ocov2.jpl.nasa.gov/

NOAA. (2021). NOAA index tracks how greenhouse gas pollution amplified global warming in 2020. NOAA Research News.

Netherlands Space, O. (2022). *index @ www.tropomi.eu*. Tropomi. http://www.tropomi.eu/

O´Brien, D., & Rayner, P. (2002). Global observations of the carbon budget 2. CO2 column from differential absorption of reflected sunlight in the 1.61 μm band of CO2, Journal of Geophysical Research. ACH 6-1-ACH6-16.

Palmer, P. I., O'Doherty, S., Allen, G., Bower, K., Bösch, H., Chipperfield, M. P., ... & Young, D.(2018). A measurement-based verification framework for UK greenhouse gas emissions: an overview of the Greenhouse Gas UK and Global Emissions (GAUGE) project. AtmosphericChemistry and Physics, 18(16), 11753-11777.

Pereira, V., Garcia, M., Schroeder, M., Caldelas, H., Lindsay, C., Choi, A., Pfrang, K., Gagnon, A.,

Mckeen, P., Clark, J., Murphy, T. J., Haughwout, C., & Cahoy, K. (2020). *BeaverCube : Coastal Imaging with VIS / LWIR CubeSats*. *August*.

Pool, R. (1999). When failure is not an option. *IEEEEngineering Management Review*, *27*(1), 27–31. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6760-2_13

Rogers, S., Sanchez, J., Vega, D., Zenkov, Y., Knoblauch, C., Bautista, D., Bautista, T., Roberson, C., Flores, S., Barakat, R., Chacko, V., Gamaunt, J., Acuna, A., Bowman, J. D., & Jacobs, D. C. (2020). *SSC20-WKII-04*

Phoenix : A CubeSat Mission to Study the Impact of Urban Heat Islands Within the U . S

Rowlands, N., Neville, R. A., & Powell, I. P. (1994). Short-wave infrared (SWIR) imaging spectrometer for remote sensing. In Infrared Technology XX (Vol. 2269, pp. 237-247). International Society for Optics and Photonics

Shah, A., Sarda, K., Grant, C., Eagleson, S., Kekez, D., & Zee, R. E. (2009). Canadian advanced nanospace experiment 2 orbit operations: One year of pushing the nanosatellite performance envelope. *60th International AstronauticalCongress 2009, IAC 2009*, *5*(January), 3557–3571.

Thoth-Technology-Inc. (2018). *Argus 2000 {I}{R}*

{S}pectrometer (Issue OG274001). Thoth Technology. http://thothx.com/products/argus-ir-spectrometers

Wang, Z., Ma, P., Zhang, L., Chen, H., Zhao, S., Zhou, W., Chen, C., Zhang, Y., Zhou, C., Mao, H.,

Wang, Y., Wang, Y., Zhang, L., Zhao, A.,Weng, G., & Hu, K. (2021). Systematics of atmospheric environment monitoring in{C}hina via satellite remote sensing. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *14*, 1–13. https://doi.org/10.1007/s11869-020-00922-7

Wecht, K. J., Jacob, D. J., Sulprizio, M. P., Santoni, G.W., Wofsy, S. C., Parker, R., ... & Worden, J. (2014). Spatially resolving methane emissions in California: constraints from the CalNex aircraft campaign and from present (GOSAT, TES) and future (TROPOMI, geostationary) satellite observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 14(15), 8173-8184

Wilson, E. L., DiGregorio, A. J., Riot, V. J., Ammons, M. S., Bruner, W. W., Carter, D., Mao, J., Ramanathan, A., Strahan, S. E., Oman, L. D., Hoffman, C., & Garner, R. M. (2017). A 4 U laser heterodyne radiometer for methane ({CH}$\less$sub$\greater$4$\less$/sub$\greater$) and carbon dioxide ({CO}$\less$sub$\greater$2$\less$/sub$\greater$) measurements from an occultation-viewing {CubeSat}. *Measurement Science andTechnology*, *28*(3), 35902. https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5440

Yue, T., Zhang, L., Zhao, M., Wang, Y., & Wilson, J.(2016). Space- and ground-based {CO}$_2$ measurements: A review. *Science China Earth Sciences*, *59*(11), 2089–2097.

https://doi.org/10.1007/s11430-015-0239-7

Zarate, P., & Lopez, J. (2020). Artificial Neural Networks Applied in Satellite Images. IEEE

Zhang, Z. Y. (2018). *A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space*. *November*, 175.

https://ceos.org/document_management/Meetings/Plenary/32/documents/CEOS_AC-VC_White_Paper_Version_1_20181009.pdf

Zhou, B., Zhang, S., Xue, R., Li, J., & Wang, S. (2021). A review of {S}pace-{A}ir-{G}round integrated remote sensing techniques for atmospheric monitoring. *Journal ofEnvironmental Sciences*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.12.008

CAPÍTULO 6

PREPARACIÓN Y RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE ENSAMBLE, INTEGRACIÓN Y PRUEBAS PARA EL SAT-CHIRIBIQUETE: MISIÓN FACSAT-2

MY. Juan Manuel Cárdenas García

https://orcid.org/0000-0002-2917-0885
juanm.cardenas@fac.mil.co

Karen Nicole Pirazan Villanueva

https://orcid.org/0000-0002-6382-0773
karen.villanueva@epfac.edu.co

TE. Sergio Fernando Barrera Molano

https://orcid.org/0000-0003-1140-7634
sergio.barrera@fac.mil.co

ST. Santiago Muñoz Giraldo

https://orcid.org/0000-0001-6017-1934
santiago.munoz@fac.mil.co

Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE).
Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez".
Fuerza Aeroespacial Colombiana

Resumen

El SAT-Chiribiquete es la segunda misión del programa FACSAT liderado por la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Este nanosatélite de 6 unidades es un bus satelital pequeño capaz de albergar dos cargas útiles, una para la observación de la tierra (EO) y otra para análisis de Gases de Efecto Invernadero (GEI). El Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) codiseña y codesarrolla esta misión y participa en las actividades de ensamble, integración y pruebas (AIT) junto con GomSpace en las instalaciones de la empresa danesa. El desarrollo del satélite SAT-Chiribiquete se basó en el ciclo de vida propuesto por la Agencia Espacial Europea (ESA), lo que permite un ciclo de implementación rápido y facilita la incorporación de tecnologías del New Space. En la actualidad, el nanosatélite se encuentra en la fase de integración externa. La campaña AIT para el modelo de vuelo (FPM) se dividió en 7 fases, cada una relacionada con un estado de ensamble del sistema y un conjunto de actividades y pruebas, según los niveles establecidos para el satélite. Los resultados preliminares de la campaña AIT satisfacen las consideraciones del programa de calificación que replica GomSpace en cada uno de sus desarrollos. Además, ha permitido robustecer los conocimientos de la FAC para la aplicación de buenas prácticas de integración y pruebas en sus misiones futuras. Una vez se concluyan con la campaña AIT y se obtenga un modelo completamente validado que cumpla con los requerimientos de la misión, el nanosatélite será lanzado a principios de 2023.

Palabras clave: FACSAT-2, Campaña AIT, Misión satelital, SAT-Chiribiquete.

Abstract.SAT-CHIRIBIQUETE is the second mission of the FACSAT program led by the Colombian Air Force. This 6-unit nanosatellite is a small satellite bus capable of holding two payloads, one for Earth Observation (EO) and one for Greenhouse Gases (GHG) analysis. The Aerospace Technologies Research Center (CITAE) co-designed and co-developed this mission and participates in assembly, integration, and testing (AIT) activities along with GomSpace at the Danish company's facilities. The life cycle for the development of the SAT-CHIRIBIQUETE satellite was based on the proposed European Space Agency (ESA) which allows an efficient implementation process and allows the incorporation of New Space technologies. Currently, the nanosatellite is in the external integration phase. The AIT campaign for the flight model (PFM) was divided into seven sequence phases. Each one relates a system state, a set

of activities and tests, according to the levels obtained for the satellite. The AIT campaign preliminary results satisfy the consideration of the qualification program that GomSpace replicates in each development. Also, it allowed the FAC to strengthen its knowledge about good integration and testing practices in its future missions. Once the AIT campaign is completed and the PFM meets the mission requirements, the nanosatellite will be launched in early 2023.

Keywords: FACSAT-2, AIT campaign, Satellite mission, SAT-CHIRIBIQUETE.

1. INTRODUCCIÓN

El Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), junto con la empresa danesa GomSpace, codiseñaron y codesarrollaron el nanosatélite de 6 unidades llamado SAT-CHIRIBIQUETE, que consolida el segmento satelital de la misión FACSAT-2. La misión satelital se desarrolla en el marco del programa espacial FACSAT liderado por la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Esta misión tiene dos objetivos, el principal es proveer imágenes electroópticas del territorio colombiano para el análisis de la FAC y otras entidades gubernamentales y privadas; y tiene como objetivo secundario adquirir información radiométrica sobre el territorio con el fin de caracterizar y monitorear gases de efecto invernadero.

El concepto de misión del FACSAT-2 incorpora los siete elementos clásicos de la arquitectura como lo son: objeto de estudio, selección y definición de órbita, segmento espacial (cargas útiles y bus satelital), lanzamiento, segmento en tierra, operación de misión y arquitectura operacional descritos por Larson y Weltz (2016). Sin embargo, la definición y puesta a punto de cada uno de estos elementos se lleva a cabo a través del cumplimiento de las fases del ciclo de vida de la misión. Para el caso FACSAT-2, el ciclo de vida, o en inglés "Life Cycle," se desarrolla con base al planteado por la Agencia Espacial Europea (ESA) junto con el modelo de ingeniería "V-model," propuesto por el Departamento de Defensa (DoD), facilitando la ejecución de las tareas para la definición de los sistemas y sus niveles más bajos (elementos críticos, componentes, partes, y desarrollo de las ciencias básicas, si aplica).

El modelo de ingeniería "V-model," adoptado por DoD, divide el proceso de desarrollo en tres secciones: iniciando por el concepto operacional, el lado izquierdo del modelo se describe la definición de requisitos como entrada a

nivel de sistema, subsistemas y componentes, así como el diseño del sistema. Esto lleva a la segunda sección, la parte inferior, donde se aplica la ingeniería en diferentes disciplinas durante el proceso de diseño, desde el preliminar hasta el crítico. La tercera sección, en el lado derecho, inicia con la integración de los componentes, subsistemas y componentes y finaliza en la verificación y validación del sistema, dando como resultado un producto validado.

Por otra parte, el ciclo de vida ESA define e involucra activamente el sistema de ingeniería especificando los requerimientos por fase, con el propósito de fortalecer la comunicación entre las partes interesadas o "stakeholders" y el desarrollador, en este caso la FAC, dada la naturaleza compleja de los sistemas espaciales. La Fase D se resalta por la rigurosidad de su ejecución, debido a que sigue la filosofía, métodos y procedimientos de un plan de calificación que satisface los estándares internacionales de la Cooperación Europea para la Normalización Espacial (ECSS).

En la Figura 1 se observa la armonización del modelo en V (DoD) y el modelo para el desarrollo de productos espaciales de la ESA, en el cual se enfatiza el significado de una cuidadosa preparación y definición del proceso de verificación de acuerdo con los requerimientos planteados para la misión.

2. Actividades previas a la campaña AIT

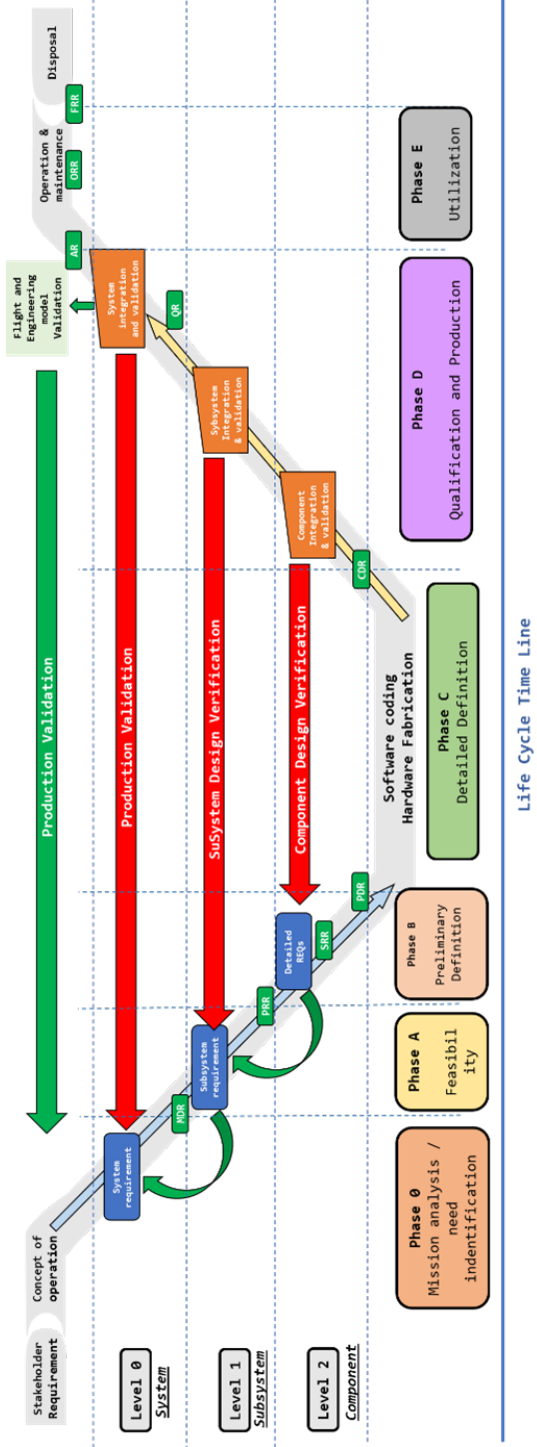
El ensamble, integración y pruebas para cada uno de los niveles de desarrollo del sistema se desarrolla posterior a cuatro fases correspondientes al análisis de misión, factibilidad, diseño preliminar y diseño crítico. Por lo anterior, resumimos los principales atributos y resultados de cada fase.

2.1. Pre-Fase A: análisis de misión

El ciclo de vida de la misión FACSAT-2 inició con la definición de los "stakeholders" y sus necesidades. Plasmado en la declaración de misión, o "Mission Statement" en inglés, además se establecieron: las expectativas de los "stakeholders" permitiendo la identificación de los parámetros clave de rendimiento o "Key Performance Parameters" (KPP); los objetivos de la misión; las limitantes referentes al costo, programación, regulaciones políticas, regulaciones ambientales e interfaces, y los requerimientos preliminares de la misión.

Figura. 1.

Modelo de ingeniería misión FACSAT-2 incorporación Modelo V- DoD y Modelo para desarrollo de productos espaciales ESA



Fuente: CITAE, 2021.

Los Key Performance Parameters (KPPs) actúan como la primera entrada para llevar a cabo la revisión bibliográfica y la vigilancia tecnológica que permite reconocer y, posteriormente, seleccionar los instrumentos o sensores capaces de dar cumplimiento a los objetivos de la misión. Las limitaciones propias que presentan los nanosatélites por las características volumétricas animan a la industria para el desarrollo de componentes cada vez más compactos.

Con esto en mente y con el propósito principal de la misión de observación de la tierra, el equipo del FACSAT-2 identificó su carga útil principal: una cámara electroóptica MultiScape 100 CIS de la empresa sudafricana Simera Sense y su carga secundaria: un espectrómetro ARGUS 2000 de la empresa canadiense Thoth, esta segunda como resultado de una solicitud de implementar una carga útil para el estudio de gases de efecto invernadero.

La primera aproximación del desempeño de las cargas útiles en función a los parámetros orbitales se valida a través de programas de simulación certificados internacionalmente como ANSYS STK, software de evaluación de riesgos de escombros y análisis de mitigación DRAMA de la ESA, y el software de referencia del entorno terrestre de meteoritos y desechos espaciales MASTER. La definición de la órbita se realiza de manera iterativa, simulando las características de los sensores y su cobertura sobre el territorio, así como el tiempo de acceso a la estación terrena. Teniendo estas variables se tienen los parámetros necesarios para el estudio de mercado que permite la selección del lanzador.

Para la misión FACSAT-2, una vez culminado el análisis, se determinó que la órbita capaz de satisfacer los requerimientos técnicos de la misión, ofreciendo cobertura total sobre el territorio, más de dos pases efectivos diarios y tiempo de revista menor a 24 horas, debía ser una órbita inclinada Cercana a la ecuatorial (NEO Near Equatorial Orbit) [3]. Sin embargo, durante el estudio de mercado se encontró una limitada oferta en este tipo de órbita. Así mismo, al ser una misión de observación de la tierra, algunas características como el paso a la misma hora sobre el territorio y el acceso a todos los países dan una ventaja adicional a la órbita helio-sincrónica (SSO acrónimo en inglés). La solicitud de información (RFI acrónimo en inglés) y la solicitud de propuestas (RFP acrónimo en inglés) elevadas por la

FAC a nueve compañías reconocidas a niveles mundial, permitió el análisis de las órbitas comerciales, dando como resultado la selección de la oferta presentada por el proveedor alemán de lanzamientos EXOLAUNCH, que se resume en la Tabla 1.

Tabla 1.

Características orbitales y del segmento de lanzamiento para misión FACSAT-2

Ítem	Característica
Órbita	▪ SSO @500 km ± 20 km. ▪ Excentricidad <0.004.
Fecha de lanzamiento	▪ Febrero 2023.
Lanzador Falcon 9	▪ Empresa SpaceX. ▪ Misión Transporter VII ▪ Confiabilidad 95-10%. ▪ No. Lanzamientos exitosos 173.[1]
Logística y transporte	▪ Integración al POD. ▪ Transporte al lugar de integración y lanzamiento. ▪ Laboratorios ISO 8 (clase 100,000 de acuerdo al estándar federal 209E)

Fuente: Elaboración propia

La correcta selección prolonga la vida orbital del satélite en el espacio, de acuerdo con el estándar ISO 24113:2011 [4]. Sin embargo, se debe cumplir con las restricciones para órbitas bajas (LEO acrónimo en inglés) donde los activos espaciales deben reingresar y desintegrarse en la órbita terrestre antes de los 25 años, contados a partir de la fecha de lanzamiento.

Esta fase se valida a través de la revisión de definición de misión o en inglés Mission Definition Review (MDR). Esta en particular, es evaluada por el gerente del proyecto y las partes interesadas para valorar la preparación de la fase y dar continuidad a la misión.

2.2. Fase A: Factibilidad

Los estudios de factibilidad desarrollados evalúan la viabilidad técnica, tecnológica, operativa, estratégica, legal y, por último, pero no menos importante, económica. La información se consolida en paralelo con el avance de la misión, en el caso de la misión FACSAT-2, en el informe realizado por el ingeniero Bastidas para el proyecto FACSAT-2.2 [5].

En esta fase, los requerimientos de la misión y del sistema empiezan a estructurarse de manera preliminar junto con la definición de las funciones de alto nivel de los tres segmentos de la misión y la formulación del concepto de operación. En esencia, de acuerdo con la ESA, los requerimientos expresan las necesidades de los stakeholders de forma V.A.L.I.D (Verificable, Achievable, Logical, Integral, Definitive), es decir verificables, alcanzables, lógicos, integrales y definitivos. Gracias a lo anterior, el equipo del FACSAT-2 avanzó preliminarmente con la definición de los drivers de la arquitectura del segmento espacial. Los drivers son definidos como guías de diseño que le imparten atributos de calidad a la arquitectura del sistema. Desarrollarlos previos a la fase B facilita la previsualización del diseño del satélite antes de concluir con las tareas de documentación de los requerimientos.

Finalizando con esta fase, la FAC obtuvo la arquitectura línea base del concepto de misión. Con respecto al segmento especial, era requerida la definición de las funciones de alto nivel del sistema satelital para el cumplimiento de la revisión preliminar de requerimientos o en inglés Preliminary Requirements Review (PRR), obteniendo lo siguiente: Sistema ADCS: determinar y controlar la actitud del satélite, controlar la orientación de paneles solares, y proveer de metada y tiempo a la carga útil.

- **Sistema ADCS:** determinar y controlar la actitud del satélite, controlar la orientación de paneles solares y proveer de metada y tiempo a la carga útil.
- **Sistema ESTRUCTURA:** proveer alojamiento en el bus satelital de los subsistemas y carga útil, y proteger al sistema de las condiciones ambientales extremas del espacio.
- **Sistema EPS:** generar y distribuir la potencia eléctrica, almacenar la energía y administrar las conexiones eléctricas del bus satelital.

- **Sistema C&DH:** recolectar y transmitir la información de telemetría, manejar la operación, almacenar la información de la carga útil, puerta de enlace de operación TMTC, enriquecer la data con tiempo/actitud, comprimir y encriptar la data.
- **Sistema COMs:** establecer los enlaces de TMTC y la descarga de la data generada por las cargas útiles.

La definición de los subsistemas y la asignación de las funciones de alto valor permiten el diseño y selección del bus satelital. Dando así cumplimiento a los requerimientos de interfaces en la fase de definición preliminar.

2.3. Fase B: Definición preliminar

De acuerdo con la ESA [6], la fase de definición preliminar se somete a dos revisiones. En la primera, se realiza una revisión de los requerimientos del sistema, o en inglés System Requirements Review (SRR) con el objetivo de publicar las especificaciones de los requerimientos técnicos, evaluar el diseño del satélite según la arquitectura base y evaluar los programas de verificación preliminar. Por otra parte, la segunda revisión corresponde al cierre de la fase del diseño preliminar, o en inglés Preliminary Design Review (PDR), que busca establecer finalizar el diseño preliminar seleccionado y las soluciones técnicas frente a los requisitos del proyecto y del sistema. En esta fase se define el árbol de trabajo (WBS acrónimo en inglés), el árbol de especificaciones, y se presenta preliminarmente el plan y el programa de verificación junto con la filosofía de pruebas que va a ser aplicada en la campaña ensamble, integración y pruebas.

En ese orden de ideas, la definición y selección de los componentes de los subsistemas inicia cuando el equipo FACSAT-2 define al bus satelital de la empresa danesa GomSpace, como referente para su arquitectura satelital. El uso de elementos COTS (Componentes listos para usarse), en especial para nanosatélites eleva el nivel de madurez tecnológica de los sistemas en un TLR de 8-9 [7]. Con este precedente, las tareas de esta fase incluyeron:

- Definir la solución técnica para el concepto de sistema y operaciones junto con su viabilidad con respecto a las limitaciones programáticas.
- Llevar a cabo estudios *trade-off* y seleccionar el concepto de sistema junto con las soluciones técnicas.

- Establecer una definición de diseño preliminar para el concepto de sistema seleccionado.
- Determinar el programa de verificación, incluyendo la filosofía del modelo.
- Identificar y definir interfaces externas.
- Preparar la especificación del siguiente nivel (diseño crítico).
- Iniciar la adquisición de artículos de largo plazo, requeridos para cumplir con los tiempos del cronograma de la misión, como las cargas útiles.
- Preparar el plan de mitigación de desechos espaciales y el plan de eliminación.

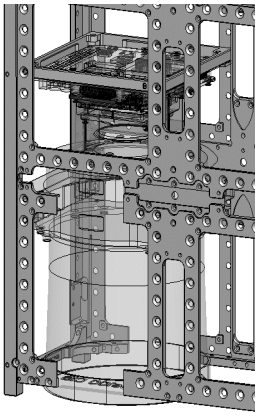
Los estudios *trade-off* permitieron que el equipo del SAT-CHIRIBIQUETE desarrollara una comprensión de la compleja relación entre los requerimientos, las opciones de diseño realizadas para abordar cada requerimiento y las consecuencias a nivel del sistema de la suma de las opciones de diseño. Según lo establecido por Cilli y Parnell, "los estudios *trade-off* son herramientas críticas que proveen información para respaldar la toma de decisiones del ingeniero de sistemas y el gerente del proyecto" [8]. Estos análisis incluyeron:

- Reporte de diseño: análisis de budgets del sistema (masa, generación de potencia, consumo de energía, link de descarga y generación de datos).
- Reportes térmicos y mecánicos: la estructura tradicional de 6U de GomSpace debió ser modificada, ya que, debido a la distribución de los subsistemas y el alojamiento de la cámara electroóptica, demandaba un reacondicionamiento de las paredes -Y y +Y del satélite (ver Figura 2). Además, se diseñaron soportes para el ensamble de la cámara, del espectrómetro y del Star Tracker, este último con requerimientos especiales, tales como que debe estar en una inclinación de 9° con respecto al eje Y.

Con la disposición de la Figura 2, se aseguraba la correcta conexión de la cámara con el sistema OBC, a través de tecnología *spacewire*. Durante la revisión de la fase, se evidenció la limitación del campo de visión de uno de los sensores ADCS del satélite, el rastreador de estrellas o en inglés Star Tracker. Para solucionar esta novedad, se dispuso una inclinación de 70° y 110° de los paneles solares los cuales ofrecerían una protección al sensor ante la luz solar y la luz que refleja la luna y, adicionalmente, optimizarían la generación de potencia eléctrica.

Figura 2.

Cortes en las paredes de la estructura +Y y -Y



Fuente: CITAE, 2022

2.4. Fase C: Diseño Crítico

Esta fase de diseño finaliza con la revisión del diseño crítico, o en inglés Critical Design Review (CDR), donde las partes interesadas y desarrolladores evalúan la adecuación del diseño y la definición de interfaces. De acuerdo con la ESA, las tareas de mayor nivel son conducidas por la filosofía del modelo, como se observan a continuación:

- Completar el diseño a detalle de los sistemas en todos sus niveles.
- Producción, desarrollo, prueba y precalificación de la selección de elementos y componentes críticos.
- Finalización del desarrollo del AIT plan.
- Definición detallada de las interfaces externas e internas.

Los diseños del arnés eléctrico, que representan casi el 20 % de la masa del nanosatélite, conectan las interfaces eléctricas y llevan los datos necesarios para la comunicación dentro del bus satelital. Gran parte de los arneses fueron productos desarrollados previamente por GomSpace y debían ser identificados dentro del satélite. Para ello se creó el diagrama de cableado *(Wiring Diagram),* el listado de cables *(Wiring list)* y la tabla asignación de canales *(Chanels Allocation*). Como resultado, se produjeron 46 cables de los cuales 8 fueron diseños personalizados para el SAT-Chiribiquete.

En esta fase, los análisis de rendimiento, en el marco operativo de la misión, buscaban establecer el comportamiento del nanosatélite a nivel térmico, mecánico y actitudinal. El SAT-Chiribiqute estará expuesto a temperaturas entre -45°C a 35°C durante su operación en el espacio. Gracias a las metodologías de análisis del Space Thermal Control Handbook [9], el equipo FACSAT-2 logró establecer que los sistemas y subsistemas tendrían la capacidad de operar dentro de este rango de temperatura debidamente protegidos dentro de la estructura.

Por otra parte, la evaluación de las modificaciones de la estructura de 6 unidades debía asegurar el bienestar del satélite durante el lanzamiento. Gracias a las simulaciones de vibración aleatoria, se determinó que el desplazamiento de la estructura del satélite sería inferior a 0.004 mm, lo cual no representaría un peligro para la misión.

Por último, para las fases LEOP, se debía establecer la capacidad del satélite de estabilizarse después del lanzamiento y, durante la operación, establecer su capacidad para poder realizar el apuntamiento para la toma de imágenes y descarga de datos. Para ello, se realizó el análisis de ADCS y se obtuvo un error de conocimiento absoluto (AKE) inferior a 0.7 grados (3-sigma), cumpliendo con los requerimientos de la misión.

Como bien establece la ESA, en esta fase se debe dar cierre a los diseños del sistema. El equipo FACSAT-2, a través de la definición de interfaces, identificó la necesidad de diseñar y manufacturar una tarjeta electrónica PCB para la comunicación entre la carga secundaria (espectrómetro) y la computadora del nanosatélite, para asegurar la compatibilidad tecnológica. Se dio la oportunidad, dentro de la misión, para que la FAC desarrollara una placa de circuito impreso (PCB) de seis capaz de grado espacial según el estándar ECSS-Q-ST-70-12C. La PCB de la carga útil se sometió a las pruebas de validación ambientales en las instalaciones de GOMspace: ciclo térmico, estrés térmico y radiación TID; ejecutadas según el programa de calificación de GOMspace.

Al igual que los diseños estructurales y la selección de componentes de la arquitectura satelital, las actividades relacionadas al software se desarrollaron según el *software engineering handbook* [10]. El ciclo de vida del software se seleccionaba según los entregables, la evolución de las especificaciones y el nivel de iteración. No obstante, se debe asegurar que las últimas versiones del software estén disponibles para la campaña de pruebas del satélite.

En esta etapa, el artículo hace mención a la fase de Manufacture Readiness Review (Revisión de Alistamiento de Manufactura o MRR).

En esta etapa, la misión FACSAT-2 debió desarrollar varios programas de software, incluyendo el software de control de las cargas útiles que deben responder a los modos de operación del nanosatélite planteados en el concepto de operación: detumbling, safe mode, Nominal mode (apuntamiento directo al sol), Imaging mode y Downlink mode; el software de encriptación y desencriptación desarrollado bajo el estándar del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST acrónimo en inglés), para la transmisión y descarga segura de los datos del SAT-Chiribiquete y el software de control de misión, el cual para la fecha de realización de este artículo aún se encuentra en desarrollo, y que permitirá el control y monitorización del activo espacial y a futuro de otros satélites de la FAC.

Una vez finalizada la fase de diseño crítico, se da paso a la fabricación de los componentes, donde se prepara cada uno de estos hasta tenerlos completamente disponibles. A esta fase se le denomina Revisión de alistamiento de manufactura o *Manufacture Readiness Review* (MRR) y también garantiza que se encuentre listo el manual de integración y los procedimientos de prueba a nivel de subsistema y sistema. Al finalizar el MRR, se aprueba el inicio de las tareas de ensamble e integración del nanosatélite correspondientes a la Fase D – calificación y producción.

3. METODOLOGÍA

De acuerdo con el estándar ECSS-E-ST-10-03C, las actividades de ensamble, integración y pruebas deben ser guiadas por el plan maestro AIV. En la misión FACSAT-2, este documento esquematiza las actividades de ensamble e integración que dan como resultado un *Proto-Flight Model* (PFM). Además, presenta las pruebas a ejecutar en el segmento espacial, que incluyen:

- Pruebas de verificación: estas actividades abarcan la calibración de sensores (ADCS y cargas útiles en conjunto), las *Reduced Functional Test* (RFT), *Full Functional Test* (FFT) del satélite y la verificación de propiedades físicas, como dimensiones, masa, *fit-check* e inspección visual. Estas pruebas se realizan siguiendo los requisitos del proyecto, los estándares de GomSpace y los requisitos del vehículo de lanzamiento.

- Pruebas medioambientales (EVT): estas pruebas se definen de acuerdo a los requerimientos del lanzador, siendo mandatorio cumplir con pruebas de vibración aleatoria y compatibilidad electromagnética [11].

Una vez que se complete el flujo del proceso, las pruebas posteriores se centrarán en las pruebas de misión para funciones específicas del software, pruebas funcionales de las cargas útiles y escenarios de falla. La prueba final será un ensayo de un ciclo durante la vida útil del satélite, que incluirá despliegues, simulación de modos de operación y funcionamiento del sistema eléctrico. Finalmente, se llevará a cabo el alistamiento y el proceso de PODing (integración al Picosatellite Orbital Deployer).

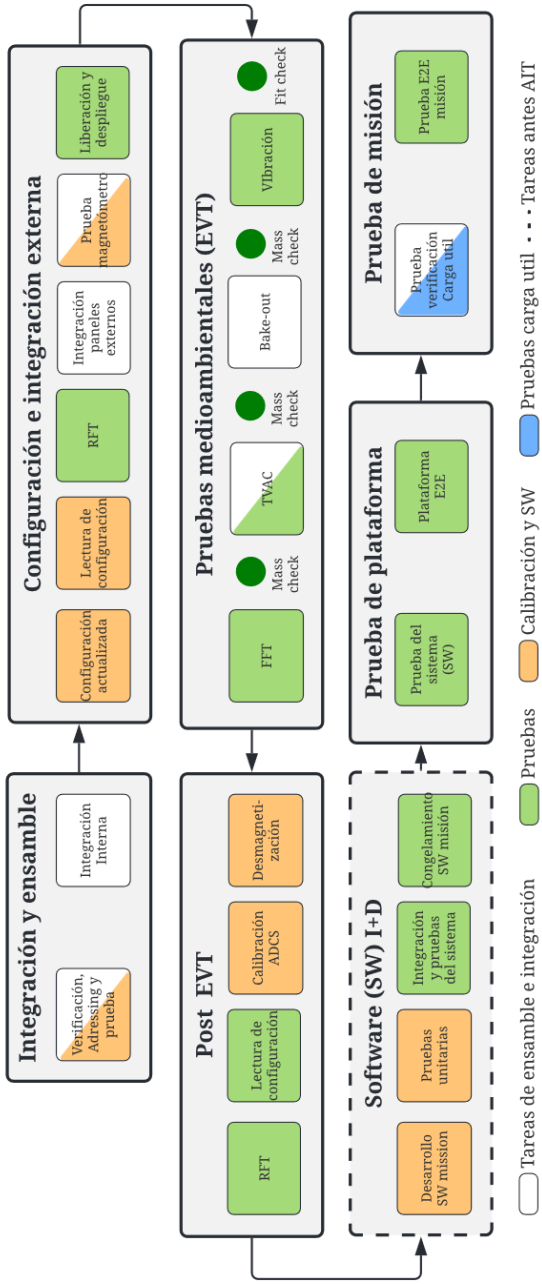
3.1. Campaña AIT

Esta sección proporciona un resumen de la metodología (ver Figura 3), las filosofías consideradas y los principales resultados de la campaña AIT del SAT-Chiribiquete. Las pruebas del segmento en tierra se explicarán únicamente a alto nivel, ya que se llevan a cabo con el fin de asegurar el enlace de conexión con el segmento espacial o End-To-End (E2E).

1. Prueba de nivel de subsistema (producto).
2. Prueba de modelo de ingeniería (EM acrónimo en inglés)
3. Prueba a nivel de modelo de vuelo (PFM).

La campaña AIV busca automatizar tanto como sea posible el programa de pruebas, para ello se usan *scripts* de pruebas con su correspondiente registro de ejecución para identificar las posibles anomalías en los subsistemas o en el nanosatélite. En total se estiman 43 pruebas de verificación que alimentarán el reporte de revisión de aceptación o *Acceptance Review (AR),* finalizando así la fase D del ciclo de vida de la misión.

Figura 3.
Esquema simplificado de la campaña AIV para el nanosatélite de la misión FACSAT-2.



Fuente: Elaboración propia

3.2. Laboratorio y espacio de trabajos

Las actividades de ensamble, integración y pruebas del SAT-CHIRIBIQUETE se llevan a cabo en los laboratorios ISO 7 (clase 10.000), para el manejo de sensores y en los laboratorios ISO 8 (clase 100.000) para el bus satelital, proporcionados por el aliado tecnológico GomSpace, como se observa en la Figura 4.

Para utilizar estas instalaciones, el personal debe cumplir con una serie de reglas fundamentales que incluyen:

- Evitar la introducción de agentes contaminantes en el ambiente controlado, como comida, líquidos, equipos sin desinfectar, hojas de papel, cuadernos, y se debe abstener de usar cremas, perfumes u otros elementos que puedan evaporarse.

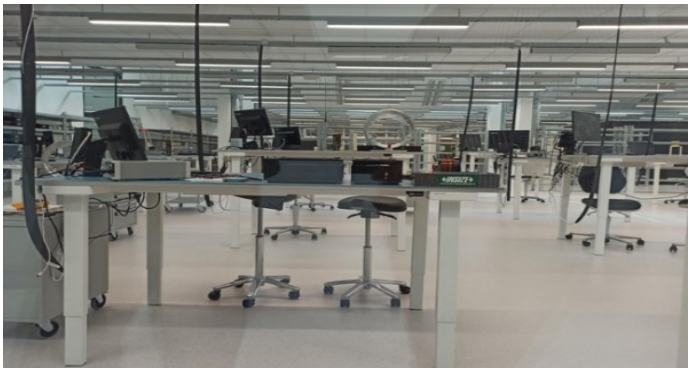
- Utilizar la vestimenta adecuada, que incluye bata, zapatos antiestáticos, cofia y guantes.

Para acceder a la zona limpia, el personal debe seguir los procedimientos de descarga electrostática y portar la pulsera antiestática en todo momento, ya que de lo contrario podría afectar los componentes electrónicos del satélite.

Estas medidas son esenciales para mantener la integridad y la limpieza de las instalaciones y garantizar un entorno adecuado para el ensamble y las pruebas del SAT-Chiribiquete.

Figura 4.

Laboratorio ISO 8 para integración del bus satelital instalaciones GOMspace Aalborg, Dinamarca



Fuente: GomSpace.

El manejo de los componentes implica la supervisión de un ingeniero AIT, que ostenta y comparte las buenas prácticas para la integración y pruebas. Adicionalmente, debe participar el ingeniero de sistemas quien valida el cumplimiento de los requerimientos en todos los niveles del sistema a medida que se avanza con las actividades de esta fase.

3.3. Integración y ensamble

Este capítulo del AIV describe el plan que se espera seguir durante la fase de integración del nanosatélite del FACSAT-2. Sin embargo, a través del documento de Manual de Integración del Sistema (SIM, siglas en inglés), se definen las herramientas, especificaciones ambientales, pasos a seguir, tareas de calibración y asignación de puertos de comunicaciones *addressing*.

3.3.1. Verificación de componentes, addressing y prueba

Después de la producción, todos los subsistemas y componentes pasan por sus correspondientes procedimientos de verificación, junto con la actualización de software y definición de parámetros. En el caso de FACSAT-2, existen dos sistemas en específico que requieren una verificación o calibración antes y después de la integración: ADCS y cargas útiles. Los procedimientos

están definidos con su propósito, métodos y el equipo adicional necesario a usar, si aplica.

3.3.1.1. Simulación ADCS

Se realizan pruebas dirigidas en el giroscopio, los *Fine Sun Sensors (FSS)*, el magnetómetro, las ruedas de reacción y los magnetorques para verificar los parámetros de simulación. Todos los productos ADCS también se comparan con los parámetros de rendimiento a nivel PFM. El rastreador de estrella *Star Tracker* se calibra a través de una imagen de prueba para refinar el algoritmo y verificar la funcionalidad del sensor. El enfoque de verificación requerido para cada componente se especifica en el AIV plan.

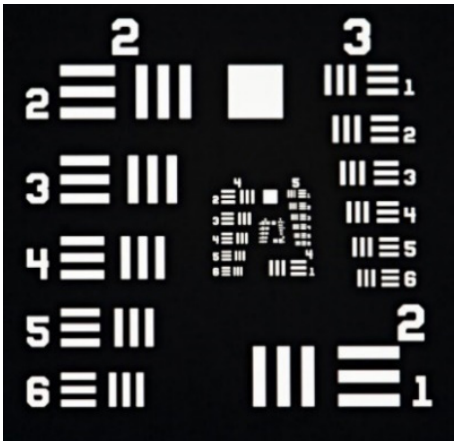
3.3.1.2. Cargas útiles

El proveedor de la cámara electroóptica, Simera, ensambla y prueba la carga útil del FACSAT-2 antes de la integración. Esto incluye pruebas generales como vibración, ambiente térmico, prueba de vacío térmico, radiación, prueba de choque según NASA GEVS y ECSS-E-ST—10-03C.

La única prueba requerida antes y después de las pruebas ambientales es la llamada *Optical Performance Confirmation Procedure* o procedimiento de confirmación de rendimiento óptico. La prueba consiste en una inspección visual de un objetivo de resolución USAF 1951 (ver Figura 5) haciendo uso de un colimador. Estas imágenes brindan una salida identificable, así como la confianza de que la cámara puede producir una imagen enfocada.

Por otra parte, el espectrómetro se somete a una prueba de radiancia para calibrar el algoritmo del sensor.

Figura 5.
Objetivo de resolución USAF 1951 en negativo MIL-STD-150[a]



Fuente: USAF, 1951

3.3.2. Integración interna

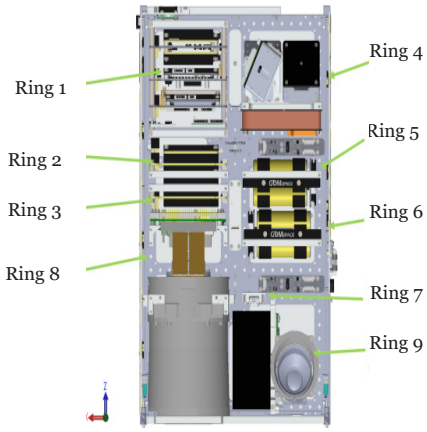
Todas las actividades de integración inician con el alistamiento de la mesa de trabajo. En primer lugar, se debe encontrar un computador, una cámara fotográfica para el registro, caja de herramientas y demás insumos. En segundo lugar, debe encontrarse disponibles los archivos AIV plan, lista y manual de cableado, Bill Of Materials (BOM), y el manual de integración. A través del BOM, se controla el estado de los componentes, números de serie, estado de fabricación, disponibilidad, entre otros.

Cada componente, cable y ensamble debe ser pesado para su toma de registro escrito y fotográfico. Los tornillos, tuercas, arandelas y elementos mecanizados deben ser sometidos a una limpieza con alcohol isopropílico y pasar por una máquina de ultrasonido para eliminar impurezas no deseadas. Las herramientas y demás instrumentos deben estar calibrados de acuerdo con lo descrito en el manual de integración (por ejemplo, el torquímetro). Una vez se finalice con la preparación, se procede a iniciar con las tareas de ensamble de anillos (Rings), continuando con las pruebas individuales de los anillos y finalizando con la integración interna.

La integración del SAT-Chiribiquete se lleva a cabo según el esquema de la Figura 6 y según la definición de los anillos (ring) de la Tabla 2.

Figura 6.

Esquema SAT-Chiribiquete integración interna a través de Rings



Fuente: CITAE, 2022

El Sistema inercial de coordenadas facilita la ubicación y disposición de los componentes dentro del satélite y los análisis de orientación orbital. El eje +Z apunta hacia el lado 2U y en dirección al Ring 1 y Ring 4, mientras que el eje +X apunta hacia el lado 3U donde se montan los paneles solares modulares en el cuerpo de 7 celdas en dirección al Ring 1, Ring 2, Ring 3 y Ring 8. El eje +Y apunta al lado 6U siguiendo la "regla de la mano derecha".

Tabla 2.

Anillo de integración SAT-Chiribiquete

Ring	Sistema
1	Aviónica: Nanodock ADCS, Nanodock DMC, split board FSS, Nanodock P60 (EPS).
2	Nanocom SDR (*Software Defined Radio)* Banda X
3	Nanomind Payload OBC (On Board Computer)
4	Actuadores: ruedas de reacción y magnetorque.
5	PBX#2: paquete de baterías
6	PBX#1: paquete de baterías
7	Nanosense M315: magnetómetro
8	Carga útil cámara
9	Star Tracker + Carga útil espectrómetro

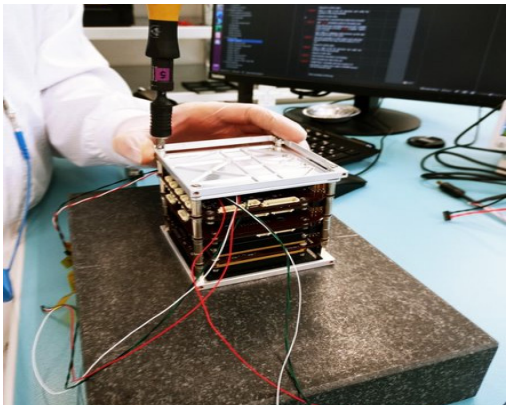
Fuente: Elaboración propia

Se procede a integrar de manera independiente los componentes en el Ring 4 y el Ring 7. Luego, se integra el Ring 1 (ver Figura 7) y se energizan las tarjetas a 3.3 V. Se actualizan las versiones del software disponibles y se reasignan los puertos de salida a través de un cable programador. Se debe comprobar que las unidades de distribución de potencia eléctrica (PDU, acrónimo en inglés) tengan los canales y el voltaje correspondiente según el documento *Frecuency allocation* [1] (3.3 V, 5 V y 12 V).

Posteriormente, se integra el Ring 5 y el Ring 6, asegurando el correcto balanceo energético de las baterías y la protección de los puertos de salida con jumpers. A continuación, se integra el Ring 9 después de modificar el cuello de soporte para el ensamble del Star Tracker. De esta forma, se ubica el sistema de sujeción del rastreador de estrellas con el soporte del espectrómetro, el cual también alberga la PCB de interfaz de la carga útil secundaria. Para finalizar, se integran los Ring 2, Ring 3 y Ring 8 sin novedad.

Figura 7.

Ejemplo integración individual del Ring: integración y balanceo Ring 1 aviónica



Fuente: CITAE, 2022

Los Rings deben pasar por una revisión dimensional y volumétrica de acuerdo con el SIM, que es la verificación de las propiedades físicas requeridas por el programa de calificación. La tolerancia en la fabricación es mínima, por lo que se debe garantizar que el ensamble se realice rigurosamente.

1 El diseño del armes eléctrico es único para cada satélite, por ende, la asignación de frecuencia para los pines de las PDU satisface las necesidades de potencia de cada uno de los subsistemas.

Las primeras actividades sobre la estructura de seis unidades (6U) se realizan a continuación. En primer lugar, se acondiciona el sistema de liberación (TSP HDRM). En segundo lugar, se instalan los housing de los Fine Sun Sensors (FSS), aunque estos sensores no se instalarán hasta que se complete la conexión eléctrica del satélite. Para finalizar, se integran los kill switches (KS), que se conectarán posteriormente al Ring 1.

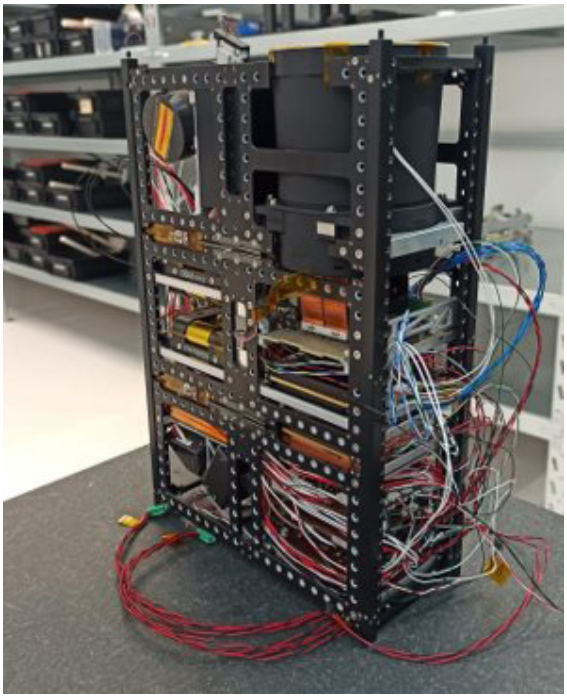
La integración interna comienza con la integración del Ring 1 en la estructura. Luego, se ensambla el Ring 2 y se realizan las conexiones con el Ring 1. Inicialmente, se había planeado manejar el cableado por la parte interna del satélite, lo que llevó a que los conectores se ubicaran de esa manera. Sin embargo, esta disposición no facilitaba la conexión de los componentes externos. Por lo tanto, se giró el Ring 1 180° con respecto al eje Z y se ancló en la cara frontal -Y de la estructura, dejando libre los cables de los FSS para su conexión. El Ring 4 se ensambla siguiendo la numeración de las ruedas inerciales. Por otro lado, el giroscopio y el magnetorque se ubican hacia la parte externa del Ring, apuntando a la cara -Z. El Ring 2 se integra asegurando la facilidad de conexión del Software-Defined Radio (SDR) con el Ring de aviónica.

La integración del Ring 5 y 6 comienza con la conexión del puente de alimentación. Luego, se colocan las baterías y se mide la tensión eléctrica. Según el manual, las PBX#2 deben estar debajo del sistema de liberación +Y+Z, y la PBX#1 se ubica por encima del sistema de liberación +Y-Z.

La PCB de interfaz entre el espectrómetro del Ring 9 se somete a una prueba funcional (Test Link) con el fin de obtener los datos de tiempo de repetición, número de envíos, entre otros. La tarjeta muestra un consumo de entre 23.08 mA y 23.9 mA, lo que se considera un resultado satisfactorio. Se realizan las conexiones al Ring 3 y a los sistemas de potencia eléctrica (EPS) del Ring 1 según corresponda.

El Ring 8 se integra dentro del satélite, asegurando la protección del lente óptico, y se cierra la estructura, concluyendo así la integración interna del SAT-Chiribiquete, como se observa en la Figura 8. El Ring 7, correspondiente al magnetómetro, no se integró completamente debido a que, según el análisis de ingeniería de sistemas, en su posición original, el paquete de baterías generaba ruido sobre el sensor debido a la inducción de un campo electromagnético, lo que afectaba la medición de la señal.

Figura 8.
Integración interna finalizada para el SAT-Chiribiquete



Fuente: CITAE, 2022

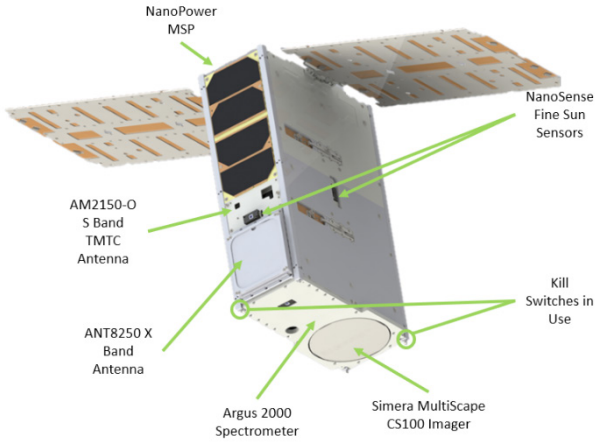
Al finalizar la integración interna, todos los arneses eléctricos deben encontrarse enrutados, quedando pendiente la conexión de los FSS, estos se identifican con unas cintas amarillas y con el número del FSS.

3.4. Configuración e integración externa

La integración externa comprende el ensamble y puesta a punto de los paneles de cobertura o *cover plates,* el soporte para antena banda S, paneles solares modulares (MSP acrónimo en inglés) y paneles solares desplegables no-rotables (DSP acrónimo en inglés) como se indica en la Figura 10 .

Figura 9.

Esquema integración externa SAT-Chiribiquete



Fuente: CITAE, 2022

En esta fase de la campaña AIV, se llevaron a cabo los primeros RFT (Reduced Functional Test), los cuales se efectúan a nivel de subsistemas, y en ellos se comienza a refinar la configuración y la comunicación entre los mismos. Durante este proceso, el satélite se encendió por primera vez, lo que permitió identificar tareas de configuración, una parte normal del proceso de ingeniería que se debe completar antes de realizar una prueba funcional limitada.

Una vez que los elementos desplegables del nanosatélite se acondicionaron en su configuración de vuelo, se estuvieron listos para avanzar con las mediciones de propiedades de masa, pruebas funcionales, pruebas de liberación y magnetómetro, y la caracterización de los sistemas de control de actitud y determinación de la posición (ADCS, por sus siglas en inglés) de la campaña de calificación. Esto dio paso a las pruebas EVT (Environmental Verification Tests), pruebas post EVT, pruebas de software, pruebas de plataforma y pruebas de misión.

3.4.1. Configuración actualizada

Una vez que el satélite tiene todos los componentes integrados, se procede a realizar una actualización del software para cada uno de los sistemas. En este punto, se llevó a cabo la integración del software de control de las cargas útiles. Sin embargo, durante las primeras pruebas, se detectó una conexión

incorrecta en la carga útil principal, la cámara electroóptica de Simera. Esta cámara no contaba con la funcionalidad de Pulso por Segundo (PPS), que permite la sincronización de diferentes componentes a bordo del satélite. Aunque esta funcionalidad estaba implementada en el modelo de ingeniería, no estaba operando en el satélite. Tras una inspección minuciosa del sistema, se identificó que el problema estaba relacionado con un pin en la tarjeta electrónica del conector que impedía el flujo de información. Para corregir este problema, fue necesario desmontar la estructura exterior y retirar el Ring 8 siguiendo las instrucciones del fabricante de la carga útil. Después de solucionar este inconveniente, la cámara se reensambló para continuar con la fase de integración.

3.4.2. Lectura de configuración

Las pruebas de lectura, también conocidas como "*readout*," se realizan con el propósito de verificar el estado del software en cada componente y obtener los parámetros de potencia, datos y comunicación. En el caso del ADCS (Sistemas de Control de Actitud y Determinación de la Posición, por sus siglas en inglés), se realizaron múltiples actualizaciones debido a la complejidad en la integración y calibración de los sensores y actuadores que lo componen. Estas pruebas se ejecutan, según el plan de AIV, antes de la integración de los paneles externos y antes de la actualización y congelación del software. Esta actividad es esencial para evitar o reducir el riesgo de enviar el satélite a operación con un software a bordo que no haya sido verificado o validado en tierra.

3.4.3. RFT (Reduced Funtional Test)

El RFT es una breve prueba funcional que se realiza en diferentes etapas de la campaña AIT, estás incluyen:

- Verificación de todas las interfaces eléctricas y de potencia: verificación de conexión.
- Verificación del estado de la unidad: *autotest* o telemetría básica de la unidad (temperatura interna y voltaje)

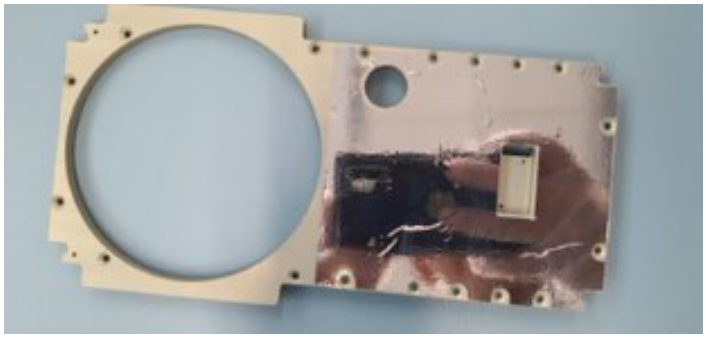
Los casos de prueba detallados y el plan de prueba se definen en el *TestLink*. Los casos de prueba se basan en pruebas funcionales estándar que el aliado tecnológico GOMSpace ha ejecutado en otras misiones. Estas pruebas no incluyen pruebas de radio frecuencia (RF) y no se realizan en los componentes externos.

El SAT-Chirbiquete en la actualidad ha sido sometido a pruebas RFT para la revisión del sistema EPS y COMs.

3.4.4. Integración Paneles externos

La integración de los paneles externos es el siguiente paso y se inicia con la incorporación de los cover plates y los paneles solares. Estos elementos proporcionan la protección mecánica y térmica necesaria para los sistemas a bordo del satélite. Al igual que en la integración interna, el procedimiento detallado se encuentra en el Manual de Integración del Sistema (SIM). Esto incluye una descripción de las conexiones eléctricas y las instrucciones para ensamblar el panel de preparación para vuelo (FPP, por sus siglas en inglés), los soportes para las antenas de comunicación y GPS, así como el montaje del deflector del *Star Tracker*. Este deflector proporciona protección al sensor óptico y evita el movimiento no deseado del instrumento después del lanzamiento, lo que podría afectar su precisión de apuntamiento. En la Figura 10, el equipo del FACSAT realiza la instalación de un adhesivo reflector en el cover plate -Z. Este adhesivo adicional refleja la luz solar hacia el exterior, evitando un aumento de la temperatura interna del nanosatélite debido a los efectos de la radiación solar y protege la cámara durante situaciones conocidas como *"hot cases,"* que se refieren al momento en que el SAT-Chiribiquete experimenta temperaturas máximas debido a su posición orbital.

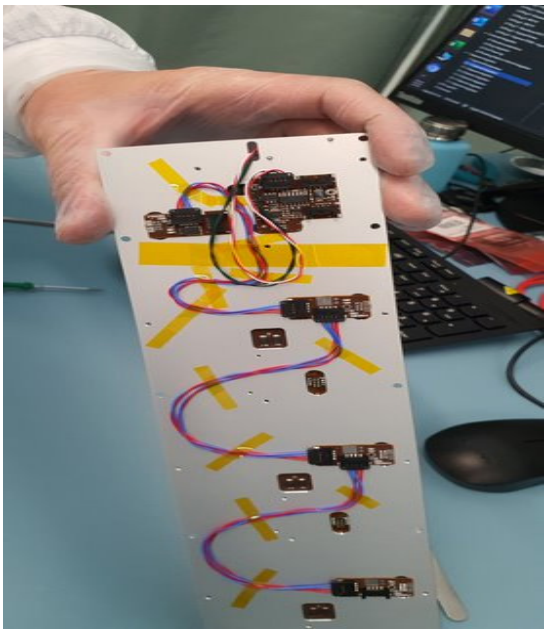
Figura 10.
Adhesivo reflector para cover plate -Z del SAT-Chiribiquete



Fuente: CITAE, 2022

También se adelantan las tareas de conexión y enrutamiento de los cables correspondientes a los FSS de los paneles solares modulares (ver Figura 12).

Figura 11.
Panel solar modular (+X): instalación y enrutamiento de las conexiones de los FSS con cinta kapton



Fuente: CITAE, 2022

3.4.5. Prueba de magnetómetro a nivel de sistema

Para El equipo buscó una solución para la ubicación del Ring 7, que corresponde al magnetómetro, y siguiendo el programa de calificación, realizaron pruebas del dispositivo en una sala limpia para evitar cualquier interferencia electromagnética. Se evaluaron cuatro posibles opciones de ubicación, limitadas por la densidad electrónica que presenta el nanosatélite.

Las pruebas consistieron en ejecutar un plan de vuelo sobre el modelo de vuelo, simulando los modos de operación del satélite mediante el encendido y apagado de los componentes electrónicos involucrados. Esto se hizo con el objetivo de observar y analizar cómo las señales emitidas por estos componentes afectan la lectura del magnetómetro. Los resultados y su análisis

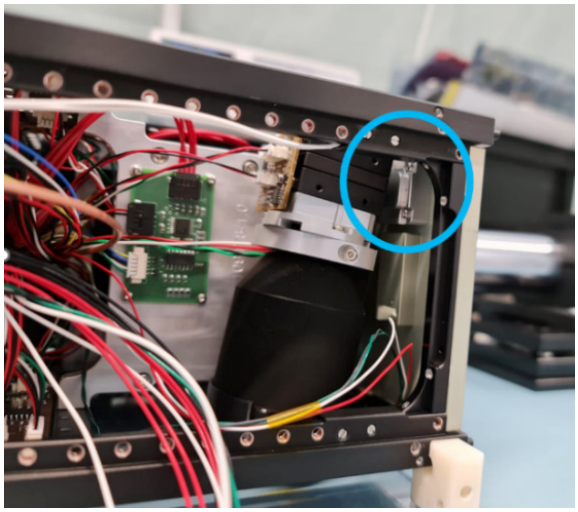
permitirán determinar si la ubicación propuesta para el sensor es la adecuada. Inicialmente, se colocó el magnetómetro entre el Star Tracker y el soporte de la Cámara Simera en el eje Z, como se ilustra en la Figura 12.

Los planes de vuelo se diseñaron para las siguientes operaciones con sus respectivos componentes:

- **Baseline:** Esta operación simula el estado del satélite después de su eyección del POD y antes de la acción de "detumbling" (control de giro). En esta operación, solo se activa el magnetómetro, con el propósito de observar el comportamiento del sensor en presencia del campo magnético terrestre.
- **Nominal:** Esta operación simula el estado de apuntamiento del satélite. En ella, se activan las ruedas de reacción en sus tres ejes y el magnetómetro, con el objetivo de observar cómo la señal electromagnética de este actuador afecta la medición del sensor.
- **Argus:** Esta operación simula la toma de datos con el uso del espectrómetro. Se activan el espectrómetro Argus, las ruedas de reacción y el magnetómetro para observar el impacto de la carga útil del espectrómetro en la medición del sensor.
- **Simera:** Esta operación simula la toma de imágenes con el uso de la cámara multiespectral Simera. En esta operación, se activan la cámara Simera, las ruedas de reacción y el magnetómetro para observar cómo la carga útil de la cámara afecta la medición del sensor.

Figura 12.

Posicionamiento preliminar del magnetómetro



Fuente: CITAE, 2022

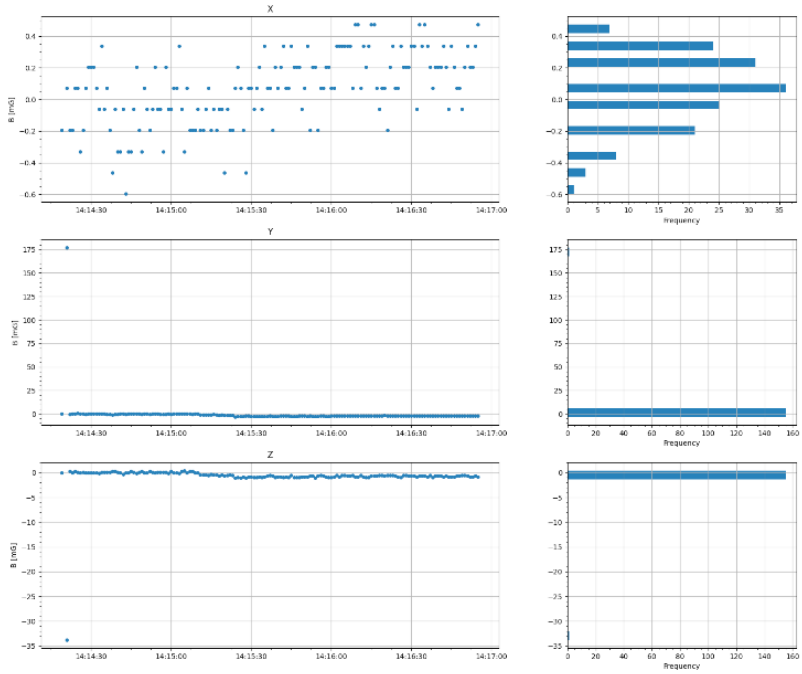
Las operaciones adicionales de prueba se diseñaron de la siguiente manera:

- **Payload:** En esta operación se simula la toma de imágenes utilizando ambas cargas útiles, la cámara Simera y el espectrómetro Argus. Se activan las ruedas de reacción y el magnetómetro con el fin de observar cómo ambas cargas útiles afectan la medición del sensor simultáneamente.
- **XBand:** Esta operación simula el intercambio de datos o la comunicación del satélite con la estación terrena. En ella se activa la antena banda X, las ruedas de reacción y el magnetómetro para observar cómo la antena de comunicaciones afecta la medición del sensor.

Los resultados de cada una de estas pruebas se reflejaron en las gráficas mostradas en la Figura 13.

Figura 13.

Resultado de datos procesados para ruido electromagnético sobre el magnetómetro



Fuente: GomSpace, 2022

Al examinar las lecturas, se puede notar que el eje X muestra un comportamiento normalizado con un sesgo que podría atribuirse a la influencia de las señales electromagnéticas emitidas por los componentes activos en esta operación. En cuanto a los ejes Y y Z, se observa un dato atípico al principio de las mediciones, lo que dificulta apreciar claramente la distribución de los datos. Estos valores atípicos se presentan únicamente al inicio de las mediciones, lo que corresponde a la inicialización del sensor y no indica ningún daño en el sensor ni un mal funcionamiento que afecte al resto de los componentes o sus operaciones futuras.

Luego de analizar los resultados de las seis pruebas, se concluyó que la posición definida debajo del *Star Tracker* (-Z, -X) es adecuada, ya que las lecturas no

se ven significativamente afectadas por el ruido generado por las baterías, las cargas útiles, las ruedas inerciales y el magnetorque.

3.4.6. Mecanismo de liberación y despliegue

El SAT-Chiribiquete cuenta con un sistema de despliegue de paneles solares (TSP HDRM) y de liberación de antena banda S. Incorporar los paneles solares hace parte de las tareas finales para terminar el ciclo de integración.

3.5. Pruebas medioambientales (EVT)

Las pruebas ambientales se enfocan en simular los escenarios térmicos y mecánicos a los que el nanosatélite estará expuesto una vez se encuentre en la fase de lanzamiento y en sus primeras órbitas (LEOP), así como durante su posterior operación. Estas pruebas abarcan ensayos de vibración, *bake-out* y ciclos térmicos en vacío (TVAC).

Las pruebas de Entorno de Vuelo o Pruebas Medioambientales (EVT), siguiendo el programa de calificación, se llevan a cabo después de que el satélite ha sido completamente ensamblado. No obstante, los resultados documentados en esta sección se refieren a pruebas EVT que se realizaron previamente a la integración externa, específicamente para el bus satelital y el espectrómetro.

3.5.1. Vibración

Las pruebas de vibración, de acuerdo con el plan de Ensamble, Integración y Verificación (AIV), se llevan a cabo después de realizar las actividades de verificación de ajuste. Durante estas pruebas, el satélite debe demostrar su capacidad para encajar adecuadamente en el compartimento de carga previamente designado, que en el caso del FACSAT-2 es el EXOpod de la empresa EXOLAUNCH.

El nanosatélite, denominado SAT-Chiribiquete, se somete a pruebas de vibración con el propósito de confirmar que cumple con los requisitos establecidos por la autoridad de lanzamiento y garantizar que resistirá el estrés del lanzamiento. Durante estas pruebas, el satélite se integra al

EXOpod, diseñado para una plataforma de 6 unidades, donde se incorporan sensores de aceleración tanto en el exterior como en las superficies internas del nanosatélite. Es importante destacar que el satélite debe estar apagado durante esta evaluación.

Antes y después de las pruebas de vibración, se deben llevar a cabo análisis de Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), así como una inspección visual del estado del satélite. Además, se realiza una prueba de despliegue de la carga útil FACSAT 2 y de los paneles solares. Los niveles de calificación para el Modelo de Vuelo de Producción (PFM) se determinan siguiendo los estándares de SpaceX Falcon 9 a través de una serie de pruebas de vibración.

- Estudio de resonancia.
- Vibración Cuasiestática
- Vibración aleatoria
- Estudio de resonancia (nuevamente)
- El éxito de la campaña de prueba depende si:
- El acelerómetro cumple con los requisitos para cada prueba, incluidas las tolerancias.
- Inspección visual
- FFT posterior a la vibración
- Los resultados esperados o criterios de éxito para esta prueba se basan en las siguientes condiciones:
- Las respuestas de frecuencia se compararán utilizando los estándares ECSS-E-ST-10-03 [12]
- Durante la inspección visual, no se puede encontrar señal de daños, y el aspecto físico del satélite debe ser idéntico al anterior a la vibración.
- La FFT debe mostrar resultados dentro de los valores esperados y estos valores deben coincidir con los resultados de la RFT/FFT antes de la prueba de vibración.

Por otra parte, el equipo encargado del proyecto FACSAT-2 reconoció la importancia de llevar a cabo la prueba cuasiestática. Esta prueba tiene como objetivo verificar el comportamiento de la carga útil principal, validando los análisis previamente realizados por el fabricante y asegurando que el sensor

cumple con los estándares establecidos en el programa de calificación. En este contexto, se estimó que la carga máxima aplicada al satélite sería de aproximadamente 22 G (gravedades terrestres). Sin embargo, se definió un rango de pruebas que consiste en 19 ciclos a una aceleración de 16 G y 5 ciclos a 22 G con el fin de evaluar de manera exhaustiva el desempeño del sensor y garantizar su adecuado funcionamiento en condiciones de estrés.

3.5.2. Bake-out

El proceso denominado "horneado" implica el aumento de la temperatura del satélite, simulando las condiciones del espacio en las que está expuesto directamente a la radiación solar. Antes de llevar a cabo esta prueba, se realiza un registro de la masa (*mass check)* del nanosatélite, con el propósito de verificar que la pérdida de masa sea inferior al 1%. Luego, el satélite se someterá a un proceso de desgasificación, que durará al menos 24 horas. Este proceso utiliza el método estándar para calcular la pérdida de masa total debido a materiales condensados, a través de cambios en la presión. Las condiciones requeridas para esta prueba son las siguientes:

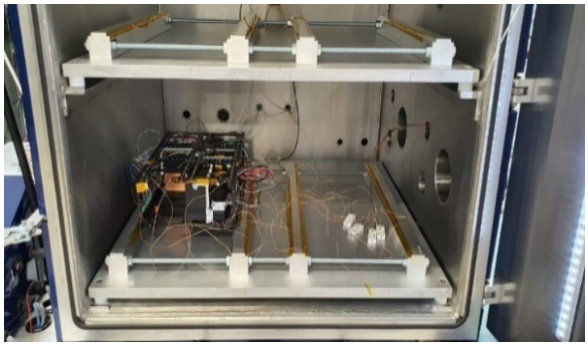
El *bake out* se llevará a cabo en un horno certificado específicamente para pruebas espaciales. Durante la prueba, se deben proteger las siguientes superficies ópticas sensibles utilizando cinta Kapton.

- *Star Tracker*
- Sensor óptico de la cámara Simera
- Elementos fotosensibles FSS

Los registros preliminares del proceso de "mass check" reportaron un valor de 4766.6 gramos. Una vez que la plataforma se colocó dentro de la cámara, se conectaron los sensores térmicos para verificar el correcto funcionamiento de cada uno de ellos. El proceso de horneado se programó para durar 24 horas. En la primera fase, la temperatura se redujo mediante la desgasificación de la cámara y luego se aumentó a 50°C para completar el tiempo total de horneado. Al finalizar la prueba, se deben igualar las presiones y realizar una revisión final del peso para confirmar que se ha mantenido dentro de los límites establecidos.

Figura 14.

Plataforma SAT-Chiribiquete dentro del horno previo a la prueba de bake out



Fuente: CITAE,2022

Como resultado, se evidenció una pérdida de masa de 0.009 %, cumpliendo con los estándares establecidos para la prueba.

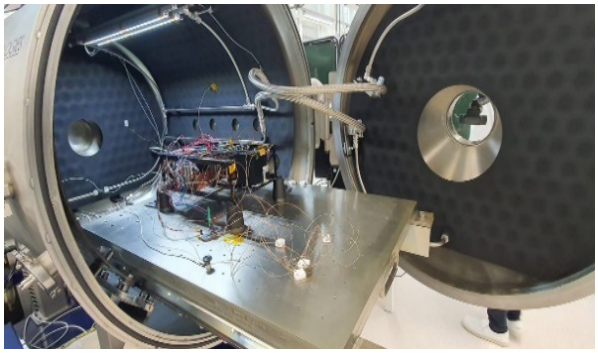
3.5.3. Pruebas de ciclo de vacío térmico TVAC

Las pruebas de ciclo de vacío térmico, al igual que el bake out, son precedidas por el *mass check* del satélite. En la TVAC, se busca verificar el rendimiento funcional del SAT-Chiribiquete en diferentes condiciones de temperatura y en vacío. Esta prueba también garantizará que el nanosatélite continúe funcionando como se espera después de que se haya sometido a un ciclo de temperatura. Para ello, la plataforma debe estar en configuración de vuelo con los paneles contraídos. Los límites de temperatura y presión se establecen en el ECSS-E-ST-10-03 [12]. Para la prueba preliminar realizada en el nanosatélite sin la cámara electróptica, se conectaron los sensores de cámara TVAC LACOtech (ver Figura 15) de acuerdo con el diagrama de sensores entregado por el ingeniero de sistemas. Se realizaron 5 ciclos térmicos que iniciaron con la desgasificación de la cámara TVAC a temperatura ambiente (30°C).

1. Incremento a 45°C por dos horas.
2. Disminución a -20°C por dos horas.
3. Incremento a 40°C por dos horas.
4. Disminución a -20°C por dos horas.
5. Incremento a temperatura ambiente por una hora.

Para finalizar, se regula la presión y se realiza un *check-out* al satélite. En esta oportunidad, el satélite no presentó ninguna novedad

Figura 15.
Plataforma SAT-Chiribiquete ingresando a la cámara de vacío térmico LACOtech



Fuente: CITAE, 2022

3.5.4. FFT

Los FFT, se realizan una vez se hayan concluido las pruebas medioambientales. Algunas de estas se realizan durante el ciclo TVAC para sistemas OBC, TMTC, ADCS y espectrómetro.

La FFT es una prueba funcional y de rendimiento que incluyen:

- Verificación de todas las interfaces eléctricas y consumo de energía.
- Verificación de todas las interfaces de datos, incluidos los volúmenes de datos y las tasas.
- Verificación de inhibiciones: físicas y de software (incl. temporizadores).
- Verificación de TM/TC, incluidas las tasas de adquisición de telemetría
- Verificación de polaridad de: *Star Tracker,* FSS, ruedas de reacción, paneles solares HDRM y liberación de antena TMTC (Banda S).
- Verificación de actualización de software y capacidades de carga.
- Verificación de la salud del iniciador del despliegue del panel solar.
- Verificación del estado del mecanismo de despliegue de la antena TMTC (Banda S).

3.6. Post EVT

Una vez culminadas las FFT y se confirme el correcto funcionamiento del mecanismo de liberación de la antena banda S y el despliegue de los paneles solares, es posible iniciar con la calibración y desmagnetización del ADCS.

La desmagnetización del PFM reduce la polarización magnética, garantizando un rendimiento óptimo del magnetómetro y el magnetorque a bordo. Todos los sensores y actuadores relacionados con ADCS deben verificarse con respecto a la orientación, el rendimiento y calibrarse en consecuencia, como se ha establecido en la sección 3.3.2. del presente artículo.

3.7. Investigación, desarrollo y pruebas de software de misión

El proceso de investigación y desarrollo del software de misión utiliza la siguiente estrategia: define los niveles, métodos, fases del software y la forma de prueba de las funcionalidades y las relaciones entre ellos junto con sus criterios de entrada y salida aplicables. Esto se logra mediante de 4 etapas:

1. Desarrollo del software de misión.
2. Pruebas unitarias e integración continua.
3. Pruebas de integración y de sistema.
4. Congelamiento del software de misión.

3.7.1. Desarrollo del software de misión

El desarrollo del software de misión está estructurado siguiendo los lineamientos establecidos en los estándares ECSS para productos de software aplicables al segmento espacial y terrestre, y se tiene en cuenta lo descrito en el “Space Product Assurance - Software Product Assurance” ECSS-Q-ST-80 [13].

De acuerdo con el concepto teórico de la ECSS, un principio fundamental del “Software Engineering Handbook” [10] es la relación “cliente-proveedor”, que se asume en todos los desarrollos de software. En este caso, el cliente, la Fuerza Aeroespacial Colombiana, adquiere dos productos asociados: el hardware y el software de un sistema, subsistema, conjunto, equipo o conjunto. La FAC ha elevado los requisitos funcionales y de rendimiento para

el hardware y el software, basándose en los principios y métodos de ingeniería de sistemas. Además, tiene la facultad de controlar la interfaz entre el software y el hardware. Los elementos de software se definen en el desglose del sistema en diferentes niveles. Sin embargo, es importante gestionar las interfaces software-software, independientemente del nivel en el que se produzca. Los requisitos se especifican mediante este proceso y proporcionan el punto de partida para la ingeniería del software.

Las revisiones y cierres documentales son los principales puntos de interacción entre la FAC y su aliado tecnológico, como se ha evidenciado a lo largo de este artículo. También se sincronizan procesos de ingeniería de software. Las revisiones relevantes para los procesos de ingeniería de software son SRR, PDR, CDR, QR, AR y ORR, según lo definido por ECSS-M-ST-10 [6]. Este Estándar ofrece además la posibilidad de anticipar el PDR en una revisión de requerimientos de software o "software requirements review" (SW-SRR), y el CDR en una revisión detallada de diseño o "detailed design review" (DDR). SWRR y DDR se ejecutan como una primera parte de las revisiones del diseño de software de misión.

Todas las revisiones son aplicables al software. Las revisiones ocurren en diferentes niveles del ciclo de vida de la misión y se secuencian de acuerdo con la planificación general del nivel del sistema. Tienen por objeto confirmar que las especificaciones técnicas, las funciones y el rendimiento se implementan correcta y completamente en el producto final. El resultado de este proceso se incluye en el "Archivo de Justificación del Diseño" (DJF).

Para la integración del software, en la fase PDR es necesario producir un plan de validación de software, conocido como "Plan de implementación". Este documento incluye las actividades de validación con respecto a la especificación técnica, que se llevan a cabo antes del CDR, y las actividades de validación con respecto a la línea base de requisitos, que se llevan a cabo antes del QR y posiblemente se repiten en AR. Este proceso puede incluir una revisión de preparación de prueba (TRR) para verificar que todas las instalaciones, los casos y procedimientos estén disponibles antes de cada campaña de prueba importante. Los resultados relevantes para la validación de los requerimientos técnicos se verifican en el CDR, y aquellos definidos en función de la línea base de requisitos se verifican en el QR, utilizando el DJF como entrada.

3.7.2. Pruebas unitarias e integración continua

Durante el proceso de integración de los distintos subsistemas al bus satelital, los componentes individuales son probados mediante RFT y configurados en paralelo a su integración, tanto a nivel mecánico como eléctrico, según las interfaces. Esto tiene como objetivo prevenir discrepancias entre componentes en las distintas capas de la red de comunicación.

En muchos casos, durante la integración, se requieren adaptadores especiales que no se contemplaron en el PDR o CDR para su uso en el satélite. En otras ocasiones, es necesario programar algunos dispositivos en buses de comunicación como I2C, CAN, Buses Seriales RS232 y otros que requieren de una capa de red para su funcionamiento.

Las pruebas RFT, a nivel de software, incluyen pruebas de verificación de todas las interfaces eléctricas y comprobación de los conectores. Además, se realiza la verificación del estado de salud de la unidad, autotest, pruebas básicas de telemetría que permitan observar los parámetros medidos por la propia unidad, como voltaje, corriente, temperatura, etc. Estas pruebas son esenciales para establecer el correcto estado de funcionamiento del dispositivo.

3.7.3. Integración y pruebas de sistema

Todas las pruebas se describen y documentan en la plataforma web de GomSpace, TestLink. Como resultado, se obtienen los informes de prueba después de cada ejecución de prueba. La plataforma de TestLink se utiliza para definir campañas de prueba, procedimientos y hacer seguimiento a los resultados una vez ejecutadas las pruebas. Un gran número de pruebas se ejecutaron en EM del FACSAT-2, siguiendo los estándares de calificación de GomSpace.

El personal que ejecuta las pruebas debe ser un personal calificado en software y pruebas, debido a la rigurosidad que ostenta la misión. Este personal puede ser miembro de cualquier unidad de desarrollo y prueba de software. Dentro del proyecto, el desarrollo de las pruebas de software se utiliza de dos formas: (1) como una declaración de dirección, para impulsar cambios en la forma en que se realizan las pruebas, y (2) para guiar a los proyectos en la planificación de sus actividades de prueba.

Es de suma importancia que el desarrollo y la estrategia de implementación busquen mitigar los riesgos de calidad del producto de software, identificar posibles casos de prueba y establecer los resultados esperados. La correcta ejecución de estas pruebas en las distintas etapas de la campaña de pruebas da como resultado un satélite que está correctamente validado a nivel de software en sus funcionalidades.

3.7.4. Congelamiento del software de misión

Una vez la investigación y desarrollo del software concluye con la ejecución y obtención de resultados exitosos en el proceso de validación durante la campaña de pruebas de software del satélite, se procede a generar una copia del código fuente cargado al satélite y sus distintos subsistemas. Posteriormente, se realiza la carga de la imagen final de software en todos los componentes de forma permanente en las distintas memorias protegidas de los subsistemas. Son estas imágenes protegidas de software que se cargan y regresan posterior a una situación de emergencia o evento seguro, de esta forma es posible evidenciar el correcto desempeño y recuperación del satélite ante la presencia de falla, mal funcionamiento o configuración.

Cabe resaltar que durante el tiempo de operación, nuevas imágenes de software pueden ser enviadas desde tierra al nanosatélite y cargadas en los distintos subsistemas del satélite para su uso en órbita. Sin embargo, la imagen protegida solo permite ser cambiada en tierra. Frente a esta novedad, se asegura la función de recuperación ante una falla en órbita del satélite a una imagen, configuración y parámetros plenamente conocidos que permitan la recuperación y levantamiento del satélite.

3.8. Preparación para vuelo

Las pruebas realizadas en tierra buscan homologar las condiciones abruptas del espacio exterior. No obstante, la preparación para vuelo involucra actividades reales de los segmentos terrestres y espaciales antes y durante de la puesta en órbita. Estas pruebas se orientan en la plataforma satelital y y su interacción con la estación terrena.

3.8.1. Prueba de plataforma

Las pruebas End-to-End (E2E) de la plataforma tienen como objetivo simular escenarios cercanos a lo que se espera que ocurra durante la misión. Los procedimientos y subsistemas que se probarán se definirán después de la MRR.

A) Pruebas Pre-LEOP:

- **Carga de software:** El sistema se probará contra la carga de cualquier nuevo paquete de SW destinado a un determinado subsistema. Esto se hace a través del FPP dispuesto para la conexión al bus satelital una vez se tiene integrado el satélite.
- **Watchdogs:** El satélite estará en una configuración de prueba final, conectado a un ordenador portátil a través del FPP para monitorizar la telemetría. Se simularán diferentes condiciones para ver la transición entre modos según se disparen los *watchdogs*.
- **Pruebas a nivel de sistema:**
  - » **Housekeeping:** Prueba destinada a comprobar que se comparten los datos correctos entre los diferentes subsistemas.
  - » **Descarga de datos:** Prueba destinada a verificar que el sistema es capaz de preparar y transmitir los datos de la carga útil.
  - » **Planificador de vuelo:** Se cargará un plan de misión en el satélite, que se espera que ejecute los comandos correspondientes según sea necesario.

- **Sistema de comunicaciones en banda S:** Esta prueba recreará el enlace en Banda S entre el satélite y la estación terrena, asegurando que la potencia de RF transmitida no exceda los valores de seguridad.
- **Sistema de comunicaciones en banda X:** Esta prueba recreará el enlace en Banda X entre el satélite y la estación terrena.
- **Prueba completa del ADCS:** El satélite se probará recreando las condiciones después del despliegue, lo que significa que el ADCS estará en modo de control Bdot.
- **Modos de alimentación:** Completo, normal, seguro y crítico. Esta prueba evalúa la funcionalidad del EPS incluyendo el canal de protección

y los diferentes modos. El satélite se somete a un ciclo de carga completo descargando las baterías hasta el modo crítico y cargándolas de nuevo mediante un flujo solar artificial.

- **Prueba de la carga útil.**

B) Pruebas para el LEOP:

- **Armado para el vuelo:** El sistema se pone en la configuración de vuelo y se conectan los *Remove Before Flight* (RBF).
- **Secuencia LEOP:** el objetivo de esta prueba es recrear las operaciones realizadas durante la primera fase de la misión, desde la liberación del satélite desde POD hasta el final del desprendimiento, la liberación de los paneles solares y el inicio de las operaciones nominales.

3.8.2. Pruebas de misión

El satélite se probará para los escenarios de misión presentados durante el proyecto, aparte de la secuencia LEOP y los casos individuales E2E. Esta prueba contiene todo el satélite como unidad de prueba y, si es necesario, se desconectará de la alimentación en tierra. Esta prueba de misión se realiza después de las pruebas E2E y después de las pruebas funcionales necesarias para garantizar que todos los subsistemas se comporten como se espera.

Los pasos por realizar son los siguientes:

1. Cargar las baterías desde la fuente de alimentación externa y conectar el satélite al ordenador del operador utilizando el FPP para su monitorización.
2. Configurar el satélite para que esté en modo nominal/carga de baterías.
3. Encender el satélite.
4. Descargar todos los parámetros del satélite.
5. Utilizar el/los receptores/es de tierra
6. Supervisar las operaciones a lo largo del tiempo. Si es necesario, cargar las baterías de la fuente de alimentación después de la adquisición, la transferencia, el enlace descendente.
7. Repetir el paso 5 (para comprobar que los resultados son consistentes).

8. Eliminar información generada y parámetros modificados.
9. Apague el satélite introduciendo la clavija RBF en el FPP.

4. RESULTADOS

El avance de la campaña AIT adelantado por la FAC en las instalaciones de GomSpace ha permitido culminar la fase de integración interna. En la actualidad, el equipo del FACSAT-2 adelanta las actividades de integración externa incorporando las pruebas RFT correspondientes. El documento SIM, que describe el paso a paso para la integración, ha sido actualizado con el fin de tener la información correspondiente a la ubicación final de los componentes en el bus satélite y las modificaciones de los conectores según el armes eléctrico. Esto como resultado del proceso de ingeniería.

Por otra parte, las pruebas medioambientales realizadas de forma preliminar han generado la primera aproximación real del satélite en las condiciones extremas del espacio. Igualmente, se ha evidenciado que el nanosatélite cumple con los estándares ECCS-E-ST-10-03C [12], demostrando que con el programa de calificación de GomSpace es posible cumplir con los requerimientos de misión y del sistema.

Se logró la calificación e integración de la PCB interfaz del espectrómetro diseñada por el equipo de la FAC y que será el primer producto hardware colombiano a ser lanzado al espacio. Así mismo, se avanzó con la integración del software de control de las cargas útiles el cual contiene un software de encriptación, una vez sea lanzado el satélite al espacio, el SW se convertirá en la primera interfaz espacial con el sello FAC. El software de control de misión del FACSAT-2 ha avanzado a una versión Beta 3, gracias a las pruebas realizadas en el modelo de ingeniería (EM) del satélite, permitiendo validar la implementación de comando y tareas específicas.

4. DISCUSIÓN

El ciclo de vida de la misión se establece con el fin de determinar las tareas progresivas para asegurar la puesta en órbita y operación del satélite, sin embargo, no es su única función debido a que tiene la capacidad de establecer los tiempos de ejecución de cada una de las fases. La campaña AIT del FACSAT-2 inició sus actividades en febrero del 2022 con una proyección de duración de seis meses, no obstante, los tiempos de ejecución de extendieron por factores no controlables pero dimensionados en la matriz de riesgos de la misión.

La complejidad de las cargas, las modificaciones estructurales, la actualización de software y los errores habituales presentados en estos procesos de ingeniería, han extendido los tiempos previstos para la campaña AIT. Con base a lo anterior, la FAC, quien lidera las actividades del FACSAT-2, pudo establecer que: 1) no es posible establecer un tiempo estándar AIT pues cada misión eleva necesidades únicas para la integración y pruebas, debido a que actúan en función de los requerimientos del cliente y del lanzador; 2) el proceso es variable debido a la naturaleza iterativa de la ingeniería aplicada en tecnologías espaciales.

5. CONCLUSIONES

La campaña AIT del SAT-Chiribiquete de la misión FACSAT-2 fue dividida en 7 fases. El orden secuencial ha permitido ejecutar y controlar el avance de las actividades y pruebas en función de la disponibilidad de los componentes para la integración a diferentes niveles del sistema, establecidos previamente según los métodos y filosofías AIT.

A pesar de los retos presentados en la campaña AIT del SAT-Chiribiquete, la experiencia del aliado tecnológico ha facilitado la comprensión y el avance de las actividades AIT. Por otra parte, la participación del equipo de trabajo de la FAC durante todo el desarrollo y pruebas del satélite representa un fortalecimiento en las capacidades espaciales de Colombia, pues es una oportunidad única para establecer este conocimiento en el país y continuar con el desarrollo de nuevas misiones. En la actualidad, la FAC es el referente del país al liderar las actividades de observación ultraterrestre y proveer imágenes satelitales del territorio colombiano.

Se espera continuar las actividades de integración externa y pruebas para asegurar el cumplimiento de los requerimientos de sistema, misión y lanzador; de esta forma, la FAC podrá adquirir experiencia invaluable para sus misiones futuras.

6. Referencias

[1] J. Richard. Wertz and W. J. Larson, *Space mission analysis and design*. Microcosm, 1999.

[2] I. Graessler, J. Hentze, and T. Bruckmann, "V-models for interdisciplinary systems engineering," in *Proceedings of International Design Conference, DESIGN*, 2018, vol. 2, pp. 747–756. doi: 10.21278/idc.2018.0333.

[3] J. Delgado, "DETERMINACIÓN DE UNA ÓRBITA COMERCIAL OPERACIONAL PARA LA MISIÓN SATELITAL DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA FACSAT-2," Universidad del Valle, 2021.

[4] Internacional Organization for Standarization (ISO), "Space systems: Space debris mitigation requirements (ISO 24113:2011)," 2011.

[5] E. Bastidas and J. Bonilla Palomino, "Informe No.1: Análisis de factibilidad técnica de la misión espacial FACSAT- 2 que incluya aspectos operativos, estratégicos y legales para el proyecto "estudio de investigación para el desarrollo de sensores satelitales FACSAT 2.2," Cali, Jul. 2021.

[6] European Cooperation for Space Standarization (ECSS), "Space Engineering: Technical Requirements Specification (ECSS-E-ST-10-06C Rev. 1)," 2009, [Online]. Available: https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10-06c-technical-requirements-specification/

[7] K. Woellert, P. Ehrenfreund, A. J. Ricco, and H. Hertzfeld, "Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations," *Advances in Space Research*, vol. 47, no. 4, pp. 663–684, Feb. 2011, doi: 10.1016/J.ASR.2010.10.009.

[8] M. v. Cilli and G. S. Parnell, "Systems Engineering Trade-off Study Process Framework," *INCOSE International Symposium*, vol. 24, no. 1, pp. 313–331, Jul. 2014, doi: 10.1002/j.2334-5837.2014.tb03151.x.

[9] C. D. Brown, *Elements of spacecraft design*. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002.

[10] European Cooperation for Space Standarization (ECSS), "Space engineering Software engineering handbook (ECSS-E-HB-40A11)," 2013.

[11] Space Exploration Technologies Corp (Space X), "Rideshare Payload User's Guide," 2020.

[12] European Cooperation for Space Standarization (ECSS), "Space engineering: Testing (ECSS-E-ST-10-03C)," 2012.

[13] European Cooperation for Space Standarization (ECSS), "Space product assurance: Software product assurance (ECSS-Q-ST-80C Rev. 1)," 2017.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS SÍSMICO MODAL ESPECTRAL DE UN HÁBITAT LUNAR

Carlos Andrés Patiño
https://orcid.org/0000-0002-7441-8616

Daniel Gómez Pizano
https://orcid.org/0000-0002-9738-8720

Universidad del Valle

Resumen

Varios organismos gubernamentales y empresas privadas han previsto el establecimiento de hábitats permanentes seguros e independientes de la Tierra en la Luna. En la mayoría de las investigaciones centradas en el diseño de hábitats lunares, solo se tienen en cuenta las cargas gravitacionales y de presión interna. Entre 1969 y 1977, la red sísmica del Apolo registró más de 13,000 eventos sísmicos, de los cuales 28 fueron clasificados sismos superficiales con magnitudes de momento superior a 4.1. En este estudio se propone la caracterización de la respuesta de un hábitat fabricado con concreto lunar recubierto de regolito sometido a cargas generadas por peso propio, presión interna y sismos superficiales con diferentes periodos de retorno. Se realizaron dos tipos de análisis: estático para las cargas de gravedad y presión interna y análisis modal espectral dinámico para las cargas sísmicas. Como demanda sísmica se utilizaron espectros medios condicionales de amenaza con periodos de retorno de 75, 475, 970 y 2475 años. Se demuestra que cuando la estructura se somete a cargas generadas por sismos lunares superficiales con periodos de retorno cortos las tensiones en la estructura son inferiores a las permitidas. Sin embargo, las tensiones máximas permitidas se superan en varias zonas de la estructura cuando esta se somete a sismos con periodos de retorno iguales o superiores a 475 años. Esta investigación utiliza información reciente sobre amenaza sísmica lunar y muestra que las cargas sísmicas pueden generar tensiones inaceptables en estructuras fabricadas con materiales in situ.

Palabras clave: Análisis sísmico, concreto sulfúrico lunar, hábitat lunar.

Abstract. Several government agencies and private companies have envisioned the establishment of safe earth-independent long-term habitats on the Moon. In most of the research focused on the design of lunar habitats, only gravitational and internal pressure loads are considered. Between 1969 and 1977, more than 13000 seismic events were registered by the Apollo seismic network where 28 were classified as shallow moonquakes with body wave magnitudes up to 5.0. The number of habitat designs that considers seismic loads by moonquakes is scarse. This study proposes the characterization of the structural response of a lunar habitat made of sulfur lunar concrete covered by regolith subjected to loads generated for self-weight, internal pressure and shallow moonquakes with different return periods. Two types of analysis are performed: static for gravity and internal pressure loads and dynamic modal

spectral analysis for seismic loads. Conditional mean spectra for shallow moonquakes with return periods of 75, 475, 970, and 2475 years are used as seismic demands. It is shown that when the structure is subjected to loads generated by shallow moonquakes with shorter return periods, the stresses in the structure are lower than those allowed. However, the maximum allowable stresses are exceeded in several zones of the structure when it is subjected to loads produced by shallow moonquakes with return periods equal to or greater than 475 years. This research uses recent lunar seismic hazard information and shows that seismic loads can generate unacceptable stresses in structures made of concrete fabricated with in situ materials.

Keywords: Lunar habitat, heismic analysis, sulfur lunar concrete.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un interés creciente por parte de agencias espaciales como la NASA, la Agencia de Espacial Japonesa (JAXA), la Agencia Espacial Europea (ESA), y compañías privadas como SpaceX, Boeing, Blue Origin, entre otras, en establecer asentamientos humanos permanentes fuera de la Tierra. El diseño de hábitats extraterrestres representa un gran desafío científico y tecnológico para la humanidad. La Luna, al ser el cuerpo extraterrestre más cercano y sobre el cual se tiene un conocimiento relativamente amplio, se convierte en el primer candidato a ser colonizado por el hombre. La seguridad y resiliencia de las estructuras lunares es la principal preocupación debido a las peligrosas condiciones existentes en la superficie lunar. Fluctuaciones extremas de temperatura, altas dosis de radiación, la actividad sísmica y los impactos de meteoritos son algunos de los fenómenos que pueden generar cargas extremas en las estructuras que serán parte de dichos hábitats. Varios autores han realizado algunas propuestas sobre las posibles configuraciones estructurales de los futuros hábitats (Kalapodis et al., 2020, Benaroya 2018). Sin embargo, incluso una inspección superficial de las propuestas muestra carencias en el análisis y diseño conceptual desde el punto de vista de la ingeniería estructural.

Durante las misiones Apollo se instaló una red sísmica que permitió evidenciar movimientos de la superficie lunar generados por actividad sísmica e impactos de meteoritos (Nunn et al., 2020). A lo largo de ocho años de registro se detectaron más de 13,000 eventos, los cuales fueron clasificados de acuerdo

con su mecanismo de generación y profundidad focal (Nunn et al., 2020). Los eventos fueron catalogados como superficiales, profundos, térmicos, impacto de meteorito y no clasificables (Nakamura 1977, Nakamura et al., 1982, Nunn et al., 2020). Los sismos de tipo superficial son los eventos menos frecuentes (28 eventos en ocho años de muestreo), sin embargo, son los eventos de mayor interés desde el punto de vista estructural, ya que estos pueden llegar a tener magnitudes de onda de cuerpo (Mb) mayores a 5.0 (Nakamura 1977, Watters et al., 2019, Nunn et al., 2020). Por lo anterior, se considera que el diseño de estructuras lunares debe tener en cuenta el efecto de este tipo de evento sísmico (Mottaghi y Benaroya, 2015a).

Por otra parte, a pesar de que la Luna y la Tierra se encuentran sometidos a ambientes propensos al impacto de meteoritos muy similares, la falta de atmósfera lunar hace que estos puedan impactar libremente la superficie de la Luna (Malla y Gionet, 2013). Partículas de diferentes masas (entre 0.1 a 100 kg) impactan constantemente y de manera aleatoria sobre la superficie de la Luna a velocidades que pueden alcanzar los 70 km/s (Allende et al., 2021). Los impactos de meteoritos poseen una energía cinética considerable por lo que pueden producir daños en las estructuras debido a impactos directos o efectos secundarios como impacto de escombros y movimientos del suelo. Por lo tanto, el impacto de meteoritos es un fenómeno que también se debe considerar en el diseño de estructuras ubicadas sobre la superficie lunar. Kalapodis et al (2020) muestran que el único estudio que considera efectos sísmicos es el realizado por Mottaghi y Benaroya (2015a), mientras que algunas investigaciones que consideran cargas por impacto de micro meteoritos son las desarrolladas por Malla y Gionet en 20139.

Hábitat lunar propuesto

El material para construir hábitats lunares es un aspecto crucial en la planificación. Existen principalmente dos opciones en la literatura: transportar materiales desde la Tierra o utilizar los recursos disponibles en la Luna. Debido a los costos elevados y las dificultades logísticas de traer materiales desde la Tierra, la opción más atractiva es utilizar los recursos lunares (Aulesa, 2000). Un material prometedor para la construcción de bases lunares es el concreto sulfúrico desarrollado por Toutanji et al. (2012). Este concreto se compone principalmente de suelo lunar y se fabrica calentando el suelo lunar. Ofrece ventajas significativas, como facilidad de fabricación, alta resistencia y durabilidad. Las propiedades mecánicas de este concreto se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1.

Propiedades mecánicas del concreto sulfúrico lunar

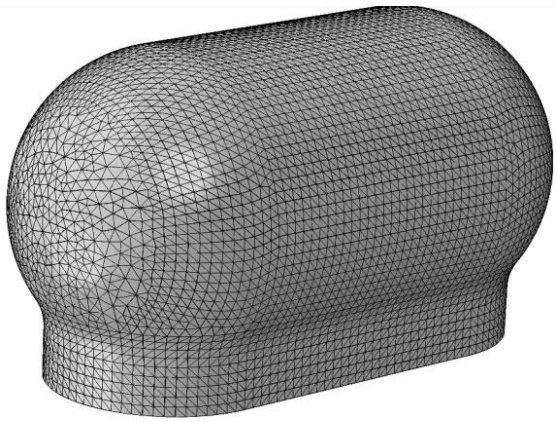
Parámetro	Valor
Densidad	2330 kg.m-3
Resistencia a la compresión	31 MPa
Resistencia a la Tracción	5.6 MPa
Módulo de elasticidad	20.7 GPa
Módulo de Poisson	0.31

Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de las estructuras civiles diseñadas y construidas en la Tierra, las estructuras lunares deben ser sometidas a presión interna para albergar tripulaciones durante largos periodos de tiempo. Esta condición es fundamental en el diseño de la geometría de un hábitat lunar, ya que se deben evitar cambios bruscos para prevenir la concentración de esfuerzos. Por lo tanto, se propone una estructura de forma cilíndrica con tapas esféricas, soportada sobre una base rectangular que rodea toda la estructura (Figura 1). El diámetro interno del cilindro y de las tapas esféricas es de 10 metros, y la base que rodea la estructura tiene un ancho de 1.5 metros.

Figura 1.

Estructura lunar propuesta



Fuente: Elaboración propia

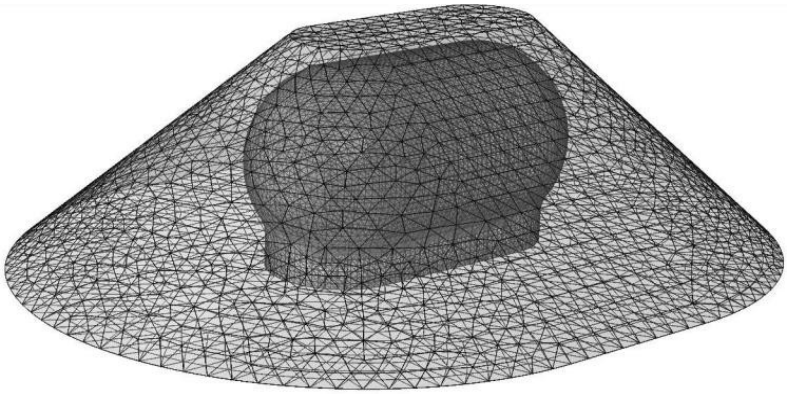
El espesor de las paredes de la estructura (t) se determinó utilizando la Ec. 1 (Leckie y Bello 2010).

$$t = \frac{IP * R * FSt}{\sigma t} \quad (1)$$

Donde *IP* es la presión interna, *R* es el radio del cilindro, σ_t es la resistencia a la tracción del concreto y *FSt* es un factor de seguridad. Los parámetros de diseño usados fueron: *IP* = 80 kPa, *R* = 5 m, σ_t = 5,60 MPa (Naser, 2019)y se seleccionó un *FSt*= 5 MPa (Mottaghi y Benaroya, 2015b). De esta forma se obtuvo un espesor de pared de 35 cm, aproximadamente.

Por otro lado, la presencia de fenómenos amenazantes como las altas dosis de radiación, los cambios extremos de temperatura y el constante impacto de meteoritos con diferentes energías hacen necesario proteger la estructura principal. Para lograr esto, se sugiere cubrir la estructura con una capa de suelo lunar (Figura 2). La geometría de la capa de suelo lunar propuesta se basa en la altura mínima sugerida por Zhou et al (2020) de 2.5 metros y en el ángulo de reposo del suelo lunar de 40° (He, 2010).

Figura 2.
Estructura lunar bajo capa de suelo lunar



Fuente: Elaboración propia

2. METODOLOGÍA

Análisis estático

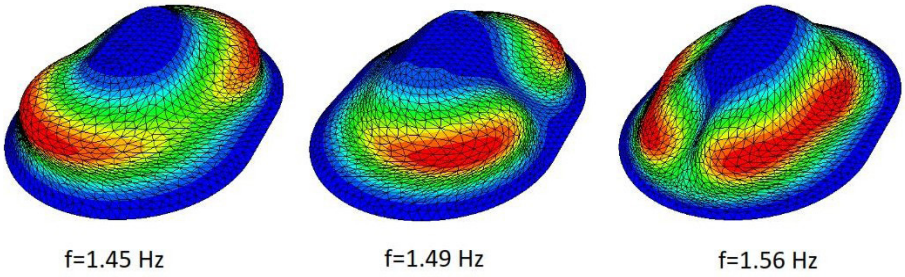
Para simular la estructura, se utilizó el programa de modelado numérico Abaqus. El modelo se sometió a la aceleración gravitatoria de la Luna, que equivale a 1/6 de la gravedad terrestre, es decir, 1.62 m/s². Una aceleración gravitatoria significativamente menor que la de la Tierra permite la construcción de estructuras con luces mucho más largas sin perder estabilidad estructural. En el análisis de presión interna, la estructura se sometió a una presión interna de 80 kPa, un nivel de presión admisible para el alojamiento de vida durante largos periodos de tiempo (Cross et al., 2008).

Análisis dinámico modal espectral

Usando técnicas probabilísticas para determinar la amenaza sísmica (Cornell, 1968), Ruiz et al. (2022) calcularon la amenaza sísmica en el punto de alunizaje del Apollo 17, que se encuentra en el valle de Taurus-Littrow. La principal fuente sísmica en esta zona de la Luna es la falla Lee Lincoln, la cual, según las estimaciones de Ruiz et al. (2022), es capaz de generar eventos sísmicos con magnitudes de momento (Mw) de 6.4. A través de este estudio, se obtuvieron curvas y espectros de amenaza uniformes y condicionales. Estas curvas permiten realizar análisis modales espectrales que ofrecen una primera aproximación a la respuesta de una estructura sometida a cargas sísmicas. Inicialmente, se determinaron los modos de vibración de la estructura junto con sus frecuencias correspondientes. El análisis reveló que teniendo en cuenta los seis primeros modos de vibración, se obtiene más del 95% de participación modal en la respuesta total de la estructura. A modo de ejemplo, en la Figura 3 se presentan las formas modales de los tres primeros modos de vibración junto con sus frecuencias respectivas.

Figura 3

Frecuencias de los tres primeros modos de vibración

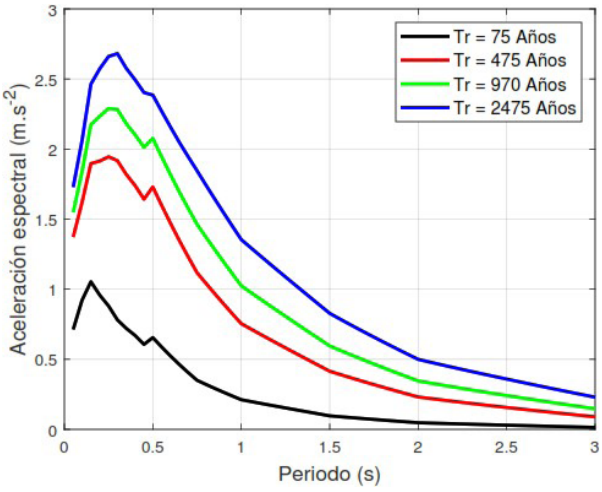


Fuente: Elaboración propia

Con base en el periodo fundamental de la estructura, se generaron los espectros condicionales de amenaza para sismos con periodos de retorno (TR) de 75, 475, 970 y 2475 años (Figura 4). Estos espectros representan la demanda sísmica a la que se somete la estructura. En este estudio, se utilizó el método de combinación cuadrática completa (CQC) para calcular la respuesta estructural a las cargas sísmicas. Además, se aplicó el método de la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SRSS) para combinar la demanda sísmica en múltiples direcciones.

Figura 4.

Espectros condicionales medios de amenaza



Fuente: Elaboración propia

Criterio de falla

Para establecer la tensión máxima admisible σadm se requiere definir un factor de seguridad FS_{adm} que garantice la integridad de la estructura en condiciones de carga extremas. El FS_{adm} debe elegirse en función del uso de la estructura y del material del que está hecha. Una guía de diseño de la NASA (2019) sugiere que se puede utilizar un FS_{adm} de 2 para el diseño de módulos habitables presurizados. Por otro lado, es importante considerar que, en las estructuras construidas con concreto simple, los esfuerzos de tracción para cualquier condición de carga deben ser resistidos en su totalidad por el concreto. Por lo tanto, es necesario que el hormigón en tensión permanezca en el rango elástico de deformación, esto significa que no pueden producirse grietas macroscópicas cuando la estructura está cargada. El método de diseño de los esfuerzos de trabajo (WSD) asume que los materiales permanecen en su rango de comportamiento elástico durante la etapa de funcionamiento de la estructura. Por lo tanto, el uso de un FS_{adm} propuesto por la metodología WSD parece razonable. A continuación, se determina un FS_{adm} para el hormigón simple de 2,5 (Martinez y Guerrero 2004, Wight, 2009). Finalmente, de los FS_{adm} disponibles en la bibliografía, según el uso y el material con el que se va a construir la estructura, se elige el más pequeña de ahí que σadm se define como:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_t}{FS_{adm}} = \frac{5.6\ MPa}{2.5} = 2.24\ MPa \quad (2)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

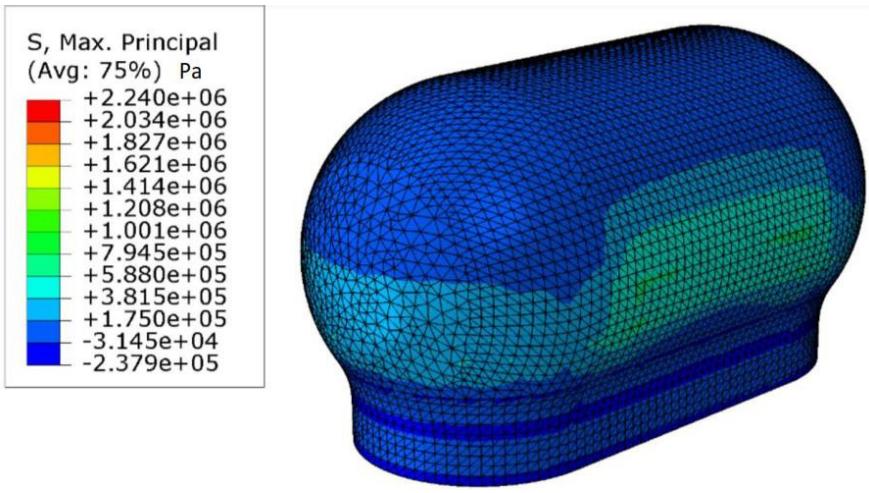
Se llevó a cabo un análisis estático para dos casos de carga:

- Considerando únicamente la carga gravitatoria generada por el peso de la estructura y el suelo lunar.
- Agregando, al primer caso de carga, una presión interna de 80 kPa sobre las paredes internas de la estructura, lo que representa las condiciones normales de funcionamiento de la estructura.

En el primer caso de carga, que representa las condiciones iniciales de la vida útil de la estructura, los esfuerzos máximos de tracción se localizan en el exterior de las paredes laterales de la estructura cilíndrica, como se muestra en la Figura 5. Los esfuerzos máximos de tracción alcanzan 0.67 MPa, aproximadamente el 29.9 % del esfuerzo de tracción admisible del concreto sulfúrico lunar.

Figura 5.

Distribución de esfuerzos de tracción para carga gravitatoria

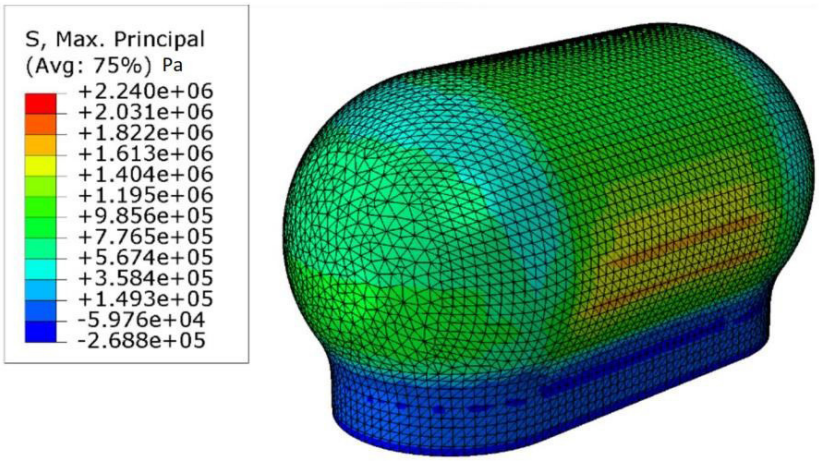


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6, se presenta la distribución de esfuerzos en la estructura bajo el segundo caso de carga, que considera la presión interna en la estructura. En este escenario, el esfuerzo máximo de tracción se localiza en el lado interior de la junta entre la parte cilíndrica de la estructura principal y los soportes. El valor del esfuerzo de tracción máximo es de 1.86 MPa, lo que corresponde aproximadamente al 82.6 % del esfuerzo de tracción permisible. Estos resultados subrayan la influencia significativa de la presión interna en contraposición a las cargas gravitatorias en el diseño de estas estructuras. Además, es importante destacar que los máximos esfuerzos se presentaron en las zonas de unión entre los apoyos y la estructura cilíndrica principal.

Figura 6

Distribución de esfuerzos de tracción para carga gravitatoria más presión interna de 80 kPa

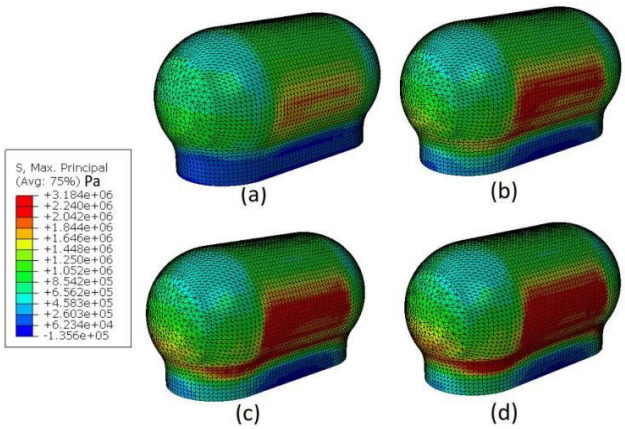


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7, se observan los esfuerzos de tracción generados por los diferentes casos de carga sísmica, considerando la presión interna y el peso propio de la estructura y la capa de suelo lunar. En contraste con los casos de carga estática, las tensiones no se distribuyen uniformemente en las paredes de la estructura. Es importante señalar que durante el proceso de diseño se buscó aumentar las áreas de unión entre la estructura principal y la base para reducir los esfuerzos de tracción. Con la excepción de los sismos superficiales frecuentes (TR = 75 años), todos los casos de carga sísmica provocan que la estructura experimente tensiones superiores al esfuerzo de tracción máximo permisible. Este resultado contrasta con lo reportado por algunos autores (Mottaghi y Benaroya, 2015a) y resalta la importancia de tener en cuenta el fenómeno sísmico en el diseño de estructuras en la Luna.

Figura 7.

Esfuerzos de tracción para sismos de: (a) TR = 75 años, (b) TR = 475 años, (c) TR = 1500 años y (d) TR = 2475 años



Fuente: Elaboración propia

4. CONCLUSIONES

Este análisis resalta la escasa influencia de la gravedad en el diseño de hábitats lunares, centrándose en la importancia de la presión interna como factor clave a considerar en estas estructuras. Además, este estudio es pionero en el análisis sísmico de hábitats lunares a largo plazo, utilizando espectros medios condicionales generados a través del análisis probabilístico de amenaza sísmica lunar. Los resultados del análisis espectral modal dinámico indican que los eventos sísmicos con periodos de retorno más largos pueden generar niveles inaceptables de tensión en estructuras construidas con concreto lunar. Por lo tanto, este estudio enfatiza la necesidad de considerar los efectos sísmicos en el diseño de hábitats lunares a largo plazo.

Adicionalmente, se menciona que actualmente se está llevando a cabo un estudio de amenaza por impacto de meteoritos y un programa que permitirá predecir el daño causado por impactos a hipervelocidad. Esto demuestra el enfoque en la seguridad y resiliencia de las estructuras lunares y la importancia de abordar los desafíos de diseño de forma integral.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Universidad del Valle (Cali, Colombia) a través del proyecto de investigación: Diseño por desempeño de un hábitat lunar sometido a cargas sísmicas e impactos de meteoritos (C.I. 21186).

6. REFERENCIAS

Allende, M. I., Kiremidjian, A. S., Lepech, M. D., y Loftus, D. J. (2021). Performance-based engineering framework to quantify micrometeoroid damage to lunar surface structures. Journal of Aerospace Engineering, 34 (5), 04021055. doi: 10.1061/(ASCE) AS.1943-5525.0001300.

Aulesa V. Architecture of lunar habitats, in: Exploration and Utilization of the Moon, Vol. 462, 2000, p. 289. Benaroya H., Building habitats on the moon: engineering approaches to lunar settlements, Springer, 2018.

Cornell C. A., Engineering seismic risk analysis, Bulletin of the Seismological Society of America 58 (5) (1968)1583–1606.

Cross, C., Lewis, J. F., & Tuan, G. C. (2008). A comparison of the Apollo and Early Orion environmental control, life support and active thermal control system's driving requirements and system mass. SAE International Journalof Aerospace, 1(2008-01-2081), 300-306.

He C. Geotechnical characterization of lunar regolith simulants, Ph.D. thesis, Case Western Reserve University(2010).

Kalapodis, N., Kampas, G., y Ktenidou, O.J. (2020). A review towards the design of extraterrestrial structures:From regolith to human outposts. Acta Astronautica, 175, 540-569.

Leckie, F., Bello, D., Strength and Stiffness of Engineering Systems, Mechanical Engineering Series, SpringerUS, 2010.

Malla, R. B., y Gionet, T. G. (2013). Dynamic response of a pressurized frame-membrane lunar structure with regolith cover subjected to impact load. Journal of Aerospace Engineering, 26 (4), 855-873. doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000187.

Martinez, Guerrero, Fundamentos de concreto reforzado (de acuerdo a la NSR-98), Sello Editorial Javeriano, 2004.

Mottaghi, S., y Benaroya, H. (2015a). Design of a lunar surface structure. ii: Seismic structural analysis. Journalof Aerospace Engineering, 28 (1), 04014053. doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000396.

Mottaghi, S. y Benaroya, H. Design of a lunar surface structure. i: Design configuration and thermal analysis,Journal of Aerospace Engineering 28 (1) (2015b) 04014052.

Nakamura, Y. (1977) HFT Events: Shallow Moonquakes? Physics of the Earth and Planetary Interiors, 14, 197-205.

Nakamura, Y., Latham, G. V., y Dorman, H. J. (1982). Apollo lunar seismic experiment—final summary. Journal of Geophysical Research, 87 (S01), A117. doi: 10.1029/jb087is01p0a117.

NASA, Structural Design Requirements and Factors of Safety for Spaceflight Hardware: for Human Spaceflight. Revision A, Independently Published, 2019.

Naser M. Extraterrestrial construction materials, Progress in Materials Science 105 (2019) 100577.

Nunn, C., Garcia, R., Nakamura, Y., Marusiak, A., Kawamura, T., Sun, D., Zhu, P. (2020). Lunar Seismology: A Data and Instrumentation Review. Space Science Reviews, 216 (5). doi: 10.1007/s11214-020-00709-3.

Ruiz, S., Cruz, A., Gomez, D., Dyke, S. J., y Ramirez, J. (2022). Preliminary approach to assess the seismic hazard on a lunar site. Icarus, 383, 115056.

Toutanji, A., Evans, S. y Grugel, R. N. Performance of lunar sulfur concrete in lunar environments, Construction and Building Materials 29 (2012) 444 – 448.

Watters, T. R., Weber, R. C., Collins, G. C., Howley, I. J., Schmerr, N. C., y Johnson, C. L. (2019). Shallow seismic activity and young thrust faults on the Moon. Nature Geoscience, 12 (6), 411–417. doi: 10.1038/s41561- 019-0362-2.

Wight, J. MacGregor, Reinforced Concrete: Mechanics and Design, Pearson Prentice Hall, 2009.

Zhou, C., Tang, B., Ding, L., Sekula, P., Zhou, Y., y Zhang, Z. (2020). Design and automated assembly of planetary lego brick for lunar in-situ construction. Automation in Construction, 118, 103282.

TECNOLOGÍA Y SISTEMATIZACIÓN AÉREA Y ESPACIAL

CAPÍTULO 8

LA PROMOCIÓN Y LA EDUCACIÓN ESPACIAL COMO GARANTÍAS DEL ECOSISTEMA ESPACIAL LATINOAMERICANO

Armengol Torres Sabaté
armengol@torres.net
Universitat Pompeu Fabra (UPF), Barcelona, España

Resumen

El actual ecosistema espacial emergente en América Latina y el Caribe genera considerables expectativas en las fuerzas vivas y las administraciones públicas de la región debido a su impacto en la competitividad y el crecimiento económico. A nivel global, el fenómeno conocido como la "Economía del Nuevo Espacio" ha dado lugar a un rápido crecimiento en la oferta de productos y servicios basados en tecnología espacial. A medida que el mercado descubre estos productos y servicios, reconoce su utilidad, los aprende a utilizar y, finalmente, los adopta. Este proceso se logra a través de estrategias efectivas de promoción y comunicación implementadas estratégicamente con apoyo tanto público como privado.

Sin embargo, a pesar de esta creciente oferta, se presentan dificultades para adquirir los recursos humanos altamente especializados necesarios a corto y largo plazo. Garantizar tanto el estímulo de la demanda como la capacidad para satisfacerla representa un desafío complejo para la región, que compite en desventaja con países tecnológicamente más avanzados.

En este contexto, para lograr la sostenibilidad en el crecimiento del mercado global y regional del Nuevo Espacio, la región debe desarrollar eficazmente sus propias estrategias de promoción, educación y divulgación espacial, adaptadas a sus particulares capacidades y recursos. Este artículo presenta una valoración de algunas de las iniciativas que han tenido éxito en la promoción y educación del sector espacial. Como conclusión, se propone una estrategia de integración en algunas de estas iniciativas y el desarrollo de nuevas propias, adaptadas a las condiciones locales, con el objetivo de acelerar el desarrollo del ecosistema espacial latinoamericano.

Palabras clave: Competitividad, ecosistema espacial, educación, emprendedores, promoción, vocaciones STEAM

Abstract. Due to its great impact on the competitiveness and growth of the economy, the current emerging space ecosystem in Latin America and the Caribbean is raising important expectations in the active forces and in the public administrations of the region. In the world, the phenomenon known as "The New Space Economy" is generating an accelerated growth in the offer of

new space-based products and services. Its market demand accompanies them to the extent that it is able to discover that offer, recognizes their usefulness, learns to use them, and finally consumes those products and services. The latter is achieved thanks to an adequate promotion and communication effort, which is deployed strategically with public and private support. However, this growing offer is encountering difficulties in obtaining the necessary specialized human resources in the short and long term. Guaranteeing both the promotion of that demand and being able to satisfy it is a complex challenge for the region, as it finds itself competitively at a disadvantage with the most technologically advanced countries. In this context, in order to achieve the sustainability of the growth of the global and especially their own New Space market, the region must effectively develop its own Promotion, Education and Space Dissemination strategy in a manner adapted to its particular capacities and resources. With this orientation, this article displays a valued compilation of some initiatives that are being successfully deployed to promote and educate the space sector. As a conclusion, an integration strategy is proposed in some of them, as well as to develop own initiatives adapted to local conditions in order to accelerate the development of the Latin American space ecosystem with advantage.

Keywords: Competitiveness, space ecosystem, education, entrepreneurs, promotion, STEAM vocations.

1. INTRODUCCIÓN

El Nuevo Espacio, un mercado en expansión aún desconocido

El creciente ecosistema espacial de América Latina y el Caribe ha generado expectativas significativas entre las partes interesadas y las autoridades gubernamentales de la región. Se reconoce su gran potencial para impulsar la competitividad y el crecimiento económico. A nivel mundial, el fenómeno conocido como la "Economía del Nuevo Espacio" está experimentando un rápido crecimiento en la oferta de productos y servicios basados en tecnología espacial. A medida que estos productos y servicios se dan a conocer en el mercado, se reconocen sus ventajas, se aprende a utilizarlos y, finalmente, se incorporan a la vida cotidiana. Este proceso se logra mediante estrategias efectivas de promoción y comunicación que se implementan de manera estratégica con el respaldo de los sectores público y privado.

Sin embargo, en América Latina se enfrenta el desafío de que varios países están desarrollando capacidades espaciales propias, pero encuentran dificultades para acceder a sus mercados locales, que suelen ser relativamente pequeños, y para competir en los mercados desarrollados debido a su limitada capacidad competitiva y la fragmentación de su oferta especializada. Esto plantea el problema de la brecha en la adopción de soluciones espaciales en un ecosistema espacial que aún se está desarrollando.

Figura.1.
La brecha en un ecosistema espacial emergente

Fuente: Elaboración propia

En 2020, la carrera espacial en América Latina tomó impulso cuando 33 países miembros de la Comunidad de Estados Latinoamericanos y Caribeños (CELAC) se unieron a través de sus respectivas agencias espaciales e instituciones públicas para desarrollar proyectos espaciales conjuntos con un gran beneficio e impacto regional. Iniciativas como la creación y promoción de la Agencia Latinoamericana y Caribeña del Espacio (ALCE) y la participación de esta agencia, así como de las agencias nacionales, en foros y organizaciones internacionales relacionadas con el espacio, demuestran una estrategia conjunta adecuada. Esta estrategia busca acelerar la participación destacada de la región en el mercado global del espacio, al mismo tiempo que fortalece sus propios mercados nacionales y regionales.

El propósito de este artículo es destacar, a través de ejemplos concretos, cómo diversas iniciativas de promoción espacial y programas de educación espacial contribuyen a cerrar la brecha entre la oferta tecnológica, que a menudo enfrenta dificultades para su adopción, y la capacidad del mercado para adoptar estas tecnologías.

Las aplicaciones espaciales estratégicas, clave para el desarrollo competitivo en la región

El uso del espacio ha estado reservado hasta recientemente a unas pocas y costosas aplicaciones, limitadas al broadcasting y las comunicaciones, la meteorología y algo de observación de la Tierra. Hoy en día, la generalización y diversificación de aplicaciones espaciales de bajo coste demuestran ser una clave para el desarrollo de las economías, especialmente para los países con extensas superficies y recursos naturales.

Las aplicaciones satelitales de posicionamiento y navegación resultan indispensables para la logística y para el óptimo desplazamiento de los ciudadanos. Los sistemas GNSS como el americano GPS y el europeo Galileo brindan unos servicios excelentes que ayudan a mejorar la competitividad de todo tipo de actividades vinculadas con la movilidad de las personas y vehículos, las mediciones en el terreno y para los sistemas críticos que necesitan mediciones exactas de tiempo.

Por su parte, las aplicaciones basadas en la Observación de la Tierra son cada día más diversas. Ya sea por medios satelitales ópticos o de radar, brindan soluciones y ventajas importantes para muchas actividades verticales como la pesca y la agricultura, las infraestructuras, los servicios públicos, así como para el desarrollo de ciudades inteligentes, la prevención y gestión de desastres, el cambio climático y el ambiente, la sostenibilidad o la defensa.

A diferencia de hace solo unos pocos años cuando disponer de imágenes satelitales implicaba un coste importante para grandes coberturas geográficas o temporales, desde que la oferta del sistema europeo Copernicus se brinda de forma global y gratuita, resulta una gran ventaja para emprendedores y pequeñas empresas especializadas en ofrecer servicios de valor agregado muy competitivos para los usuarios finales.

En consecuencia, el componente clave ahora ya no es el coste o el acceso a los datos, sino el recurso humano especializado para su procesado y generación de valor. Al mismo tiempo, un alto desconocimiento por parte de los posibles interesados y de los tomadores de decisiones sobre las posibilidades de las aplicaciones satelitales, están ralentizando el despegue del mercado. Si ya es un reto para las regiones más desarrolladas favorecer una adecuada oferta de esas soluciones como poder satisfacerla, resulta mucho más complejo para la región al encontrarse competitivamente en desventaja con aquellas.

Falta de recursos humanos especializados es más grave en la región:

Este fenómeno NewSpace, que tiene el protagonismo de la gran empresa privada y fundamentalmente de la rápida incorporación de startups y emprendedores, ha disparado la demanda de los escasos recursos humanos especializados. Esta dificultad en los países desarrollados ya resulta preocupante.

En las regiones emergentes como la latinoamericana, la situación es menos esperanzadora. Además de la escasez de especialistas a causa de una menor velocidad de generación de nuevos profesionales, se tiene el agravante de la fuga de talentos hacia los mercados desarrollados. Unos recursos especializados que son necesarios ahora, listos para ser integrados en la generación de la oferta. Y en aras de garantizar la sostenibilidad, también aquellos recursos que serán imprescindibles en el largo plazo, cuyas vocaciones deben estimularse, ahora, desde edades muy tempranas en la escolarización primaria.

Esta limitación está dificultando especialmente el desarrollo del mercado en las regiones que destinan pocos recursos a la promoción transversal de estas tecnologías, a riesgo de hipotecarse a ser eternos consumidores en vez de productores, limitando su independencia y soberanía tecnológicas.

¿Cómo promover un mercado de gran demanda potencial sin los suficientes recursos para satisfacerla?:

Abordar el dilema de promover el mercado de las aplicaciones espaciales y que luego no se pueda satisfacer por falta de especialistas, es complejo. Especialmente cuando los presupuestos de la región son muy limitados y porque habitualmente resulta difícil sustraerlos de las necesidades urgentes y de corto plazo.

En este contexto, para conseguir la sostenibilidad de crecimiento en el mercado del Nuevo Espacio global y propio, la región debe desarrollar acciones de Promoción, Educación y Divulgación Espacial de forma adaptada a sus particulares necesidades, capacidades y recursos.

2. METODOLOGÍA

Esta compilación, que seguramente no abarca todas las iniciativas relevantes, se ha creado a partir de información proporcionada por las organizaciones mismas, así como de datos conocidos por el autor.

No hay un orden específico para presentar los casos, pero en todos ellos se resumen las actividades y resultados clave, y se incluye un enlace principal para obtener más información. Los detalles adicionales se pueden encontrar en la sección de Referencias.

Cada ejemplo se clasifica según su alcance geográfico (global, nacional o regional) y su público objetivo principal (general, profesionales, estudiantes, educadores).

Se han seleccionado casos de éxito en países avanzados y en desarrollo. Los interesados pueden considerar diversas formas de asociación con estos casos. Además, se identifican prácticas destacadas que pueden adaptarse a las necesidades de cada país. Cada caso incluye una sección llamada "Oportunidad", donde se sugieren posibles enfoques para el aprovechamiento, la colaboración o la replicación a nivel local.

Ambos enfoques pueden generar beneficios directos y sinergias que contribuirán al desarrollo del ecosistema espacial en cada país, con efectos que pueden extenderse a todo el ecosistema espacial latinoamericano y del Caribe.

3. RESULTADOS

En esta sección se destacan casos sobresalientes enfocados en la promoción espacial. Estos casos se caracterizan por la aplicación de recursos con dos propósitos principales: informar a la sociedad sobre los beneficios del espacio (target mercado) y facilitar el acceso de profesionales y emprendedores (target oferta) a dicho mercado a través de métodos que incluyen ayudas financieras, concursos, premios, mentoría de expertos, entre otros.

En esta sección se presentan ejemplos notables relacionados con la educación espacial. Estos casos exitosos están orientados a fomentar, capacitar, atraer y retener recursos humanos especializados necesarios a corto y largo plazo para un ecosistema competitivo en el campo espacial. Además, se incluye un caso particular en el que se emplean los recursos espaciales como apoyo para la enseñanza de contenidos STEM.

3.1. Promoción espacial

En esta sección se destacan iniciativas notables desarrolladas por diversas organizaciones que llevan a cabo actividades de promoción espacial. La "promoción espacial" abarca todas las actividades que, a través de medios divulgativos o la facilitación de recursos de diversa índole, están destinadas a promover el interés general, vocaciones, educación y formación profesional, emprendimiento, desarrollo industrial y oportunidades comerciales relacionadas con las ciencias y las aplicaciones espaciales. Estas actividades hacen uso de recursos como ayudas financieras, personal especializado, publicidad, ferias y conferencias, concursos, premiaciones, mentoría por expertos y otros medios. Dependiendo del enfoque y la modalidad de cada organización, sus iniciativas pueden estar dirigidas a diversos públicos.

The World Space Week (WSW) – La Semana Mundial del Espacio

Ámbito global. Orientado a público general.

www.worldspaceweek.org

La Semana Mundial del Espacio es la celebración de mayor alcance global, con el propósito de divulgar y promocionar los logros y contribuciones de la ciencia espacial, sus tecnologías y aplicaciones en beneficio de la humanidad. La Asamblea General de las Naciones Unidas proclamó en su Asamblea General de 1999 que del 4 al 10 de octubre se reconocería como la "Semana Mundial del Espacio". Estas fechas conmemoran el lanzamiento del primer satélite humano, el Sputnik 1, el 4 de octubre de 1957, así como la firma del Tratado sobre los Principios que rigen las actividades de los Estados en la exploración y el uso pacífico del espacio ultraterrestre el 10 de octubre de 1967.

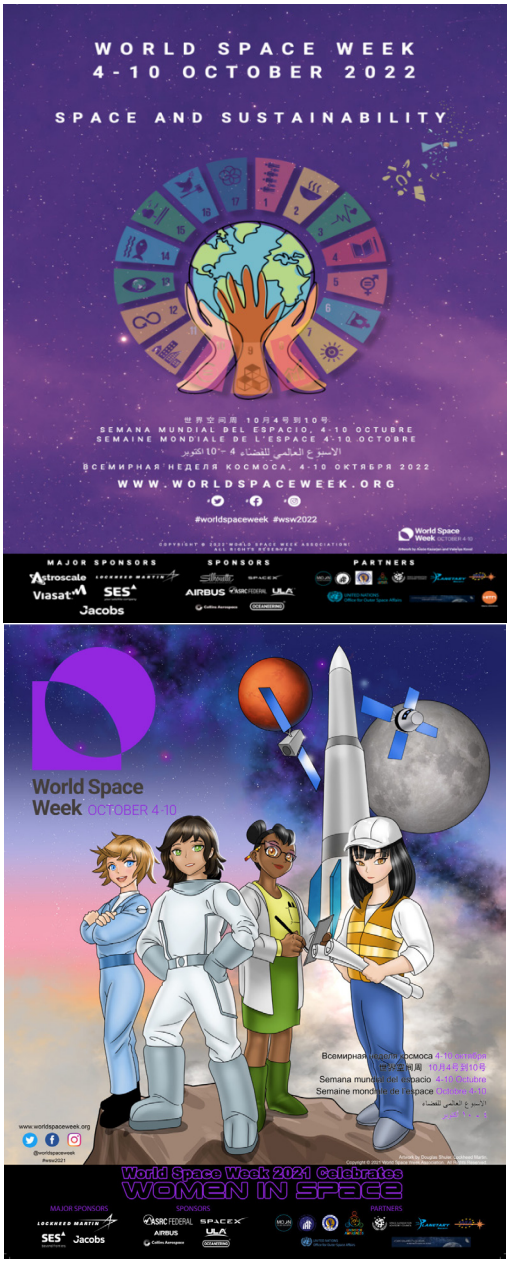
Desde entonces, la Asociación de la Semana Mundial del Espacio (WSWA), una organización internacional no gubernamental y sin fines de lucro, coordina anualmente esta iniciativa a nivel global. Lo hace a través de una red de coordinadores y colaboradores voluntarios, con el apoyo de socios nacionales e internacionales. Durante la Semana Mundial del Espacio, se organizan actividades tanto presenciales como virtuales de forma independiente por parte de entusiastas, agencias espaciales, empresas, escuelas, planetarios, museos, clubes de astronomía y asociaciones científicas. El evento se centra en promover la educación en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM).

La Asociación tiene el estatus de observador permanente en el Comité de las Naciones Unidas sobre los Usos Pacíficos del Espacio Exterior (COPUOS) y es miembro de la Federación Astronáutica Internacional (IAF). Además, recibe respaldo de patrocinadores y socios a nivel global. Anualmente, publica informes de resultados y presenta posters temáticos ante la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre de las Naciones Unidas (UNOOSA) en Viena.

Cada año, la Junta Directiva de la WSW elige un tema que inspira las actividades realizadas. Para la WSW 2022, se eligió el tema "Espacio y Sostenibilidad", que busca abordar tanto la sostenibilidad a largo plazo del espacio exterior como un recurso finito, como el uso del espacio para garantizar la sostenibilidad en la Tierra, particularmente en regiones menos desarrolladas. En la WSW 2021, el tema destacado fue "La Mujer en el Espacio", en respuesta a la baja representación de mujeres en la industria espacial, siendo solo un 20% de los trabajadores espaciales a nivel global, y un 33% en la NASA, la principal organización del sector, con solo un 16% en roles de científicos sénior.

Figura 2.

Pósters promocionales de la WSW 2022 y WSW 2021

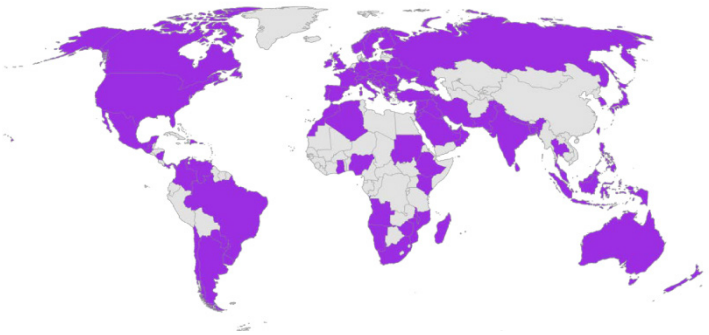


Fuente: World Space Week, 2021

La Semana del Espacio se celebra anualmente en más de 96 países y ofrece una amplia variedad de actividades divulgativas. Cada año, se registran más de 8.000 de estas actividades, que atraen a miles de participantes y generan millones de impactos en las redes sociales a nivel mundial. Es destacable que, incluso durante la pandemia de 2021, se llevaron a cabo más de 6.000 eventos en todo el mundo, en todos los continentes, con excepción de la Antártida.

Entre los países que mostraron una alta participación en la WSW 2021 se encuentran Pakistán (2.687 eventos), Arabia Saudita (1.780 eventos), Irlanda (601 eventos), Irán, Brasil, Reino Unido, India, Rumania, Croacia y Rusia.

Figura 3.
Mapa mundial de la distribución de actividades de la pasada WSW2021

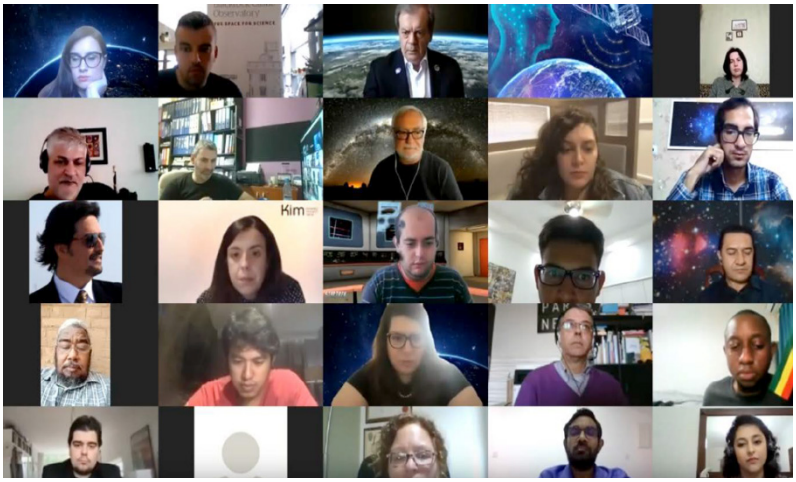


Fuente: World Space Week, 2021

En cada nación, los "Coordinadores Nacionales" son voluntarios que desempeñan un papel fundamental al promover y coordinar las celebraciones en su país. Su labor implica lograr la participación de numerosos organizadores de actividades en diversas localidades y supervisar que estas actividades se registren correctamente como "oficiales" en la base de datos de la WSWA.

Figura 4.

Reunión global de Coordinadores Nacionales



Fuente: Elaboración propia

A medida que el éxito de la Semana del Espacio sigue creciendo, continúa el compromiso con sus propios valores y, especialmente, contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, incluyendo el ODS 4 "Educación de calidad", el ODS 8 "Trabajo decente y crecimiento económico", el ODS 9 "Industria, innovación e infraestructura" y el ODS 17 "Alianzas para los ODS".

En su misión específica de contribuir a la divulgación y la educación, la WSWA desarrolla esfuerzos continuos para involucrar y lograr la participación activa de organizaciones educativas clave, como los Ministerios de Educación de cada país, así como entidades internacionales dedicadas a la promoción de las disciplinas STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas). Entre estas organizaciones se incluyen el Marshall Space Flight Center de la NASA en la Oficina de Compromiso STEM, el Departamento de Educación y Divulgación de la DLR (Agencia Espacial Alemana) y, en Europa, el Departamento de Educación Científica de Scientix, la STEM Alliance y la European Schoolnet. La WSW también recibe apoyo de la ESERO (Oficina Europea de Recursos para la Educación Espacial) y de la Unidad de Educación y Divulgación STEM de la Agencia Espacial Europea, además del Departamento de Educación de la Oficina Nacional del Laboratorio de EE. UU. de la Estación Espacial Internacional.

Estas alianzas aportan valor a los eventos y actividades organizados en cada país por sus Coordinadores Nacionales, permitiendo que destacadas entidades espaciales en todo el mundo compartan su trabajo y conocimientos con un público más amplio. Como resultado, la WSWA forma parte del Comité de Educación y Divulgación Espacial (SEOC) de la Federación Astronáutica Internacional (IAF).

En lo que respecta a la promoción a través de los medios de comunicación, durante la WSW2021 se logró una cobertura a nivel mundial a través de noticias impresas y en línea, entrevistas e incluso publicidad exterior, como la presentación de Janet's Planet en vallas publicitarias y el lanzamiento de la Barbie astronauta italiana Samantha Cristoforetti, entre otros ejemplos. Especialmente en países donde la cultura espacial no está muy arraigada, la celebración de la WSW genera sinergias y conexiones entre entidades afines que previamente no estaban relacionadas. Esto resulta en una alta participación en las actividades organizadas, captando el interés de los medios y de la sociedad en general.

Entre las actividades que generan un impacto significativo se encuentran aquellas que logran convocar a personalidades científicas, de la industria, astronautas en activo y retirados, conexiones con la Estación Espacial Internacional y experimentos educativos espaciales de carácter lúdico. La participación directa de los ministerios de educación se revela como una de las estrategias más efectivas para el éxito en la convocatoria y asistencia, al igual que el liderazgo y la participación activa por parte de las agencias espaciales nacionales y de los empleados de empresas del sector.

Figura 5.

Celebración callejera de la WSW en Bangladesh.

Fuente: Word Space Week, 2016

***Oportunidades**:*

- *En Latinoamérica y Caribe aún hay bastantes países sin un coordinador nacional de la WSW. Aplicar y acceder a esta posición es sencillo y no requiere de una dedicación continuada de tiempo.*
- *Nuevas agencias espaciales emergentes en la región son las mejores candidatas como coordinadores nacionales.*
- *La implicación de los ministerios de educación resulta ventajosa para sus objetivos de incentivar vocaciones STEAM.*
- *Oportunidad asimismo para dotar de contenidos sitios y redes sociales, influencers, etc, dedicados a la divulgación científica en diferentes segmentos de la sociedad.*

Caso destacado: Semana Mundial del Espacio en Pakistán

Ámbito Pakistán. Orientado a estudiantes, educadores, y público general.
ncgsa.org.pk/wsw/

Figura 6.

Ejemplo de convocatoria de actividades para la categoría 'Aplicaciones Espaciales'

Fuente: Word Space Week, 2022

Con el objetivo principal de promover la educación y el conocimiento espacial entre el público general, en Pakistán el Instituto de Tecnología Espacial (IST) es el organismo que, desde 2005, tiene el legado de celebrar la Semana Mundial del Espacio. Desarrolla esta actividad en colaboración con la Agencia Espacial Nacional de Pakistán (Space & Upper Atmosphere Research Commission - SUPARCO) a través de su 'Programa de Educación y Conciencia Espacial' (SEAD), el Laboratorio de Investigación de Educación Espacial y el Centro Nacional de SIG y Aplicaciones Espaciales (NCGSA).

El número de eventos, estudiantes y escuelas participantes se ha incrementado exponencialmente en los últimos 17 años. En 2021, Pakistán ha registrado casi 3.000 eventos, consiguiendo la primera posición en el ranking mundial de la Semana Mundial del Espacio.

Siguiendo el tema establecido para WSW2022, "Espacio y Sostenibilidad", para este año Pakistán planea numerosas actividades a lo largo del país. Para esta edición ha desarrollado más de 100 módulos en 13 categorías principales y más de 75 módulos para diferentes grupos de edad, como por ejemplo:

Poesía espacial, Space Quiz, Escritura creativa sobre el Espacio, Aplicaciones espaciales, Innovación en el espacio, Demostración de tecnologías espaciales, Modelos y coleccionables espaciales, Bellas artes espaciales, Artes escénicas espaciales, Arquitectura espacial, El Espacio para los ODS y Vida en el Espacio. La información detallada está disponible en el sitio web específico.

Para participar, cada entidad educativa nombra a su "embajador espacial" que los representará. Estos embajadores deben registrar a todos sus participantes en los módulos correspondientes. Los registros de participación se cobran a razón de unos 42 euros (10,000 rupias) por institución educativa.

***Oportunidades**:*

El ejemplo de la WSW en Pakistán para la promoción del espacio en el ámbito educativo destaca entre los mejores, no sólo por conseguir habitualmente cada año las primeras posiciones en cantidad de actividades organizadas, sino por conseguirlo con recursos muy limitados. En su caso, la implicación directa de su agencia espacial, entidades asociadas, y del propio ministerio de Educación resultan componentes clave de su éxito. Asimismo, en el nivel de las entidades educativas se encuentra una alta participación y una destacada motivación que los estudiantes reflejan en las actividades muy variadas y creativas en las que participan. En consecuencia, este ejemplo resulta sencillo de reproducir en otras regiones con recursos económicos limitados, con la condición de que consigan implicar activamente y de forma continuada a sus entidades educativas nacionales. En particular a su agencia espacial y a su ministerio de educación.

La organización publica cada año un práctico manual dirigido a los organizadores de eventos y educadores donde se explican los fundamentos de la celebración y cómo organizar actividades durante la semana espacial. Resulta una fuente de referencia idónea para desarrollar actividades diversas y atractivas con pocos recursos disponibles en cada comunidad educativa.

HITN-TV

Ámbito EE. UU. hispano. Contenidos de TV en español. Orientado a público general, educadores, estudiantes, niños.

hitn.tv/spaceweek/

HITN-TV, la primera y única red de comunicación pública de EE. UU. para la comunidad latina, se suma a la lista mundial de socios de World Space Week, con el objetivo específico de promover el interés en materias STEM entre los jóvenes hispanos en los Estados Unidos. Además, el tema de este año 2022 de "Espacio y Sustentabilidad" va de la mano con el objetivo de HITN de mejorar la calidad de vida de las familias hispanas a través de la educación y sobre cómo la conservación puede proteger a las generaciones futuras.

Figura 7.

Campaña HITN-TV de contenidos especiales para la WSW2022

Fuente: Word Space Week, 2022

Entre la oferta de contenidos especialmente seleccionados para la semana del espacio:

- **Experiencias Digitales:** Toda la información relacionada con WSW, que incluye contenido detallado de eventos, videos y artículos con enfoque en STEM, así como un kit de herramientas para actividades en las que los visitantes pueden participar, como "Sonidos del Espacio" y juegos en línea.
- **World Space Week Webinars y Eventos**: Para celebrar WSW2022 en las escuelas, HITN invita a estudiantes de Middle y High School en Puerto Rico a unirse vía Zoom el 4 de octubre a un webinar con expertos internacionales en vivo, conversando y respondiendo preguntas de los alumnos acerca del espacio, las telecomunicaciones, las misiones aeroespaciales, el cambio climático, las carreras en STEM y su impacto en nuestra comunidad, la misión de NASA, el planeta Tierra y el cosmos en general.

- **Para Niños:** En su cadena especial Edye-TV, además de una colección de episodios sobre el Espacio, se programa una guía educativa especial para orientar a padres y profesores de niños pequeños sobre cómo usar el contenido de WSW. Ray (Henson) Puppet será llevado a la NASA como parte la producción de programas espaciales.
- Los especiales de World Space Week se pueden acceder de forma gratuita a través de principales operadores de cable como DIRECTV, optimum.tv, fios, xfinity, AT&Ttv, y otros.

***Oportunidad**: La comunidad latina de los EE. UU. consigue por primera vez con HITN-TV el alcance a un recurso en español diverso y de calidad sobre el espacio. La cadena se muestra abierta a explorar con otras entidades y países latinos otras posibilidades de difusión de sus contenidos espaciales.*

International Astronautical Federation (IAF)

Ámbito global. Orientado a profesionales, industria, negocio, gobiernos, organizaciones, investigadores, educadores.

www.iafastro.org

Fundada en 1951, la Federación Internacional de Astronáutica (IAF) es el principal organismo de promoción y cooperación espacial internacional, con más de 430 miembros en 72 países, incluyendo todas las principales agencias, empresas, instituciones de investigación, universidades, sociedades, asociaciones, institutos y museos espaciales de todo el mundo.

Como organizador del Congreso Astronáutico Internacional (IAC) anual, el evento espacial mundial más importante del mundo, y sus otros eventos temáticos, la IAF fomenta activamente el desarrollo de la astronáutica con fines pacíficos y apoya la difusión de información científica y técnica relacionada con el espacio.

Sus objetivos son:

- Contribuir al desarrollo de la astronáutica con fines pacíficos.
- Ayudar a difundir ampliamente las informaciones relacionadas con la astronáutica.

- Estimular y apoyar el interés que tiene la opinión pública en la astronáutica.
- Impulsar la participación en las investigaciones relacionadas con la astronáutica, a través de los institutos de investigación, universidades y firmas internacionales y nacionales.
- Desarrollar la actividad en las academias, institutos y comisiones que consagran sus investigaciones en todas las ramas de la ciencia, relacionadas con la astronáutica.
- Celebrar congresos, simposios, coloquios y otras reuniones científicas internacionales.
- Colaborar con las correspondientes organizaciones internacionales y nacionales en todas las esferas de la astronáutica.
- Utilización del espacio cósmico para fines pacíficos.

***Oportunidad**: Para las organizaciones espaciales de todo país, ser miembro activo de la IAF resulta un requerimiento ineludible para acceder a las mejores conexiones posibles en el sector espacial y especialmente como instrumento y foro idóneo donde articular inquietudes y propuestas. La IAF gestiona diversos comités entre los que el Space Education and Outreach Committee (SEOC) y el Committee On Developing Countries And Emerging Communities (ACDCEC) son interesantes para la región (ver su detalle a continuación). Actualmente la presidencia del ACDCEC está regida por el director de la agencia espacial del Paraguay.*

Space Education and Outreach Committee (SEOC) de la IAF

Ámbito global. Orientado a educadores y divulgadores.

www.iafastro.org/about/iaf-committees/technical-committees/space-education-and-outreach-committee-seoc.html

Entre los múltiples y diversos comités de la o organización IAF, para los fines de esta recopilación se destaca el Comité de Divulgación y Educación Espacial (SEOC).

Este comité fue creado con las finalidades de:

- Promover el desarrollo de programas educativos de calidad y de las oportunidades de aprendizaje en el sector espacial.
- Abogar por el desarrollo y despliegue de programas de divulgación STEAM de calidad, basados en actividades espaciales.
- Interactuar con los estudiantes que participan en las actividades de la IAF y desarrollar para ellos una programación dedicada como parte de las actividades de la IAF.
- Reconocer a los educadores y estudiantes innovadores involucrados en el sector espacial.
- El comité logra estos objetivos a través de una serie de simposios, actividades y premios organizados como parte del Congreso Astronáutico Internacional (IAC). Varias otras actividades se logran a través de colaboraciones del SEOC con otras entidades, por ejemplo, con la Junta Internacional de Educación Espacial para garantizar la entrega de un programa estudiantil complementario y la participación financiada de estudiantes de Canadá, Europa, Japón, Estados Unidos y otros países en el IAC.

La SEOC ha desarrollado y realizado dos talleres del Programa de Desarrollo Profesional para Educadores de la IAF para involucrar a los educadores de escuelas primarias y secundarias en actividades específicas de aprendizaje, incluidos talleres y sesiones de panel adjuntas al IAC para complementar las presentaciones profesionales y las sesiones técnicas del Congreso.

La SEOC también participa en el proceso de selección de los ponentes del Plenario de la Próxima Generación (SGAC). Esta sesión plenaria única del Congreso Astronáutico Internacional ofrece oportunidades para que estudiantes y jóvenes profesionales se dirijan e influyan en la comunidad espacial internacional.

***Oportunidad**: Formar parte de este comité resulta una vía de acceso privilegiada a información sobre nuevos recursos y actividades al alcance de las organizaciones con interés de promoción de STEAM. Participar de forma activa abre la oportunidad a un rol protagonista que permita manifestar e impulsar aquí los intereses específicos de la región.*

Simposio de Educación y Divulgación Espacial de la IAF

Ámbito global. Orientado a educadores, recursos humanos, tomadores de decisiones.

Este simposio, organizado por el Comité de Divulgación y Educación Espacial (SEOC) de la IAF, explora las mejores prácticas y enfoques innovadores para la educación espacial en todos los niveles. A través de sus sesiones, el simposio muestra actividades, métodos y técnicas para la educación, la divulgación al público en general y el desarrollo de la fuerza laboral. Los discursos principales del simposio, incluido el del ganador de la Medalla de Astronáutica Frank J. Malina de la IAF, destacan algunos de los mejores programas de educación y divulgación de todo el mundo.

Entre sus principales sesiones:

- **Ignition - Educación espacial primaria**
  Programas innovadores centrados en la educación espacial y la divulgación para estudiantes de hasta 11 años. Se hace hincapié en los programas que involucran de manera efectiva a los estudiantes de primaria en STEAM, ayudándolos a desarrollar habilidades clave y fomentar la pasión por el espacio a largo plazo.
- **Lift Off - Educación espacial secundaria**
  Programas innovadores centrados en la educación espacial y la divulgación para estudiantes de 11 a 18 años. Se hace hincapié en los programas que involucran de manera efectiva a los estudiantes de secundaria en STEAM, ayudándolos a desarrollar habilidades clave y fomentar la pasión por el espacio a largo plazo.
- **On Track - Educación espacial de pregrado**
  Programas innovadores de educación espacial y divulgación dedicados a estudiantes universitarios. Esto puede incluir el desarrollo y la entrega de cursos innovadores, trabajo basado en proyectos y prácticas laborales.
- **In Orbit - Educación espacial de posgrado**
  Programas innovadores de educación espacial y divulgación para estudiantes de posgrado. Esto puede incluir el desarrollo de cursos innovadores, trabajos basados en proyectos, y prácticas laborales.

- **Preparando el futuro - Desarrollando la fuerza laboral espacial**
  Desafíos, oportunidades y enfoques innovadores para desarrollar la fuerza laboral espacial global actual y futura. Los trabajos presentados en esta sesión pueden incluir, entre otros: programas formales de acreditación y desarrollo profesional, actividades de desarrollo profesional de empresas, organizaciones sin fines de lucro y otros actores.
- **Llamando al Planeta Tierra - Divulgación espacial para el público en general**
  Sesión centrada en actividades, programas y estrategias para involucrar al público en general en actividades espaciales y fuera del sistema educativo formal.
- **Nuevos Mundos - Educación y divulgación espacial no tradicional**
  Esta sesión se centra en métodos novedosos y no estándar de educación espacial y divulgación en áreas no tradicionales y para grupos objetivo no tradicionales como la inclusión con discapacidades, educación sin límites de edad, etc.
- **Educación y divulgación práctica sobre el espacio**
  Una forma poderosa de introducir y enseñar conceptos de STEAM, especialmente con estudiantes diversos. Esta sesión comparte actividades prácticas y experimentos efectivos para explorar, enseñar y reforzar conceptos relacionados con el espacio. Durante la sesión, los presentadores no solo presentan las ideas detrás de la actividad, sino que también la demuestran de forma práctica en el IAC.
- **Cultura espacial: participación pública en el espacio a través de la cultura**
  Esta sesión se centra en las actividades de educación y divulgación de instituciones como museos, agencias espaciales y organizaciones sin fines de lucro, que vinculan la educación espacial con la cultura.
- **50º Congreso Estudiantil en el IAC2022**
  En este congreso incluido dentro del IAC se presentan trabajos relacionados con el espacio por parte de estudiantes de pregrado y posgrado y que participan en una competencia estudiantil internacional.

***Oportunidad**: Un simposio fuente de importante cantidad y diversidad de ejemplos exitosos de educación y recursos STEAM y espacio en el mundo. Foro idóneo asimismo para exponer casos propios.*

Committee On Developing Countries And Emerging Communities (ACDCEC) de la IAF

Ámbito global. Orientado a profesionales, industria, negocio, tomadores de decisiones.

https://www.iafastro.org/about/iaf-committees/administrative-committees/committee-on-developing-countries-and-emerging-communities-acdcec.html

El Comité de para los Países en Desarrollo y Comunidades Emergentes (ACDCEC) es el comité especializado de la IAF que se encarga de promover la cooperación internacional en el espacio, difundir información técnica relacionada, realizar estudios sobre temas de interés internacional, publicar trabajos e informes, y organizar simposios y sesiones en los congresos anuales con miras a lograr los objetivos generales de:

- Involucrar una mayor participación de los países en desarrollo y las naciones emergentes en las actividades de la IAF.
- Brindar apoyo de conocimientos y experiencia a estos países y naciones.
- Producir beneficios tangibles para estos países y naciones.
- Cooperar con otros Comités de IAF y contrapartes en IAA, IISL y SGAC.

El alcance del trabajo cubre los siguientes temas de trabajo: Apoyo político, Soporte financiero, Nivel de Desarrollo tecnológico, Capital Humano, Infraestructuras.

***Oportunidad**: Es el comité de la IAF especialmente indicado para países emergentes en el ámbito espacial. Lugar de discusión sobre las necesidades y estrategias para el mejor posicionamiento de estas regiones de forma cooperativa.*

International Astronautical Congress (IAC)

Ámbito global. Orientado a profesionales, industria, negocio, educadores, tomadores de decisiones.

https://www.iafastro.org/events/iac/

El principal evento mundial del sector espacio, el International Astronautical Congress (IAC), ha tenido lugar este año en París del 18 al 21 de septiembre en su 73ª edición. Se trata de un congreso itinerante organizado por la IAF, cuyas últimas ediciones se han celebrado en Bremen (Alemania), México, Washington DC (USA) y Dubái (UAE).

Con el lema "Space for @ll", se ha querido reunir este año en París a todas las comunidades espaciales formadas por empresas y países emergentes, emprendedores, laboratorios, investigadores científicos y fabricantes que podrían involucrarse en actividades espaciales o beneficiarse de ellos. Prestando especial atención a los estudiantes y jóvenes profesionales, a través de eventos dedicados. El IAC2022 ha ofrecido así un programa completo de conferencias consistente principalmente en sesiones plenarias, conferencias técnicas y reuniones simultáneas para los que se han recibido unos 5.000 resúmenes desde 97 países.

Figura 8.

73º Congreso Astronáutico Internacional – IAC 2022, París - iac2022.org

Fuente: IAC 2022, París - iac2022.org

El IAC2022 se ha complementado con una zona expositiva, constituyendo el punto de encuentro durante 5 días de 250 expositores y la asistencia récord

de 9,000 especialistas, prensa y público en general de todo el mundo. Han participado con pabellones y agencias nacionales espaciales países como Francia, Alemania, Italia, Reino Unido, Portugal, Polonia, Australia, Israel, EAU, EE.UU., entre otros, así como grandes empresas del sector aeroespacial.

España se ha presentado en esta edición con un pabellón nacional bajo el nombre de Spain Space, en el que 14 de las empresas españolas más representativas del sector han mostrado las capacidades de la industria espacial española: sistemas y equipos satelitales, lanzadores, operadores, proveedores de servicios, centros de control en tierra y las nuevas tecnologías que forman parte del denominado New Space. Asimismo, la región de Cataluña ha participado por primera vez con pabellón propio, acogiendo a 15 entidades del ecosistema espacial catalán.

La promoción española ha sido liderada por su organismo ICEX, que ha realizado una campaña promocional específica para esta feria. Con carácter previo, se ha difundido la presencia de las empresas españolas en la misma entre los profesionales del sector aeroespacial mediante una newsletter y un catálogo online. También se ha elaborado un vídeo promocional de las empresas participantes para su proyección y difusión a potenciales clientes que visiten la zona institucional del pabellón. Asimismo, durante la celebración de la feria se ha organizado un desayuno networking entre las empresas españolas y la delegación australiana participante en IAC.

***Oportunidad**: Participar en el IAC con ponencias propias demuestra en este ámbito el grado de madurez científica espacial de un país o región. Para cada ocasión del IAC, una participación recurrente, organizada de forma estratégica, y alineada con los objetivos nacionales puede conseguir un destacado impacto y visibilidad ante los demás referentes. Asimismo, como feria internacional, asistir en persona facilita la toma de contacto directo con proveedores líderes y potenciales socios y colaboradores clave para proyectos y programa propios.*

UN/IAF Workshop on Space Technology for Socio-Economic Benefits

Ámbito global. Orientado a profesionales, industria, negocio, educadores, tomadores de decisiones.

https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/schedule/2022/un-iaf-workshop.html

El 29º Taller de las Naciones Unidas / IAF sobre Tecnología Espacial para Beneficios Socioeconómicos, organizado por la CNES en París, se desarrolló este año del 16 al 17 de septiembre en el entorno de la IAC2022. Esta edición coincide con el tema "Acceso al espacio para todos: salvar la brecha espacial" de la IAC2022, reuniendo a una destacada lista de oradores de todo el mundo.

El taller proporcionó un foro de debate sobre cómo la ciencia, las tecnologías y las aplicaciones espaciales pueden apoyar el desarrollo económico, social y ambiental sostenible, así como el desarrollo de políticas de ciencia, tecnología e innovación relacionadas con el espacio, aprovechando la iniciativa "Acceso al espacio para todos."

Figura 9.
29th Workshop on Space Technology for Socio-Economic Benefits. París, 2022

Fuente:CNES, 2022

El taller abordó temas esenciales relacionados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, que están directa o indirectamente relacionados con el espacio. Se centró en los elementos específicos de varios ODS, que son cruciales para el desarrollo sostenible:

ODS 4: Educación de calidad.

ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico.

ODS 10: Reducción de las desigualdades.

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.

ODS 17: Alianzas para los Objetivos.

El taller sirvió como una plataforma para garantizar un desarrollo inclusivo en áreas relacionadas con tecnologías espaciales, involucrando a una amplia gama de actores, como personas, estudiantes, sectores privados, investigadores, académicos e innovadores. El objetivo principal era llevar los beneficios de la exploración espacial a los usuarios finales y contribuir al logro de los ODS. El Taller tuvo varios objetivos clave, que incluyen:

- Reunir a responsables de la formulación de políticas y tomadores de decisiones, así como a la comunidad académica e investigadores, con el fin de integrar el espacio en las políticas y procesos de toma de decisiones.
- Sensibilizar sobre las actividades relacionadas con la innovación y los beneficios socioeconómicos de las actividades espaciales, realizadas por entidades internacionales y nacionales, agencias espaciales, la industria y la sociedad civil.
- Crear conciencia sobre los esfuerzos de creación de capacidad en actividades que permiten el acceso al espacio y discutir sinergias y áreas de trabajo comunes.
- Promover la conciencia sobre los esfuerzos de la comunidad espacial internacional en la cooperación internacional y las asociaciones que involucran a naciones e industrias espaciales emergentes.

Las presentaciones realizadas durante el taller se publicarán en el sitio web de la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre de las Naciones Unidas (UNOOSA) para aumentar la conciencia sobre las capacidades y los beneficios de las aplicaciones de la tecnología espacial.

***Oportunidad**: Participar en persona en este taller resulta muy interesante para los intereses de la región Latinoamericana y Caribe por el enfoque particular de sus objetivos sobre los beneficios económicos del espacio en las naciones e industrias espaciales emergentes. Especialmente para responsables políticos, directivos de administraciones públicas, y tomadores y formadores de decisiones.*

UNOOSA - European Global Navigation Satellite System and Copernicus: Supporting the Sustainable Development Goals

Ámbito global. Orientado a gobiernos, profesionales, industria, negocio, educadores, tomadores de decisiones.

digitallibrary.un.org/record/3833375?ln=es

Este informe es el resultado de una colaboración entre la Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Ultraterrestre (UNOOSA) y la Agencia Europea del GNSS (GSA). Su objetivo es investigar cómo las tecnologías espaciales de la Unión Europea contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas. La UNOOSA se encarga de promover la cooperación internacional en el uso y la exploración del espacio con fines pacíficos y en la utilización de la ciencia y la tecnología espaciales para el desarrollo económico y social sostenible. Por su parte, la Agencia Europea del GNSS (GSA) opera EGNOS y Galileo, los sistemas de navegación por satélite de la Unión Europea, y se encarga de garantizar que se maximicen los beneficios socioeconómicos derivados de su uso. Este informe es una colaboración conjunta de ambas organizaciones para evaluar el impacto de las tecnologías espaciales europeas en la consecución de los ODS de la ONU.

Figura 10.

Los 17 ODS y grados de contribución de las tecnologías espaciales Copernicus y EGNSS

Fuente: ONU, 2015

El análisis demuestra que todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se ven beneficiados de manera positiva por el uso de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite Europeos (EGNSS) y las aplicaciones de Copernicus. De los 169 indicadores asociados a los ODS, aproximadamente el 40% (65 indicadores) obtienen beneficios directos del uso de los servicios de EGNSS y Copernicus. Estos servicios ayudan a supervisar el progreso hacia la consecución de los ODS y, en muchos casos, contribuyen activamente a su cumplimiento.

A pesar de los beneficios potenciales de las tecnologías espaciales, se observa que los datos de Observación de la Tierra (EO) aún no se utilizan de manera óptima. Existen limitaciones, especialmente en países en desarrollo, que incluyen la falta de estandarización de los datos de EO, la necesidad de datos listos para el análisis, la falta de ejemplos exitosos que demuestren su utilidad, y la falta de colaboración entre países para abordar problemas similares, como la formación de recursos humanos especializados y la gestión de la infraestructura de datos. Por lo tanto, enfoques de evaluación como el presentado en este informe, así como '*Seeing Sustainability from Space: Using Earth Observation Data to Populate the UN Sustainable Development Goal Indicators*', son esenciales para aprovechar al máximo la tecnología de Observación de la Tierra en beneficio de comunidades de todo el mundo y para avanzar en la consecución de los ODS de la ONU.

***Oportunidad**: Amplias posibilidades de mejora de los ODS en la región, a través de alianzas que consigan un efecto multiplicador en la aplicación de las herramientas espaciales.*

ESA Symposium on Space Educational Activities (SSEA) - Barcelona, 2022

Ámbito global. Orientado a educadores, estudiantes, tomadores de decisiones, profesionales, industria, negocio. *sseasymposium.org*

El Simposio itinerante sobre Actividades Educativas Espaciales (SSEA) es un evento internacional de gran relevancia en el campo de la educación espacial. Es organizado por la Oficina de Educación de la Agencia Espacial Europea y brinda una plataforma para que estudiantes universitarios y profesionales que trabajan en educación espacial compartan y discutan sus experiencias en la organización y participación en actividades educativas.

Además, el simposio se centra en la presentación de nuevas metodologías y contenidos docentes innovadores relacionados con las ciencias y tecnologías espaciales. Este evento es fundamental para fomentar la educación espacial y promover el intercambio de ideas y mejores prácticas en este campo.

Los objetivos del SSEA son los siguientes:

- Permitir que los educadores (tanto curriculares como extracurriculares) muestren y compartan sus experiencias brindando/apoyando actividades educativas espaciales en el nivel de educación terciaria.
- Permitir que los estudiantes de educación terciaria (por ejemplo, la universidad) y los jóvenes profesionales participantes en actividades educativas espaciales compartan sus resultados y experiencias educativas, científicas y técnicas.
- Proporcionar un foro de debate sobre el estado actual y futuro de las actividades educativas espaciales de nivel terciario en Europa.
- Permitir que los educadores (incluidos los estudiantes universitarios y los profesores de secundaria) muestren y compartan sus experiencias al proporcionar actividades educativas espaciales para el nivel de educación secundaria (por ejemplo, la escuela secundaria) que "salvan" la brecha entre la educación secundaria y la terciaria.
- Brindar oportunidades de trabajo en red tanto para los profesionales de la educación espacial como para los participantes en proyectos/actividades de educación espacial.
- Elevar la comprensión de las instituciones/organizaciones académicas, industriales y gubernamentales sobre la importancia de las actividades prácticas y la capacitación especializada y las oportunidades de aprendizaje en la preparación de la próxima generación de científicos e ingenieros espaciales.

En su celebración de este año 2022 en la ciudad de Barcelona, participaron más de 500 asistentes entre estudiantes, profesorado, personal investigador, emprendedores y profesionales de todo el mundo, que ha presentado un total de 143 ponencias.

***Oportunidad**: Otro foro ideal para la participación de educadores y directivos de organizaciones educativas para descubrir y compartir experiencias que pueden ser replicadas.*

Nuevos compromisos del gobierno de los EE. UU. para inspirar, preparar y dar empleo a la fuerza laboral espacial

Ámbito EE. UU. Orientado a educadores, recursos humanos, tomadores de decisiones.

La declaración de la vicepresidenta Kamala Harris anuncia nuevos compromisos del gobierno de EE. UU. y varias entidades para apoyar iniciativas STEM relacionadas con el espacio. Estos compromisos tienen como objetivo inspirar, preparar y emplear a la próxima generación de la fuerza laboral espacial estadounidense. Se ha formado una coalición en colaboración con la Asociación de Industrias Aeroespaciales y el Instituto Estadounidense de Aeronáutica y Astronáutica para implementar tres programas piloto regionales en la Costa Espacial de Florida, la Costa del Golfo de Luisiana y Mississippi, y el sur de California.

Estos programas piloto trabajarán en colaboración con proveedores de servicios como universidades, sindicatos y otras organizaciones para demostrar un enfoque replicable y escalable para atraer, capacitar y crear oportunidades de empleo en el campo de STEM, particularmente para personas que provienen de entornos tradicionalmente subrepresentados en trabajos STEM. El objetivo es abordar las brechas en la fuerza laboral y fomentar la diversidad en el sector espacial y aeroespacial.

Figura 11.

La vicepresidenta Kamala Harris pronuncia un discurso en el Consejo Nacional del Espacio

Fuente: NASA/Joel Kowsky

Además, las agencias federales y el sector privado han coordinado sus esfuerzos para promover la educación y la fuerza laboral STEM espacial con los siguientes compromisos:

- **Recursos Federales STEM Espaciales para Educadores**

Centro de recursos en línea "Tu lugar en el espacio".
$1.25 millones para Centros de Aprendizaje Extracurriculares.
Sitio web de carreras espaciales militares.
Recursos para educadores de Artemis Moon Trees.
Centro de recursos para educadores Artemis.

- **Oportunidades federales para experiencias de aprendizaje práctico**

Acelerador de aprendizaje centrado en el espacio.
Asociación con la Universidad de Puerto Rico Mayagüez.
Financiamiento de investigación para beneficiarios existentes de NSF.

Las siguientes empresas y organizaciones del sector privado se suman también a las acciones de la Administración para inspirar, preparar y emplear la fuerza laboral espacial:

- **Para inspirar a los jóvenes a seguir carreras STEM en el espacio**

Nickelodeon con su Serie "Noggin's Space Place" durante la WSW.
Mission Unstoppable to Feature Women in Space Jobs: programa semanal de CBS durante la WSW.
10,000 kits STEM de Learning Lunchbox: con el tema del Consejo Nacional del Espacio.
Expansión del programa Million Girls Moonshot Flight Crew: STEM Next Opportunity Fund.
Tema de exploración espacial para las actividades de la Hora del Código.
Serie Space Days de Blue Origin.

- **Proporcionar recursos STEM espaciales y desarrollo profesional para educadores.**

Lanzamiento del proyecto Moon Colony Kit y el desarrollo profesional del educador.
Nuevo centro de recursos para educadores para materiales STEM espaciales.
Plan de estudios aeroespacial y de cohetes.

Colección especial de recursos para educadores de STEM espacial: Discovery Education.

- **Para garantizar que la fuerza laboral espacial refleje la diversidad de América**

Aumento de la diversidad en las pasantías espaciales.
Premio Aerospace Allyship: Women in Aerospace (WIA).
Conferencia de sistemas aeroespaciales y Desafío de cohetes.
Evento de ciencia de datos para el espacio y la sostenibilidad.

***Oportunidad**: En definitiva, una referencia destacada de numerosas y variadas iniciativas, ideas, programas, materiales, y recursos STEAM para conseguir un importante impulso a las vocaciones y oportunidades laborales americanas. Muchas de ellas replicables en otros países adaptándolas a los medios, organismos, y potenciales patrocinadores locales.*

European Union Agency for the Space Programme (EUSPA)

Ámbito europeo. Orientado a profesionales, industria, negocio, educadores, tomadores de decisiones.

www.euspa.europa.eu

La EUSPA, o Agencia de la Unión Europea para el Programa Espacial, tiene como misión principal implementar el Programa Espacial de la Unión Europea y proporcionar servicios relacionados con el espacio que sean fiables, seguros y protegidos. Su objetivo es maximizar los beneficios socioeconómicos del espacio para la sociedad y las empresas europeas. Esto se logra fomentando el desarrollo de sectores innovadores y competitivos tanto en la parte de infraestructura espacial como en las aplicaciones y servicios que se derivan de ella.

La EUSPA se dedica a colaborar con la comunidad espacial de la Unión Europea, impulsando el crecimiento basado en la innovación en la economía europea y contribuyendo a la seguridad de los ciudadanos de la UE y la seguridad de la Unión y sus Estados miembros. En resumen, la agencia desempeña un papel crucial en la promoción y el desarrollo del programa espacial europeo para el beneficio de toda la comunidad.

El Programa Espacial de la UE consta de varios programas emblemáticos:

- **Copernicus** es el programa de observación de la Tierra de Europa. A través de sus servicios terrestres, marinos, atmosféricos, de cambio climático, de gestión de emergencias y de seguridad, Copernicus apoya una amplia gama de aplicaciones que incluyen protección ambiental, gestión de áreas urbanas, planificación regional y local, agricultura, silvicultura, pesca, salud, transporte, clima cambio climático, desarrollo sostenible, protección civil y turismo.
- **Galileo** es el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) de la UE, que proporciona información mejorada de posicionamiento y tiempo con importantes implicaciones positivas para muchos servicios y usuarios europeos. Permite a los usuarios conocer su posición exacta con mayor precisión que otros sistemas disponibles y admite respuesta de emergencia y búsqueda y rescate. Galileo también potencia la innovación europea, contribuyendo a la creación de nuevos productos, servicios y puestos de trabajo.
- **EGNOS**, el Servicio Europeo de Superposición de Navegación Geoestacionaria, es el sistema de aumento basado en satélites (SBAS) regional de la UE. Se utiliza para mejorar el rendimiento de los sistemas globales de navegación por satélite, como GPS y Galileo. Se ha desplegado para proporcionar servicios de navegación para la seguridad de la vida a usuarios de aviación, marítimos y terrestres en toda Europa.
- El programa **GOVSATCOM** (Comunicaciones Gubernamentales por Satélite) tiene como objetivo proporcionar capacidades de comunicaciones seguras y rentables para misiones y operaciones críticas de seguridad gestionadas por la Unión Europea y sus Estados miembros, incluidos los actores de seguridad nacional y las agencias e instituciones de la UE.
- **SSA** (Space Situational Awareness) es un componente esencial del Programa Espacial de la UE. Al proporcionar un conocimiento y una comprensión exhaustivos de los peligros espaciales, la SSA desempeña un papel clave para garantizar la seguridad de las economías, las sociedades y los ciudadanos europeos que dependen de las capacidades y aplicaciones basadas en el espacio, como las aplicaciones de comunicación, navegación y observación. SSA mitiga el riesgo de una colisión entre los activos espaciales europeos y otras naves y desechos espaciales.

Gracias a los servicios y aplicaciones que permite, desde la monitorización atmosférica y la agricultura de precisión hasta una aviación más segura y la conducción automatizada, y su contribución a la economía y la sociedad de la UE, el espacio de la UE se ha vuelto indispensable para la vida de los europeos.

***Oportunidad**: Gran parte de los contenidos y servicios proporcionados por la EUSPA, y especialmente los relacionados con Observación de la Tierra y los de Navegación Satelital están disponibles gratuitamente también para cualquier usuario en el planeta. Estos valiosos recursos amplían las oportunidades de desarrollo de nuevas aplicaciones, servicios y negocios en la región latinoamericana. Especialmente aprovechando enlaces de cooperación técnica y administrativas con contrapartes europeas.*

EUSPA Galileo Masters Competition

Ámbito Internacional. Orientado a emprendedores.

galileo-masters.eu

El Galileo Masters es una competición global que tiene como objetivo apoyar la transformación de avances tecnológicos impulsados por la navegación por satélite en aplicaciones exitosas orientadas a la sociedad. La competición cuenta con una red global que proporciona soporte a los mejores casos, ayudándolos a evolucionar tanto tecnológica como comercialmente. Su misión principal es alentar a los innovadores y motivarlos a desarrollar aplicaciones basadas en tecnologías de navegación por satélite para su uso en la vida cotidiana.

Para participar en el Galileo Masters, los solicitantes deben ser personas físicas o jurídicas de un Estado miembro de la Unión Europea, el Espacio Económico Europeo (EEE), Países Vecinos Europeos (ENP), países del Sur/Este u otros países con los que la UE tiene diálogos espaciales y cooperación. Los participantes deben elegir uno de los desafíos específicos del tema. También tienen la opción de seleccionar uno de los Premios Galileo regionales que mejor se adapte a sus necesidades para duplicar sus posibilidades de ganar.

El Galileo Masters premia las soluciones más innovadoras con una bolsa de premios total de 830.000 EUR. Esto incluye numerosos premios en efectivo y en especie que respaldan el desarrollo de las soluciones ganadoras, como

servicios de incubación, soporte comercial, soporte de marketing, validación de conceptos, soporte técnico y más. El ganador global del Galileo Masters recibe otro premio en efectivo de 10.000 EUR.

Además de ser una competición, el Galileo Masters es una red global de partes interesadas en el espacio, incubadoras, empresas de Galileo/EGNOS, agencias de desarrollo económico y expertos en navegación por satélite que se unen para apoyar a los participantes en su camino hacia un negocio exitoso. Esta red cuenta con más de 89 socios globales en 28 países y un panel de 171 expertos en evaluación de todo el mundo.

***Oportunidad**: Pueden participar competidores latinoamericanos en todas las categorías. La participación es gratuita y sus premios facilitan a los emprendedores establecerse en una incubadora de un país europeo para el desarrollo de su idea de aplicación.*

EUSPA Copernicus Masters Competition

Ámbito Internacional. Orientado a emprendedores.

copernicus-masters.com

Copernicus Masters es una competición de innovación global diseñada para promover la adopción de aplicaciones de Copernicus entre los usuarios. En 2022, se ofreció un premio acumulado de 531.000 EUR. La competición está abierta a una amplia gama de innovadores, incluyendo personas físicas mayores de 18 años, consorcios y personas jurídicas. Se alienta a universidades, empresas emergentes, pymes, empresas más grandes, organizaciones de investigación y asociados de todo el mundo a unirse.

El proceso de la competición consta de varias fases:

Fase de registro y presentación: Esta fase finalizó el 13 de julio de 2022. Durante esta etapa, los participantes registraron sus proyectos y presentaron sus propuestas.

Evaluación: Todas las presentaciones se evalúan entre julio y octubre. Durante este período, los proyectos presentados son revisados y calificados por un panel de expertos.

Anuncio de finalistas: Los finalistas de los desafíos se anuncian en octubre/noviembre. Estos son los proyectos que han destacado en sus respectivas categorías.

Space Awards: Finalmente, los ganadores se anuncian durante los Space Awards en diciembre de 2022. Los premios se otorgan a los proyectos más destacados en diversas categorías.

Copernicus Masters brinda a los innovadores la oportunidad de destacar y ser reconocidos por sus soluciones basadas en Copernicus. La competición fomenta la creatividad y la innovación en el uso de datos y servicios proporcionados por el programa Copernicus para abordar desafíos y oportunidades en diversas áreas.

***Oportunidad**: Igual que con el Galileo Masters, pueden participar competidores latinoamericanos en todas las categorías. La participación es gratuita y sus premios facilitan a los emprendedores establecerse en una incubadora de un país europeo para el desarrollo de su idea de aplicación.*

ESA Business Incubation Centres (ESA BIC)

Ámbito europeo. Orientado a emprendedores.

https://commercialisation.esa.int/bic

Los Centros de Incubación de Empresas de la ESA (ESA BIC) conforman la red más extensa de incubadoras espaciales en Europa. Su principal objetivo es brindar apoyo a emprendedores con ideas de negocio basadas en el espacio, fomentando la creación y desarrollo de startups relacionadas con la industria espacial en toda Europa. Esta red proporciona un sólido respaldo al conectar a estas empresas emergentes con nuevos socios comerciales, impulsando así el éxito y la preparación de sus productos para el mercado.

Los BIC de la ESA buscan a emprendedores que estén trabajando en aplicaciones que utilicen sistemas basados en el espacio, como la navegación por satélite, la observación de la Tierra o las comunicaciones vía satélite. También acogen a aquellos que emplean tecnologías espaciales en contextos no espaciales y a quienes desarrollan productos y servicios innovadores relacionados con el sector espacial.

Cada BIC de la ESA es gestionado por líderes locales que establecen conexiones con la industria local, universidades, instituciones de investigación, el gobierno y la comunidad de inversores. Al mismo tiempo, mantienen vínculos sólidos a nivel regional y nacional. Esto garantiza que los BIC de la ESA estén estrechamente integrados en sus respectivas comunidades locales, convirtiéndose en un punto de referencia para todas las iniciativas y negocios vinculados al espacio.

Estas incubadoras ofrecen múltiples beneficios a los emprendedores, incluyendo un período de incubación de hasta dos años, asistencia técnica por parte de expertos de la ESA, orientación empresarial, asesoramiento legal y un subsidio de 50.000 EUR para el desarrollo de sus ideas y la protección de su propiedad intelectual.

***Oportunidad**: Este servicio es exclusivo para emprendedores establecidos en la UE. Sin embargo, su modelo de incubación y de red de soporte ha demostrado ampliamente su eficacia. Un modelo que puede adaptarse a cada realidad de país o región latinoamericana según sus posibilidades y adaptación a su ecosistema espacial.*

NASA International Space Challenge (Space Apps)

Ámbito global. Emprendedores, estudiantes.

www.spaceappschallenge.org *@SpaceApps*

Cada octubre, durante dos días, Space Apps reúne a participantes de todo el mundo en cientos de eventos locales, ya sea en persona o de forma virtual, con el propósito de abordar desafíos presentados por expertos de la NASA. Tras la celebración del hackatón, los expertos de la agencia espacial evalúan las presentaciones de los proyectos, y se seleccionan a los ganadores que optan por uno de los 10 premios globales disponibles.

Desde su lanzamiento en 2012, el Desafío Internacional de Aplicaciones Espaciales de la NASA ha logrado involucrar a más de 180,000 participantes de más de 150 países y territorios, consolidándose como el hackatón global anual más grande de su tipo.

Entre sus principales objetivos:

- Inspirar la colaboración, la creatividad y el pensamiento crítico.
- Fomentar el interés en la ciencia y exploración espacial.
- Dar a conocer las fuentes de datos de la NASA en todo el mundo.
- Fomentar el crecimiento y la diversidad en la próxima generación de científicos, tecnólogos, diseñadores, ingenieros y artistas.

Las aplicaciones espaciales tienen la capacidad de inspirar colaboración, creatividad y pensamiento crítico. Por lo tanto, la misión de NASA Space Apps es aprovechar este interés para fomentar el crecimiento y la diversidad de la próxima generación de científicos, tecnólogos, diseñadores, narradores e ingenieros. Space Apps tiene como objetivo encontrar soluciones a problemas globales utilizando datos gratuitos y abiertos proporcionados por la NASA, lo que brinda a los equipos la oportunidad de aprender a utilizar estos recursos para abordar los desafíos planteados cada año.

En su edición de 2022, bajo el tema "Make Space", los participantes se enfrentan a 23 desafíos planteados por científicos e ingenieros de la NASA. Estos desafíos abarcan una variedad de temas, desde cómo sobrevivir en Marte utilizando impresoras 3D hasta la exploración de Venus, y la aplicación de la inteligencia artificial en nuevos contextos.

***Oportunidad**: Con un total de más de 28 mil participantes y 162 países/regiones, tres de los cinco países líderes de la edición 2021 fueron latinoamericanos: Brasil, Perú, y México. Esta actividad promocional consigue ya una gran difusión y participación en la región. Los requerimientos para participar son sencillos, y no se necesita ser un experto programador para ser parte de Space Apps. De hecho, los equipos más diversos suelen ser los más exitosos.*

Yuri's Night

Ámbito global. Orientado a público general.

yurisnight.net

Yuri's Night es un proyecto de The SpaceKind Foundation, una organización sin fines de lucro que utiliza la emoción y la inspiración del espacio como catalizador para educar y desarrollar a la próxima generación de exploradores. Organizan eventos, alojan proyectos y fomentan la exploración de nuevas ideas. Son más conocidos por su evento anual homónimo, ¡Yuri's Night, The World Space Party!, que combina fiestas temáticas espaciales con educación y divulgación.

Las fiestas de Yuri's Night se llevan a cabo en todo el mundo cada mes de abril en conmemoración de dos eventos significativos: el día en que Yuri Gagarin se convirtió en el primer ser humano en aventurarse al espacio el 12 de abril de 1961 y el lanzamiento inaugural del primer transbordador espacial el 12 de abril de 1981.

Estos eventos pueden variar ampliamente, desde combinaciones de música techno y tecnología que duran toda la noche en un centro de la NASA hasta proyecciones de películas y observaciones de estrellas en una universidad local, o incluso reuniones de amigos en bares o barbacoas. Yuri's Night también organiza dos eventos emblemáticos en Los Ángeles, en el Centro de Ciencias de California, y en el Complejo de Visitantes del Centro Espacial Kennedy en Florida. En 2020 y 2021, debido a las circunstancias, Yuri's Night se llevó a cabo en formato completamente digital. Las transmisiones en vivo en línea incluyeron una variedad de invitados, como artistas, astronautas, músicos, científicos de Marte e íconos culturales.

***Oportunidad**: Un modelo extensible a toda la región, que con una componente altamente festiva atrae la participación e interés de la comunidad estudiantil juvenil.*

NewSpace Economy Congress Barcelona, 19-20 octubre 2022

Ámbito Cataluña (España). Orientado a profesionales, industria, negocio, emprendedores.

newspace22.cambrabcn.org

La Cámara de Comercio de Barcelona ha descrito el sector espacial en su Estrategia Cataluña 30/40 como un sector tecnológico innovador en pleno desarrollo, que potenciará el impulso de otros sectores como las telecomunicaciones, la movilidad, la vigilancia del medio ambiente y la protección civil. Los temas centrales que recoge la Estrategia espacial catalana son: Ecosistema, Investigación e innovación, Talento y sociedad, Infraestructura y datos, y Adopción de nuevos servicios espaciales (Cámara de Comercio de Barcelona, 2022).

En este contexto, la Cámara de Comercio de Barcelona organiza desde 2020 su jornada anual de promoción de la New Space Economy, reuniendo a destacados emprendedores, empresas, organizaciones e instituciones catalanas para debatir sobre las tendencias y las nuevas formas de crear y gestionar negocios en este sector. Este año las presentaciones abordan especialmente las aplicaciones para la movilidad sostenible, el medio ambiente, la agricultura sostenible, la protección civil, la prevención de catástrofes, el Internet de las Cosas, la inteligencia artificial y las inversiones en startups (Cámara de Comercio de Barcelona, 2022).

***Oportunidad**: Una actividad que apunta a servir, con muy limitados recursos, a una comunidad con una población de unos 7 M de habitantes, pero que tiene como objetivo adicional extender su impacto a mercados internacionales competitivos. La actividad tiene un formato sencillo que consigue reunir anualmente a interesados locales y extranjeros. Puede servir de modelo accesible a replicar, así como de participar también en él con fines de negocio.*

3.2. Educación espacial y 'Educación con espacio'

Se recogen a continuación iniciativas destacadas en las que se desarrolla educación o capacitación especializada en materias espaciales. Se incluyen

también iniciativas que facilitan o complementan la educación de materias STEAM-Espacio con materiales y otros recursos elaborados, y que pueden ser aprovechadas por los profesionales de la educación y los propios estudiantes. No se han incluido en esta reseña las carreras tradicionales en especialización Aeroespacial que son de amplio conocimiento en toda región.

Se expone para finalizar el caso particular "Programa 2MP" de Argentina, en el que recursos espaciales son utilizados para la enseñanza curricular normal de materias escolares STEM.

International Space University – ISU

Ámbito internacional. Orientado a profesionales, estudiantes universitarios, emprendedores.

https://www.isunet.edu

Figura 12.
Alumnos y profesores ISU en el Programa de Estudios Espaciales del Hemisferio Sur

Fuente: International Space University – ISU

La ISU es la única universidad en todo el mundo dedicada por completo a la educación espacial desde 1987. Hoy en día, ISU se compone de una red de educación con un campus central en Estrasburgo, con centros en los EE. UU.

y la región de Asia Pacífico, y con asociaciones y organizaciones espaciales líderes. ISU desarrolla una historia de 35 años de éxitos con 5,400 ex alumnos que se han integrado en el ecosistema espacial internacional de 110 países, incluidos astronautas y empresarios, además de líderes gubernamentales y de la industria espacial.

Programas: ISU ofrece una educación espacial de vanguardia para estudiantes internacionales de posgrado y profesionales, así como capacitación para la actualización de las habilidades de la fuerza laboral espacial. A partir de 2020, ISU ha sumado la modalidad de educación en línea con programas altamente interactivos con tutorías y capacitación en línea. Su oferta de programas se basa en:

- La **Maestría en Estudios Espaciales** (MSS) es un programa de posgrado interdisciplinario de uno o dos años. El MSS cubre todos los aspectos del dominio espacial global y está diseñado para estudiantes provenientes de una amplia gama ramas educativas, culturales y profesionales.
- El **Programa de Estudios Espaciales** (SSP) ofrece un curso intensivo de nueve semanas organizado cada año en el período de junio a agosto en diferentes lugares del mundo. El SSP ofrece cursos en todas las disciplinas espaciales, así como educación práctica a través de talleres y visitas profesionales.
- El **Programa de Estudios Espaciales del Hemisferio Sur** (SHSSP) es un programa intensivo de cinco semanas que brinda una comprensión multidisciplinaria de las actividades y áreas de conocimiento requeridas por los profesionales espaciales de hoy.
- Los **Cursos Espaciales Ejecutivos** (ESC) brindan educación espacial específica para la audiencia no espacial, así como también capacitación de actualización para la fuerza laboral espacial.

Emprendimientos: En los últimos 30 años, más de 110 nuevas empresas espaciales exitosas han sido fundadas o co-fundadas por ex alumnos de ISU en 27 países, algunas de las cuales ahora son compañías líderes mundiales en "NewSpace". Para fomentar el espíritu empresarial, ISU ofrece la disciplina de gestión espacial y negocios en todos sus programas, cubriendo temas como

marketing, finanzas, costos, transferencia de tecnología, New Space y gestión de proyectos internacionales. Los ex alumnos de ISU también se benefician de una incubadora de empresas emergentes en su campus central, así como de servicios que incluyen capacitación de pre-incubación y acceso a financiamiento. Además, ISU alberga un Laboratorio de Política Espacial y Emprendimientos (SPEL) dedicado a monitorear tendencias de innovación en el sector espacial.

***Oportunidad**: Es el recurso de capacitación espacial de referencia al que estudiantes de todo el mundo pueden acceder. En particular, participando en Latinoamérica en su programa SHSSP específico para el hemisferio sur. ISU se muestra además abierta a explorar nuevas posibilidades de colaboración y de proyectos formativos con entidades espaciales nacionales.*

European Space Security and Education Centre – ESA ESEC

Ámbito europeo e internacional. Orientado a educadores, estudiantes, profesionales, emprendedores.

www.esa.int/Education/ESA_at_the_forefront_of_space_education
www.esa.int/About_Us/Corporate_news/ESA_ESEC

ESA ESEC es el **Centro Europeo de Educación y Seguridad Espacial** de la ESA, centro de excelencia para los servicios de ciberseguridad espacial, sede de los centros de control de misión **Proba** de la ESA, el **Centro de Datos del Clima Espacial**, y el **Centro de Capacitación Educativa de la ESA**.

ESEC se dedica por completo a programas innovadores de formación y aprendizaje para profesores de escuela y estudiantes universitarios de los Estados miembros de la **ESA**, tanto en forma de cursos innovadores como de experiencia práctica significativa. Los programas de formación específicos están diseñados e impartidos por expertos en didáctica y espacio para apoyar el desarrollo de los jóvenes de las llamadas habilidades del siglo XXI: el conjunto de conocimientos, habilidades y competencias reconocidos a nivel europeo como necesarios para la próxima generación de trabajadores, en STEM y los sectores espaciales en particular.

El Programa de Educación de la ESA se dirige a una amplia gama de grupos de edad, desde los primeros años de la escuela primaria hasta el nivel de doctorado en la universidad. Lo hace a través de una amplia cartera de actividades diferenciadas por edades, agrupadas en torno a grandes pilares.

- **STEM programme - ESERO: para el nivel escolar**

Este programa se centra en la educación escolar formal (curricular) y utiliza el espacio como un contexto de enseñanza y aprendizaje para las disciplinas **STEM** en general. Su objetivo es despertar el interés y fomentar la alfabetización, las habilidades y competencias **STEM**, los valores y actitudes fundamentales, apoyando los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la **ONU**.

El **STEM** programme está incluido en el laboratorio de tecnología electrónica Galaxy, y está dirigido a profesores y estudiantes de escuelas primarias y secundarias. El programa ofrece recursos para el aula, proyectos escolares y capacitación docente impartidos directamente por la **ESA**, por ejemplo, a través del laboratorio de tecnología electrónica y a través de las oficinas nacionales **ESERO** de la **ESA**. **ESA Kids**, una plataforma en línea que proporciona un entorno de educación informal para los más pequeños complementa la oferta.

- **ESA Academy: para el nivel universitario**

ESA Academy tiene como objetivo complementar la educación académica de los estudiantes al ofrecer oportunidades de aprendizaje altamente cualificadas en casi todos los campos de especialización de la ESA. El objetivo es dotar a la futura mano de obra especializada, de las habilidades y competencias del siglo XXI, mejorar su empleabilidad y estimular la creatividad, la innovación y el espíritu empresarial.

Figura 13.

Estudiantes en el Centro de Formación y Aprendizaje de la Academia de la ESA

Fuente: ESA Academy, 2022

ESEC alberga también la instalación de soporte CubeSat de la Academia de la ESA, una instalación de prueba e integración de ensamblaje de última generación para ser utilizada por los equipos de estudiantes que participan en *Fly Your Satellite!*. La iniciativa se complementa con el *e-technology lab,* que brinda capacitación a docentes de primaria y secundaria en el uso de un entorno espacial para enseñar y aprender tecnología y ciencia.

Las principales iniciativas derivadas de ESA Education se explican a continuación con mayor detalle.

***Oportunidad**: Un modelo que podría aplicarse en la futura agencia espacial latinoamericana y caribe, ALCE, adaptada a las necesidades y la propia oferta educativa especializada regional. Asimismo, acuerdos bilaterales de colaboración con ESA Education pueden explorarse y ponerse en práctica en un medio plazo.*

ESA Space Education Resource Office (ESERO)

Ámbito europeo. Orientado a educadores, estudiantes, público general.

www.esa.int/Education/Teachers_Corner/European_Space_Education_Resource_Office

El proyecto de la **Oficina Europea de Recursos para la Educación Espacial (ESERO)** es el principal canal de **la Agencia Espacial Europea (ESA)** para apoyar a la comunidad de educación primaria y secundaria en Europa.

ESERO utiliza temas relacionados con el espacio y la genuina fascinación que sienten los jóvenes por el espacio para mejorar la alfabetización y la competencia de los alumnos de la escuela en materias relacionadas con STEM. El proyecto ESERO intenta crear conciencia sobre la amplia gama de perspectivas de carreras profesionales en el dominio espacial y ayuda a estimular la conciencia de los jóvenes sobre el programa espacial europeo y su importancia para la sociedad y la economía modernas.

ESERO ofrece una serie de sesiones anuales de formación nacionales o regionales para profesores de primaria y secundaria. Estos se ofrecen en colaboración con socios nacionales que ya están activos en la educación STEM. Los eventos de capacitación de profesores están, siempre que sea posible, acreditados oficialmente como parte de las cualificaciones de desarrollo profesional continuo.

ESERO utiliza y difunde los recursos STEM existentes en el aula relacionados con el espacio de ESA/ESERO y, si corresponde, desarrolla nuevos recursos específicos adaptados a los planes de estudios nacionales. Se utilizan tanto como sea posible datos espaciales reales y la aplicación de metodología científica de la vida real, acompañados del apoyo modelo a seguir de expertos espaciales reales, como científicos e incluso astronautas.

El programa tiene en cuenta las necesidades educativas específicas de los distintos Estados miembros, todos con diferentes sistemas educativos, diferentes programas escolares y diferentes idiomas. Con ese fin, los ESERO se distribuyen en los Estados miembros y cuentan con expertos locales que trabajan en sinergia y asociación con sus redes y autoridades educativas nacionales.

Actualmente, la ESA ha establecido veinte oficinas nacionales de ESERO en los Estados miembros de la ESA: Austria, Bélgica, República Checa, Dinamarca,

Estonia, Francia, Alemania, Grecia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Finlandia, Países Bajos, Noruega, Polonia, Portugal, Rumania, España, Suecia y Reino Unido.

***Oportunidad**: Derivado del caso anterior, con foco en la comunidad estudiantil primaria y secundaria latinoamericana.*

ESERO España

Ámbito español. Orientado a educadores, estudiantes, público general.

esero.es/

Figura 15.
Estudiantes en actividad ESERO

Fuente: ESERO, 2022

Co Con sede en el Parque de las Ciencias, en la ciudad de Granada, ESERO España está financiado a nivel nacional por el Consorcio Parque de las Ciencias, la Consejería de Educación de Andalucía de la Junta de Andalucía, así como por otros socios en otras comunidades autónomas españolas, como: Xunta de Galicia, Department d'Ensenyament Generalitat de Catalunya, Centro Astronómico Aragonés, Comunidad de Madrid, Generalitat Valenciana, y otros. Con el lema «del espacio al aula» y aprovechando la fascinación que el alumnado siente por el espacio, tiene como objetivo principal proporcionar recursos a docentes de primaria y secundaria para mejorar su alfabetización y competencias en materias STEM (Ciencias, Tecnología, Ingeniería, Arte, y Matemáticas). Además de generar recursos para llevar el espacio a las diferentes

materias STEAM y capacitar sobre la manera de implementar estos recursos en las aulas, desde ESERO se ponen en marcha diferentes iniciativas enfocadas a descubrir nuevas maneras de potenciar las vocaciones científicas entre el alumnado en todos los niveles, desde Educación Infantil hasta Bachillerato.

ESERO Spain se organiza en 4 áreas de trabajo: Ingeniería de astronaves, Investigación planetaria, Observación de la tierra, y Exploración espacial. Y ofrece: Formación homologada y recursos gratuitos para el profesorado; Desafíos, concursos y proyectos de aula para el alumnado; Actividades para la promoción de vocaciones científicas y tecnológicas, además del desarrollo de iniciativas específicas como #ellasinspiranSTEM, que visibiliza el compromiso con la promoción de las vocaciones científicas femeninas.

***Oportunidad**: Como caso particular del anterior, acuerdos especiales con la oficina nacional ESERO Spain pueden resultar más accesibles para la comunidad hispanohablante, así como con ESERO Portugal para la comunidad brasileña. Su modelo de financiamiento y de coordinación con los diferentes ministerios de educación regionales españoles puede servir de ejemplo de aplicación en Latinoamérica.*

ESA Teachers' Corner

Ámbito europeo. Orientado a educadores, estudiantes, público general.

www.esa.int/Education/Teachers_Corner

Este "rincón del profesor" de la Agencia Espacial Europea reúne diversos proyectos y recursos educativos espaciales, como la competición anual CanSat, Climate Detectives, Moon Camp Challenge, Mission X, Astro Pi Challenge, Lego Mindstorms, noticias, etc. Los contenidos están en inglés.

***Oportunidad**: Contenidos en inglés que pueden resultar útiles en clases STEAM.*

ESA Kids

Ámbito europeo / Contenidos en español. Orientado a educadores, estudiantes, público general.

www.esa.int/kids/es/Home

Dependiendo de ESA Education, ESA Kids es un repositorio de contenidos educativos espaciales, noticias, videos, lecciones y talleres ya preparados para los profesores, juegos, etc. En seis diferentes idiomas europeos, está también en español. Utiliza el personaje "Paxi" como mascota oficial de los contenidos de ESA Education.

***Oportunidad**: Contenidos en español y en otros idiomas que pueden resultar útiles en clases STEAM.*

ESA Academy

Ámbito europeo y países asociados. Orientado a educadores, estudiantes universitarios.

www.esa.int/Education/ESA_Academy

Lanzada oficialmente en marzo de 2016, ESA Academy es el programa educativo general de la ESA para estudiantes universitarios de los Estados miembros de la ESA, Canadá, Letonia, Lituania y Eslovenia.

A través de una transferencia personalizada de conocimientos espaciales y la interacción con profesionales del espacio, ESA Academy lleva a los estudiantes a través de un camino de aprendizaje que enriquece su educación académica. Como resultado, los estudiantes pueden mejorar sus habilidades, aumentar su motivación y ambiciones, familiarizarse con las prácticas profesionales estándar que se aplican hoy en día en el sector espacial y estar mejor preparados para el mercado laboral.

ESA Academy no solo está abierta a estudiantes que ya están involucrados en estudios relacionados con el espacio en los campos de la ciencia y la ingeniería. También está destinado a estudiantes de ciencias e ingeniería que no eligieron el espacio como especialidad, para mostrar cómo las instalaciones espaciales pueden abrir un abanico de nuevas posibilidades de investigación y aplicaciones, abriendo así una nueva perspectiva en el aprendizaje de las disciplinas espaciales.

ESA Academy se ejecuta en estrecha colaboración con universidades europeas y está diseñada para complementar la educación académica. Su objetivo es mejorar la experiencia educativa de los estudiantes y adquirir conocimientos prácticos y teóricos y experiencia en diversas disciplinas, que van desde las

ciencias espaciales hasta la ingeniería, la medicina espacial, las operaciones de naves espaciales, la gestión de proyectos y riesgos, la garantía de productos y calidad, la normalización y mucho más.

Los dos pilares de ESA Academy:

- **Hands-on Space Projects,** un programa continuado que permite a los estudiantes universitarios adquirir experiencia de primera mano y de principio a fin en proyectos relacionados con el espacio. En todos los casos, los estudiantes experimentan directamente lo que se necesita para ejecutar el ciclo de vida completo de un proyecto espacial, desde la concepción hasta la operación.
- **Programa de Formación y Aprendizaje,** una iniciativa que ofrece a los estudiantes universitarios un portfolio de diferentes sesiones formativas y oportunidades de aprendizaje. Las sesiones de capacitación están disponibles para estudiantes universitarios de ciencia e ingeniería interesados, no solo para aquellos que ya están involucrados en estudios relacionados con el espacio.

Oportunidad*: Un modelo que podría aplicarse también en la futura agencia espacial latinoamericana y caribe, ALCE, adaptada a las necesidades y la propia oferta educativa especializada regional. Asimismo, acuerdos bilaterales de colaboración con ESA Academy para el segmento universitario latinoamericano podrían explorarse y ponerse en práctica en el medio plazo.*

International Space Education Board (ISEB)

Ámbito internacional. Orientado a educadores, estudiantes universitarios, profesionales.

iseb.space

El organismo colaborativo ISEB, fundado en 2005 por las agencias espaciales de Estados Unidos (NASA), Europa (ESA), Japón (JAXA) y Canadá (CSA), cuenta actualmente con miembros adicionales como la agencia francesa (CNES), coreana (KARI), sudafricana (SANSA), australiana (VSSEX) y más recientemente la mexicana (AEM). Esta expansión ha marcado una nueva era de colaboración mundial en la educación espacial.

En 2008, la Junta acordó modificar su estatuto para permitir que organizaciones distintas de las agencias espaciales que estén involucradas en actividades educativas relacionadas con el espacio se puedan unir a la ISEB como Miembros Asociados. Uno de los principales objetivos que sirvió como catalizador para la creación del ISEB es la oportunidad de compartir las mejores prácticas y aunar esfuerzos para fomentar el interés por el espacio, la ciencia y la tecnología entre la comunidad estudiantil de todo el mundo. Desde el inicio de ISEB, se han desarrollado una serie de iniciativas multinacionales, que incluyen:

- GENSO, una red de estaciones terrestres para satélites de estudiantes, que actualmente está siendo liderada por ESA, expandiendo dramáticamente la cobertura en comunicación entre operadores y satélites de estudiantes.
- Programación para estudiantes en conferencias espaciales internacionales, COSPAR e IAC en particular, que ofrece a los estudiantes la oportunidad de reunirse con representantes de alto nivel de agencias espaciales y la industria espacial y establecer contactos con sus pares de todo el mundo.
- Oportunidades especiales para que los estudiantes socios de ISEB asistan al programa de pasantías de la Academia de la NASA, una pasantía prestigiosa de 10 semanas en centros seleccionados de la NASA.
- Delta Researcher Schools, un programa de NASA/ESA en escuelas primarias holandesas seleccionadas, brinda a educadores y estudiantes oportunidades para participar en oportunidades únicas de aprendizaje espacial, como desarrollo profesional en los Centros de la NASA y discusiones con astronautas y cosmonautas a bordo de la Estación Espacial Internacional.
- ***Oportunidad****: La Agencia Espacial Mexicana (AEM) ya es miembro activo de ISEB siendo el primer y aun único país latinoamericano integrado a dicho Comité. El ISEB permite ahora que organizaciones distintas de las agencias espaciales que estén involucradas en actividades educativas relacionadas con el espacio se puedan unir ella como Miembros Asociados, lo que amplía el espectro de posibilidades de participación a muchas más organizaciones educativas y de promoción espacial. Asimismo, ampliar la participación a más*

agencias espaciales latinoamericanas acompañando a la AEM potenciaría el rol regional en la organización.

Scientix

Ámbito europeo. Orientado a educadores, estudiantes, legisladores, administración pública.

www.scientix.eu

Scientix es la comunidad para la enseñanza de las ciencias en Europa. Promueve y respalda la colaboración entre docentes, investigadores del ámbito de la enseñanza, legisladores y otros profesionales de la docencia de materias STEM a nivel europeo. Scientix nace como una iniciativa de la Comisión Europea y desde su creación, la coordinación ha corrido a cargo de European Schoolnet, un consorcio de 30 ministerios de educación con sede en Bruselas. Esta colaboración es un factor determinante para innovar en la enseñanza y el aprendizaje, así como para reforzar la colaboración paneuropea de centros educativos y docentes.

En relación con educación sobre Espacio, Scientix dispone de contenidos en su **Scientix Space Education**: blog.scientix.eu/tag/space-education/

En España, el Punto de Contacto Nacional de Scientix es el Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado (INTEF), que forma parte del Ministerio de Educación y Formación Profesional de España (MEFP). INTEF trabaja en colaboración con todas las unidades de desarrollo profesional en las 17 regiones autónomas españolas, así como con organizaciones sin fines de lucro, gubernamentales o privadas que ofrecen cursos a nivel nacional e internacional. Proporciona recursos de acceso abierto a educadores de todos los niveles y en todas las áreas curriculares. Además, promueve la creación de redes profesionales y los intercambios educativos a través de becas, redes sociales, portales web y comunidades en línea.

***Oportunidad**: Otro modelo que podría aplicarse desde la futura agencia espacial latinoamericana y caribe, ALCE, adaptada a las necesidades y la propia oferta educativa especializada regional. Acuerdos de colaboración*

podrían establecerse con Scientix y la European SchoolNet. Hay contenidos en español.

NASA STEM Engagement strategy 2020-2023

Ámbito EE. UU. Orientado a educadores, estudiantes, tomadores de decisión, medios.

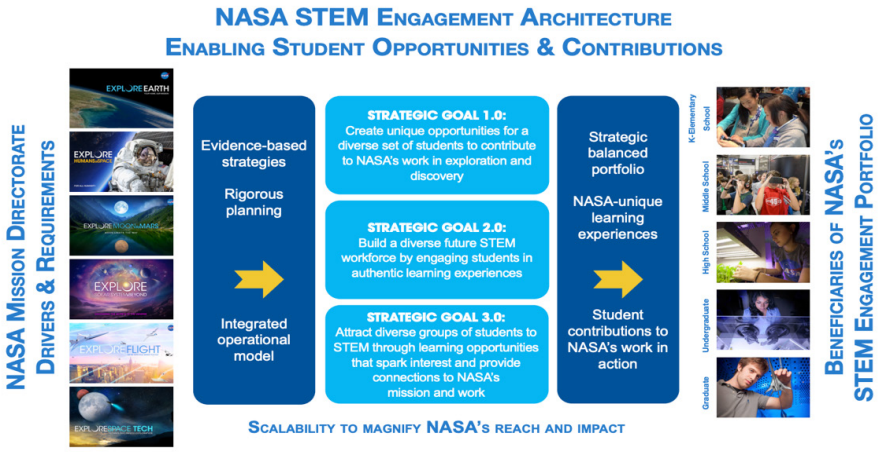
www.nasa.gov/stem

NASA STEM Engagement ofrece herramientas y oportunidades de aprendizaje para estudiantes de 4 a 12 años y sus educadores, con el propósito de despertar el interés en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) y establecer conexiones con las misiones y carreras de la NASA. Su conjunto diversificado de oportunidades, actividades y productos abarca una amplia gama, que incluye pasantías, becas, experiencias de aprendizaje estudiantil (como desafíos, competencias y otras actividades), educación informal y programas extracurriculares, recursos, herramientas y plataformas educativas, apoyo a educadores, así como subvenciones competitivas para instituciones educativas destinadas a la investigación y desarrollo, y apoyo institucional.

La NASA ha establecido estas estrategias para ampliar la participación de estudiantes en STEM con el objetivo de aumentar la diversidad, la equidad y la inclusión en estos campos. Aunque ha habido un incremento en la cantidad de mujeres y minorías subrepresentadas que obtienen títulos en STEM en diversas áreas de la ciencia e ingeniería en la última década, aún persiste una representación significativamente baja en campos críticos para la NASA, como la ingeniería, las ciencias de la computación y las matemáticas.

Con el propósito de alcanzar estos objetivos, NASA STEM Engagement trabaja para aumentar la participación de estudiantes de primaria y secundaria en proyectos de la NASA, mejorar la educación superior, apoyar a comunidades subrepresentadas, fortalecer la educación en línea y ampliar la contribución de la NASA a la educación informal. Como resultado, se espera que surja una generación preparada para abordar desafíos y contribuir al avance de la innovación en Estados Unidos.

Figura 15. *Arquitectura de la estrategia NASA STEM Engagement*



Fuente: NASA, 2019

***Oportunidad**: Ejemplo replicable de estrategia STEM para un ecosistema espacial nacional.*

Space Foundation – STEM Education

Ámbito EE. UU. Orientado a educadores, estudiantes, emprendedores, profesionales, medios.

www.spacefoundation.org/what-we-do/education/

La Space Foundation, una organización sin fines de lucro fundada en 1983, se establece como una puerta de entrada a la educación, la información y la colaboración en el ámbito de la exploración espacial y las industrias relacionadas con el espacio que configuran el ecosistema espacial global. Además, es reconocida como el primer y único centro y museo dedicado al espacio, la ciencia y la tecnología en la región de Colorado Springs. Este destino interactivo, centrado en la educación, promueve las disciplinas STEM (Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) en el emocionante contexto de la exploración, desarrollo y utilización del espacio.

La Space Foundation, impulsada por un modelo de asociación, opera tres divisiones que unen a todas las partes interesadas a lo largo del espectro

(empresas, gobierno, educación y comunidades locales) mediante membresías corporativas, patrocinios, recaudación de fondos y subvenciones. El Centro para la Innovación y la Educación de la Space Foundation ofrece una amplia gama de recursos y programas educativos STEAM (Ciencias, Tecnología, Ingeniería, Arte y Matemáticas) inspirados en el espacio. Entre estos se incluyen planes de estudio y lecciones STEM, programas especiales diseñados para niñas, campamentos espaciales, formación para docentes y programas virtuales.

***Oportunidad**: Ejemplo replicable de fundación promotora de STEM.*

Jornadas 'STEM a l'espai'

https://projectes.xtec.cat/steamcat/general/jornada-stem-a-lespai/

Ámbito Cataluña (España). Orientado a educadores de STEAM, estudiantes, profesionales.

Jornada de ponencias y talleres orientada a educadores STEM de la región de Cataluña, consta además de una feria de proyectos realizados por alumnos. Se desarrolla cada dos años y durante la Semana Mundial del Espacio, en las instalaciones del Campus Aeroespacial de Barcelona. En formato presencial y online, reúne a más de 200 profesores y profesionales de la educación.

Figura 16.
Taller sobre drones DIY para educadores STEM

Fuente: Campus Aeroespacial, 2022

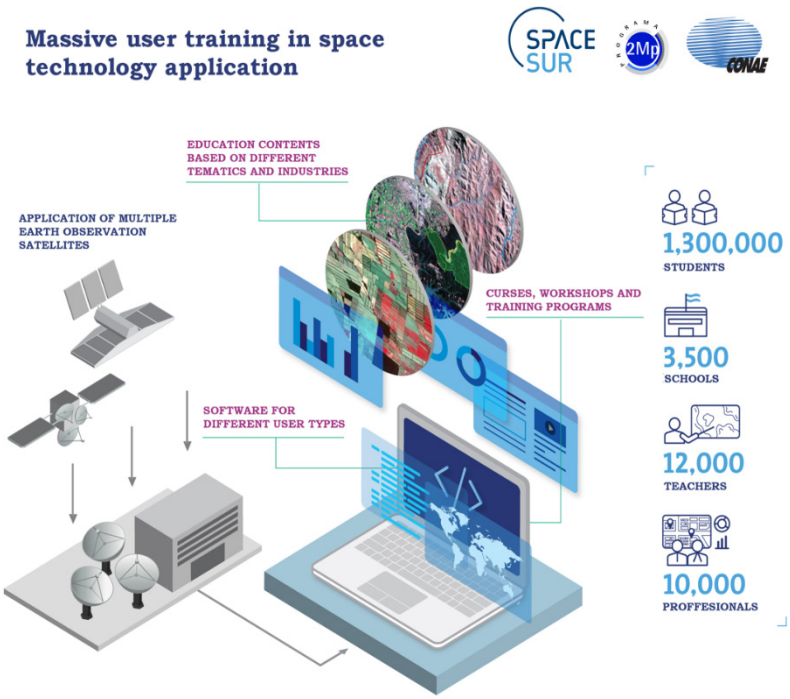
***Oportunidad**: Ejemplo fácilmente replicable de capacitación STEM para educadores.*

Programa "2Mp" Argentina

Ámbito Argentina. Orientado a educadores y estudiantes de primaria, secundaria y universitarios.

www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/unidad-educacion/acerca-de/programa-2mp

Figura 17.
Estructura y resultados del Programa 2Mp



Fuente: Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)

El Programa 2Mp es una iniciativa educativa ambiciosa que surgió en Argentina en el contexto del Plan Espacial Nacional 2004-2015. Su nombre se deriva del objetivo de alcanzar a dos millones de niños y jóvenes, de ahí la sigla 2Mp. Este programa es gestionado por la Unidad de Educación de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Nace con un objetivo estratégico claro: asegurar que todos los niños y jóvenes argentinos

adquieran conocimientos, accedan y utilicen la tecnología satelital, y sean capaces de aplicarla en su vida cotidiana y futuras carreras profesionales. Como resultado, las escuelas que participan en el Programa 2Mp son instituciones interesadas en la integración de la tecnología satelital en sus métodos de enseñanza y en proporcionar acceso a tecnologías innovadoras para mejorar el proceso de aprendizaje.

Para alcanzar este objetivo, se decidió llevar adelante la inclusión de la tecnología satelital en el Sistema Educativo Nacional a través del desarrollo de una serie de actividades orientadas a:

- Mejorar la enseñanza considerando a la tecnología satelital como una herramienta potente para ampliar el alcance de los conocimientos.
- Brindar a los alumnos tecnologías innovadoras que les permitan mejorar sus aprendizajes y favorecer su inserción en el sector productivo nacional.
- Democratizar el acceso al conocimiento.

A lo largo de 13 años de despliegue, el alcance de las actividades del Programa ha conseguido llegar a 3.344 “Escuelas 2Mp”, capacitar a 11.748 docentes, y capacitar a 1.300.000 estudiantes.

Figura 18.
Estudiante con la aplicación 2Mp

Fuente: Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

La clave de su éxito está basada en una estrategia desarrollada en tres líneas principales de acción:

1. **Materiales educativos y Software para el manejo y procesamiento de información satelital**

Desarrollo de materiales educativos: El Programa 2Mp genera materiales educativos adaptados a las necesidades del Software 2Mp a partir de la selección y preparación de información satelital relevante. El propósito es crear las condiciones adecuadas para que los usuarios puedan incorporarlos en sus propuestas de enseñanza. Los materiales desarrollados por el Programa 2Mp están disponibles a través de un Portal Web. Este portal no solo proporciona materiales educativos, sino que también se convierte en un recurso de divulgación sobre la tecnología satelital, con diversas fuentes de información en constante actualización.

Desarrollo de software geoespacial: El Software 2Mp consta de dos herramientas: el 2Mp, que maneja información satelital combinada con otras fuentes, y el SoPI, diseñado para el procesamiento digital de imágenes de sensores remotos. El Software 2Mp está concebido como un entorno en el que los docentes pueden crear y desarrollar sus propias estrategias de enseñanza. Proporciona un espacio en el que ellos y sus alumnos pueden interactuar con una amplia variedad de fuentes de información, enriquecidas por la inclusión de imágenes satelitales. Por su parte, el SoPI se utiliza para el procesamiento digital de imágenes de sensores remotos en un entorno de trabajo tipo SIG (Sistema de Información Geográfica) orientado a proyectos. Desde el punto de vista educativo, el SoPI está diseñado para trabajar con estudiantes de secundaria y también puede ser utilizado a nivel profesional.

2. **Formación docente y articulación con instituciones replicadoras:**

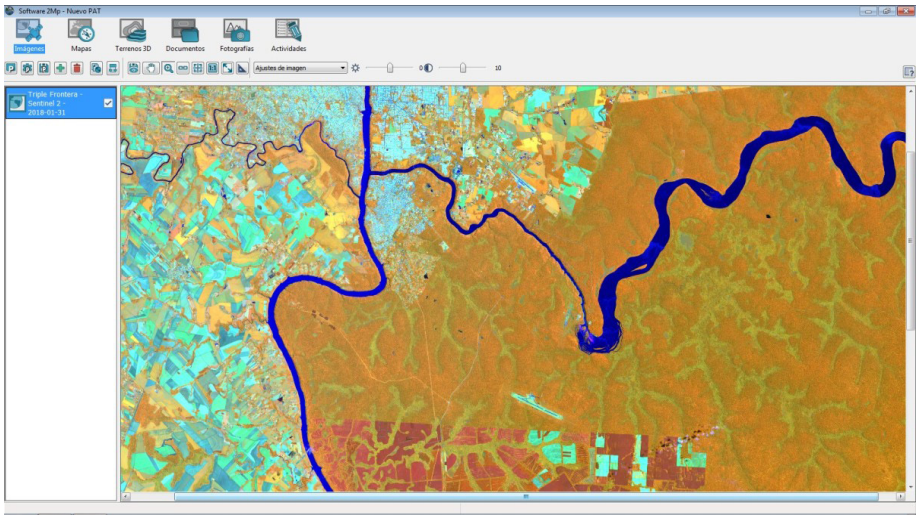
Las instituciones replicadoras tienen como objetivo transferir las experiencias desarrolladas a nuevos actores que puedan gradualmente implementar la tecnología satelital en sus prácticas educativas. En este contexto, se ofrecen cursos de formación docente en modalidad presencial y virtual, seminarios y programas de formación de capacitadores.

3. Programa 2Mp línea agro

Este programa se enfoca en la integración de la tecnología satelital en las escuelas secundarias agrotécnicas, aprovechando el gran potencial de estas herramientas para respaldar la toma de decisiones en la producción agropecuaria. Esto es especialmente relevante en el contexto de desarrollo de la misión SAOCOM de observación de la Tierra, que utiliza tecnología de radar.

Figura 19.

Ejemplo educativo sobre la Triple Frontera: Argentina, Paraguay y Brasil, Sentinel2, 31 de enero 2018



Fuente: Elaboración propia

***Oportunidad**: El Programa 2Mp es una iniciativa única en su tipo, innovadora y pionera al utilizar recursos espaciales como herramienta para la enseñanza de las materias tradicionales. Utiliza el atractivo natural de la tecnología espacial como vínculo para el aprendizaje del tema principal. Con un resultado a largo plazo en el que los estudiantes habrán adoptado como normal el uso de estas nuevas tecnologías en sus estudios y trabajos futuros. El programa no es una tarea ni sencilla ni barata, requiere de la participación de una diversidad de especialidades trabajando coordinadamente y de la aceptación de la cadena de enseñanza. Sin embargo, por su elevado impacto y éxito de despliegue resulta una oportunidad muy asequible para cualquier*

país y región aun con limitados recursos. La disponibilidad actual de acceso escolar a Internet generalizado lo facilitaría aun más, con la ventaja de un servicio en la nube. El 2Mp en su despliegue no disponía de esta facilidad.

Instituto de Altos Estudios Espaciales 'Mario Gulich'

Ámbito Argentina e Internacional. Orientado a educadores y estudiantes universitarios.

ig.conae.unc.edu.ar

El Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich" fue creado en 2001 por la CONAE y la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina), con el objetivo de "formar Recursos Humanos de nivel de postgrado del más alto nivel en teorías, conceptos y técnicas de las ciencias y las tecnologías aplicadas a la teledetección de la tierra, los océanos y la atmosfera". Esto se concibe mediante actividades de Investigación, desarrollo, innovación y transferencia de tecnología, bajo los lineamientos del plan espacial nacional.

Actualmente las actividades del Instituto Gulich están centradas en las siguientes áreas de aplicación:

- Desarrollos innovadores para aplicaciones en emergencias naturales y antrópicas (ciclo de información espacial para la gestión de emergencias).
- Desarrollos innovadores en el área de epidemiología panorámica (determinación de zonas de riesgo de enfermedades endémicas).

En ambas áreas se implementan programas multidisciplinarios entre diversas instituciones que utilizan datos espaciales, modelística y herramientas de Sistemas de Información Geográfica. Además de la Maestría en aplicaciones espaciales de alerta y respuesta temprana a emergencias (AEARTE), el Instituto Gulich dicta otros cursos como sobre el uso de herramientas de software para aplicaciones de emergencias, Radar de Apertura Sintética, Procesamiento de Imágenes, y otros.

Para grupos internacionales se ha desarrollado un curso internacional de la WMO (Organización Meteorológica Mundial).

***Oportunidad**: Por su larga trayectoria y la experiencia acumulada por sus docentes relacionados con la decana agencia CONAE, el Instituto Gulich resulta un centro de formación interdisciplinaria en tecnologías geoespaciales de excelencia y referencia internacional, especialmente en Latinoamérica. Es así como llega a estudiantes de Colombia, Perú´, España, México, Chile, Ecuador, Estados Unidos y Bolivia, entre otros. Su foco especializado en las necesidades de la región lo hace atractivo y viable para ampliar su alcance a más estudiantes e investigadores latinoamericanos y caribeños.*

4. DISCUSIÓN

Se ha presentado aquí un compendio de diferentes casos exitosos de promoción espacial en general y de educación y capacitación espacial desarrollados por actores destacados tanto de alcance internacional, regional, como de algunos países concretos.

Una selección a criterio del autor, que no necesariamente es completa ni pretende reflejar todos los criterios posibles de excelencia y éxito, sino que son aquellos que por su notoriedad global y estrategia de despliegue podrían ser de interés desde la perspectiva del ecosistema espacial latinoamericano y caribeño.

Por ejemplo, no se incluye a organizaciones como UNOOSA y COPUOS que por su propia relevancia y enlace obligado con las organizaciones gubernamentales no necesitan una particular mención.

Se ha intentado en cambio, poner en relieve una colección de iniciativas que por llevar un adelanto comparado de 10-15 años en sus países y ámbitos de aplicación, su madurez sirve como modelo de mejores prácticas. Unas prácticas que ahora se pueden demostrar como muy eficaces al estar consiguiendo importantes objetivos en sus poblaciones como un mayor conocimiento generalizado sobre las ventajas del espacio, en sus estudiantes un aumento en el interés de los por las carreras STEAM, una disponibilidad de capital público y privado interesado en el NewSpace, y una multiplicidad de aplicaciones y servicios que esas sociedades ya están aprovechando y alimentando a su PIB.

En otros casos, especialmente en organizaciones y en eventos espaciales internacionales, se insiste en la conveniencia de formar parte de ellas de forma

activa, con la intención estratégica de defender allí la posición de la región, como para descubrir oportunidades con anticipación.

Se podrá discutir sobre la ventaja competitiva de muchos casos que podrían estar consiguiendo su éxito gracias a importantes ayudas o soporte económico público o privado, o gracias a que se encuentran en un ecosistema vigoroso y pujante de un mercado más maduro que lo exige y lo realimenta. Esto es bien cierto, pero demuestra que se ha llegado ahora a un estadio avanzado que comenzó también un día desde cero, y cuando su mercado no había despegado aún. Visionarios de entonces decidieron generar los primeros movimientos y actividades en este camino complicado y muchas veces de resultados inciertos a corto plazo, como es el de la promoción espacial.

En otros países, los menos avanzados, países emergentes en espacio, o como se les denomina en inglés 'space-faring countries', se encuentran ahora por detrás en el tiempo en esta evolución. Un retraso es distinto a una posición en la que aún siquiera se ha decidido a entrar en esta carrera. Estos sí, podrán enfrentar pronto un problema de fuerte dependencia y de soberanía tecnológica que seguramente no desearían. Por ello, la preocupación esencial no debería de estar tanto relacionada con el grado de retraso en el roadmap de promoción y educación espacial de un país o región, sino en disponer efectivamente de ese roadmap estratégico y asegurar su activación.

Muchos países emergentes han apreciado este importante reto y han puesto en marcha sus propios planes, estableciendo sus propias agencias espaciales, capacitando a sus científicos, y comenzando a apartar presupuesto público para estos fines de progreso tecnológico y económico.

¿Por qué no aprender de quienes llevan cierta ventaja? Descubriendo, analizando, adaptando sus ejemplos a la realidad local de la región. Asociándose con ellos, compartiendo visiones, facilitando mutuamente el acceso a sus respectivos mercados, intercambiando científicos y estudiantes, y aprovechando determinados recursos propios únicos (como determinadas posiciones geográficas en el planeta) que los mercados avanzados aprecian.

Así, países como Pakistán o Paraguay, están consiguiendo un avance muy rápido saltando algunos pasos que otros han tenido que transitar. Con limitados recursos, aprovechando mucho de lo que se puede conseguir con

directivos y personal motivado, más algunos viajes y pasión por el espacio. Es notable en estos casos el foco en las necesidades reales de su país, sin pretender, al menos en primer lugar, entrar en el mercado competitivo mundial con los grandes jugadores. Sino conseguir un pleno dominio de estas tecnologías en beneficio de sus sociedades, y con recursos plenamente adaptados al perfil de sus fuerzas productivas y a la solución de sus problemas.

Esta muestra de resultados, aunque limitada, pretende reflejar cómo la promoción y educación espacial resultan claves para la fundación, evolución y madurez de un ecosistema espacial en un país, región o a nivel global. Algunos logran esto después de un largo recorrido y con apoyo continuo, mientras que otros, con menos recursos y comenzando más tarde, demuestran beneficios tempranos, principalmente gracias a sus directores y estrategias efectivas.

Como hallazgo particular, el mencionado "Programa educativo 2Mp" ha apostado por desplegar una educación interconectada con las aplicaciones espaciales. En este caso, no se 'educa sobre el espacio', sino que se 'educa con el espacio'. Este programa merecerá un seguimiento especial a largo plazo, con mediciones de su impacto en estudiantes y su entorno a lo largo del tiempo, permitiendo así verificar su eficacia de manera científica.

En consecuencia, se puede interpretar que una apuesta decidida por la promoción y la educación espacial, como garantías del ecosistema espacial latinoamericano, acelerará la madurez del mercado en toda su cadena de valor en la región.

5. CONCLUSIONES

Se ha intentado poner en relieve ejemplos, oportunidades y mecanismos útiles para la promoción y educación espacial que podrían resultar beneficiosos para acelerar el progreso y la madurez de un ecosistema espacial emergente en la región latinoamericana y caribeña.

A partir de los condicionantes regionales y puntos de partida expresados en la introducción, con la selección de casos y en sus detalles, se ha pretendido despertar interés en aquellos docentes, investigadores, estudiantes,

profesionales, empresarios, funcionarios públicos y otros tomadores de decisiones. Este interés debe entenderse como una oportunidad para reconocer que, a pesar de las limitaciones del entorno, puede existir una vía de mejora o el comienzo de una iniciativa similar a las expuestas. En otros casos, la oportunidad ineludible de asociarse y participar activamente, dada su responsabilidad en el ecosistema espacial en el que se encuentran.

De este modo, se busca que el lector reconozca que muchos de los casos de éxito mostrados aquí han nacido y se han desarrollado con bajo coste, utilizando recursos gratuitos basados en la nube, con alguna ayuda, intercambios de intereses comunes y, en definitiva, mediante una variedad de mecanismos accesibles o reproducibles también en regiones con recursos limitados.

Los ejemplos previamente expuestos muestran cómo países y organizaciones globales que lideran la promoción y educación espacial logran movilizar cada año a miles de participantes de toda la cadena de valor espacial, desde el público en general hasta reuniones científicas, económicas y políticas de alto nivel.

Con los ejemplos analizados y la aplicación de las recomendaciones y adaptaciones necesarias, se puede entrever que el ejercicio motivado de la promoción y educación espacial, desarrollado con estrategia y liderazgo corporativo, puede dinamizar el emergente mercado espacial NewSpace en beneficio de sus sociedades.

Los casos analizados sugieren una conclusión esperanzadora para la región: para lograr el éxito en la promoción y la educación espacial, así como en la capacitación de sus aplicaciones, no es imprescindible disponer de importantes recursos ni de complejas instalaciones. Sin embargo, es esencial tener en cuenta la perspectiva legal y ética, así como la sostenibilidad tanto en la Tierra como en el espacio. En definitiva, contribuyendo con las tecnologías y aplicaciones espaciales a la mejora de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, para los que se ha demostrado su impacto beneficioso en todo el mundo.

Con la promoción espacial, con la educación espacial y con la educación 'con espacio'.

6. REFERENCIAS

Andries, A.; Morse, S.; Murphy, R.J.; Lynch, J.; Woolliams, E.R. (2019). Seeing Sustainability from Space: Using Earth Observation Data to Populate the UN Sustainable Development Goal Indicators. Sustainability, 11, 5062. https://doi.org/10.3390/su11185062

Baumgart et al. Sustainable Earth (2021) 4:6. https://doi.org/10.1186/s42055-021-00045-6

Comisión Europea, Dirección General de Empresa e Industria, Leysen, S., All u need is space, Oficina de Publicaciones, (2013), https://data.europa.eu/doi/10.2769/68971

Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). (s.f.). Programa "2Mp" Argentina https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/unidad-educacion/acerca-de/programa-2mp

Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). (s.f.). Programa 2Mp. "La tecnología satelital en la enseñanza: una propuesta para ampliar el alcance de los conocimientos" https://docplayer.es/34089412-Comision-nacional-de-actividades-espaciales-conae-programa-2mp.html

Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). (s.f.). Software "2Mp" Argentina https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/unidad-educacion/software/2mp

Ecsite. (s.f.). The European Network of Science Centres and Museums. https://www.ecsite.eu/about

ESA ESERO - European Space Education Resource Office. (2014). https://www.esa.int/Education/Teachers_Corner/European_Space_Education_Resource_Office

ESA ESERO. Cómo planear y realizar tu propia semana espacial (2019). https://esero.es/wp-content/uploads/2021/08/como-planear-tu-propia-semana-espacial.pdf

ESA ESERO. Cuaderno de Vocaciones Científicas (2020). https://esero.es/wp-content/uploads/2020/05/Cuaderno_Vocaciones_Cientificas.pdf

ESA ESTEC. (s.f.). Noordwijk, The Netherlands. https://isd.esa.int

ESA Publications. (2004). Science Fiction, Technology Fact. https://www.esa.int/esapub/br/br205/br205.pdf

ESA. (s.f.). ESA Kids. https://www.esa.int/kids/es/Home

ESA. (s.f.). Fly your satellite. https://www.esa.int/Education/CubeSats_-_Fly_Your_Satellite/

ESA. Industry Space Days, (2022) 28-29 sept. de 2022. https://isd.esa.int

ESA. (s.f.). Newcomers Earth Observation Guide. https://business.esa.int/newcomers-earth-observation-guide

ESA. (s.f.). Open Discovery Ideas Channel. https://ideas.esa.int

ESA. Teacher Workshops, (2017). Convocatoria de participación. https://xtec.gencat.cat/ca/agenda/Convocatoria-de-participacio-a-Esa-Teacher-Workshops

ESA. Teachers' Corner (Europa). (s.f.). https://www.esa.int/Education/Teachers_Corner

EU Space Week 2022, (2022). 3-6 oct. de 2022. https://www.euspaceweek.eu

IAC2022 Paris. (2022) 18-22 September https://iac2022.org/

IAF International Astronautical Federation. https://www.iafastro.org

International Space Education Board (ISEB) (s.f.). iseb.space

International Space University (ISU). (s.f.). https://www.isunet.edu

Naciones Unidas. (2018). European Global Navigation Satellite System and Copernicus: Supporting the Sustainable Development Goals. https://digitallibrary.un.org/record/3833375?ln=es

NASA. (s.f). NASA STEM Engagement. https://www.nasa.gov/stem

NASA. (2020). NASA Strategy for Science, Technology, Engineering and Mathematics (STEM) Engagement 2020-2023. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa-strategy-for-stem-2020-23-508.pdf

National center of GIS and Space Applications, Institute of Space Technology. Pakistan. (s.f.). https://ncgsa.org.pk

Natucci, Stella Maris y Rodríguez, Mónica Gabriela (2013). El programa 2MP en la enseñanza: un ejemplo de aplicación. I Jornadas Norpatagónicas

de Experiencias Educativas en Ciencias Sociales para la Escuela Secundaria. II Jornadas Provinciales de Geografía, Ciencias Sociales y Educación (Neuquén). Instituto de Formación Docente Continua - Luis Beltrán, Luis Beltrán, Río Negro. https://www.aacademica.org/i.jornadas.norpatagonicas/13

Presidencia de la Nación. El sector espacial argentino. Instituciones, empresas y desafíos del Sector. (2014) https://1library.co/document/download/zw85gxvz?page=1

Scientix Space Education. (s.f.). blog.scientix.eu/tag/space-education/

Secure World Foundation. Nuevos Actores en el Espacio (2021).. https://swfound.org/handbook/

SUPARCO. Beginners' Guide to Space (2015). https://sead.pk/Content/assets/downloads/guide/space-booklet-english-2015.pdf

The White House: Vice President Harris Announces Commitments to Inspire, Prepare, and Employ the Space Workforce, (2022): https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/09/09/fact-sheet-vice-president-harris-announces-commitments-to-inspire-prepare-and-employ-the-space-workforce/

Timiebi Aganaba-Jeanty, (2017) World Space Week: A Platform With Endless Possibilities . 68th International Astronautical Congress IAC2017 E1 Space Education and Outreach Symposium. Session 7. New Worlds - Non-Traditional Space Education and Outreach. https://iafastro.directory/iac/paper/id/39519/summary/

US Bureau of Labor Statistics. (2014). STEM 101: intro to tomorrow's jobs. http://hdl.voced.edu.au/10707/440271

World Satellite Business Week. (2022). (WSBW22).12-16 sept 2022

World Space Week Association. (2021). Informe Anual (2021) https://www.worldspaceweek.org/wp-content/uploads/WSW_Annual_Report_2021.pdf

World Space Week Pakistan. (s.f.). https://wsw.sead.pk

World Space Week Pakistan. (2022). Manual práctico para la organización de actividades WSW. https://wsw.sead.pk/Content/assets/downloads/World-Space-Week-Guidebook-2022.pdf

Zen Pencils - Cartoon quotes from inspirational folks. (2013). http://www.zenpencils.com/comic/106-chris-hadfield-an-astronauts-advice/

CAPÍTULO 9

ALGORITMO PARA FILTRADO DE DATOS OBTENIDOS POR MEDIO DEL SISTEMA ADS-B DE LAS AERONAVES

Cristian Lozano Tafur
https://orcid.org/0000-0002-6653-6188
clozanot@libertadores.edu.co
Fundación Universitaria Los Libertadores

Pedro Fernando Melo Daza
https://orcid.org/0000-0002-6653-6188
pedromelodaza@cedoc.edu.co
Escuela de Aviación del Ejército - ESAVE

Juan Carlos Daza Rincón
https://orcid.org/0000-0002-5277-7837
jcdazar01@libertadores.edu.co
Fundación Universitaria Los Libertadores

Luis Leonardo Valencia Castañeda
https://orcid.org/0000-0003-4014-8774
llvalenciac@libertadores.edu.co
Fundación Universitaria Los Libertadores

Rafael Enrique Ucros Rojas
https://orcid.org/0000-0001-5125-4252
reucrosr@libertadores.edu.co
Fundación Universitaria Los Libertadores

Resumen

En este documento, se busca ilustrar la problemática, la metodología desarrollada y los resultados obtenidos por estudiantes de la Fundación Universitaria Los Libertadores adscritos al semillero de investigación AeroSignal, en conjunto con la Escuela de Aviación del Ejército. El proyecto tiene como objetivo principal el desarrollo de un algoritmo para el filtrado de datos obtenidos a través del sistema ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) de las aeronaves. Se pretende implementar un método para la obtención independiente de datos ADS-B, la decodificación de la señal entregada por este sistema y, además, el desarrollo de un algoritmo que filtre los datos obtenidos por el sistema ADS-B. El resultado será un conjunto de datos que cumplan con ciertos parámetros previamente establecidos. Una vez que los datos se procesen con el algoritmo, se llevarán a cabo pruebas para verificar que estén dentro de los rangos definidos previamente. Además, se brindará la posibilidad de representar gráficamente los datos para facilitar su comprensión y análisis. La intención de este proyecto es que, una vez finalizado con éxito, estos datos puedan utilizarse en futuros análisis, como el estudio de densidades de tráfico terrestre en el Aeropuerto Internacional El Dorado Luis Carlos Galán Sarmiento, el análisis de demoras en las operaciones aéreas y otras investigaciones que tengan como base los diversos datos que se pueden obtener a través del sistema ADS-B.

Palabras clave: ADS-B, aeronaves, aeropuerto, algoritmo, decodificar, filtrado.

Abstract. This document seeks to illustrate the problems, methodology developed and results obtained by students of the Fundación Universitaria Los Libertadores attached to the research group AeroSignal in conjunction with Escuela de Aviación del Ejército where the development of the project Algorithm for filtering data obtained through the ADS-B system (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast) of aircraft is proposed in which the implementation of a method for obtaining ADS-B data independently is sought, The respective decoding of the signal delivered by this system, and added to this the development of an algorithm which filters the data obtained by the ADS-B system resulting in data that are within certain parameters

previously established, Once the data has been processed with the algorithm, the algorithm will perform the necessary tests to ensure that the data complies with the previously defined ranges, with the possibility of graphing the data for a better understanding and analysis, with the intention that, once this project has been successfully completed, the data can be used for future analysis, These data can be used for future analyses such as the analysis of ground traffic densities at El Dorado Luis Carlos Galán Sarmiento international airport, analysis of delays in air operations and other analyses based on the different data that can be obtained by means of the ADS-B system.

Keywords: ADS-B, aircraft, airport, algorithm, decode, filtering.

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento del transporte aéreo, como se evidencia en la Figura 1, se encuentra en recuperación luego de que la aviación hubiera sido seriamente afectada por la pandemia COVID-19. Según la IATA (2020), en el 2020 se estimaba que la aviación tardaría entre dos a cuatro años para recuperar los niveles de operación de aeronaves y transporte de pasajeros con los que se contaba en el 2019. Debido al rápido desarrollo de las vacunas, permitió que el transporte aéreo de pasajeros, tanto nacional como internacional, iniciara a operar casi en su máxima capacidad. Los niveles de operación aérea tuvieron una recuperación más rápida de la esperada. En Colombia, para el período comprendido entre el 1 de septiembre de 2020 al 30 de enero de 2021, se movilizaron 6,058,790 de pasajeros (Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil, 2021).

Figura 1.

Comportamiento del número de vuelos desde 2004 hasta 2021 (Number of Flights Worldwide in 2022/2023: Passenger Traffic, Behaviors, and Revenue, 2021)

Así que, con la rápida recuperación y crecimiento de la aviación, el análisis y optimización del espacio aéreo es una parte esencial en las operaciones aéreas y los trabajos en ingeniería. Con el propósito de optimizar las operaciones aéreas y mejorar la seguridad se han desarrollado distintos proyectos tales como NextGen y SESAR. Un elemento en común de estos proyectos es el ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast). Este sistema permite que las aeronaves compartan datos como el número del vuelo, fecha y hora, posición, velocidad y rumbo. Los datos generados por el ADS-B son enviados por un equipo instalado en la aeronave, y su difusión es libre y continua, por lo tanto, cualquier antena en la misma frecuencia los puede recibir.

El sistema ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast) es definido como un sistema de vigilancia dependiente automática de radiodifusión por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Este es un sistema que permite transmitir información periódicamente sin requerir intervención alguna de los pilotos o un operador, y dicha información estaría disponible para cualquiera que cuente con los equipos de recepción adecuada (Organización de Aviación Civil Internacional, 2021). El ADS-B es altamente relevante en la facilitación de la vigilancia aérea global debido a sus características distintivas. Estas incluyen una cobertura más amplia, una relación señal/ruido menor y una menor diferencia de potencia entre las señales (Zhang, 2018). Además, el sistema puede operar en diversas fases de vuelo, como la aproximación, el aterrizaje, el despegue, el movimiento en superficie y la ruta (Indra, 2015).

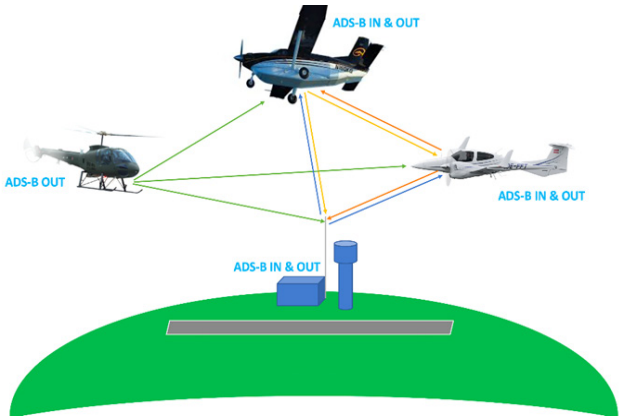
Por medio del sistema ADS-B podemos obtener diferentes datos como el identificador de la aeronave, el identificador del vuelo, la posición, la velocidad, el estado del vuelo, entre otros (Organización de Aviación Civil Internacional, 2021). Este sistema es un sistema dependiente ya que para la obtención de los datos de la aeronave se hace uso de los diferentes sistemas de la aeronave, como el sistema global de navegación por satélite o GNSS (por sus siglas en inglés), y para la obtención de datos como la altitud será necesario el sistema de datos del aire (Sun, 2021). Gracias a todo esto, la Administración Federal de Aviación (FAA), por sus siglas en inglés, pretende realizar el cambio de tecnología radar a ADS-B, ya que esta tecnología es considerada como uno de los grandes avances para el futuro de la gestión de tráfico aéreo (Lange et al., 2019).

Se requieren dos equipos para el funcionamiento del sistema: el primero de ellos dispuesto para la difusión y procesado de los datos provenientes de los diferentes sistemas de la aeronave y otro adecuado para la recepción de las tramas del ADS-B IN, el cual estará posicionado en tierra como recurso para la gestión de tráfico aéreo por parte de los controladores de tráfico (Organización de Aviación Civil Internacional, 2021). Además, este equipo puede estar instalado en las aeronaves, permitiendo la comunicación de algunos datos desde tierra o aeronave a aeronave (Lange et al., 2019).

Para observar de una mejor forma la difusión de la señal dependiendo del equipo que se tenga instalado, se puede ver la Figura 2.

Figura 2.

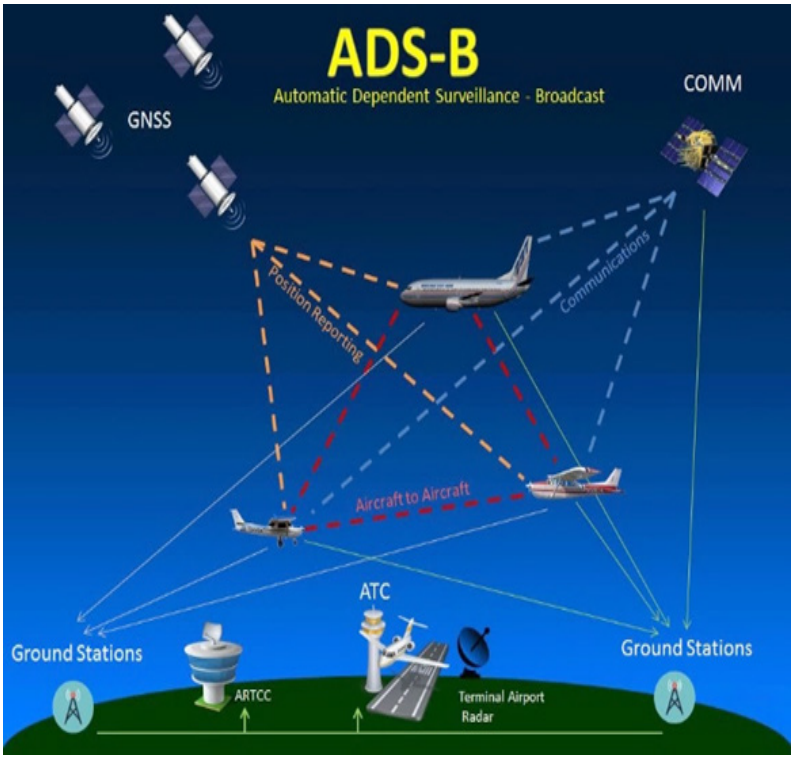
Difusión de datos dependiendo con que equipo ADS-B se disponga (Que es ADS-B IN & OUT?, s/f)



El uso de tecnologías satelitales se encuentra en implementación para la recepción de la señal que proviene de la aeronave y su posterior transmisión a tierra, como se evidencia en la Figura 3. Esto se realiza con el fin de solucionar el problema que presenta el sistema ADS-B, ya que las antenas instaladas en tierra para la recepción de la señal deben contar con rango visual, por lo tanto, la señal puede verse fácilmente interrumpida por diferentes obstáculos, como montañas, edificios, entre otros. Es por esto por lo que con esta solución se espera dar solución a este inconveniente, convirtiendo al sistema ADS-B en un sistema superior a los radares con los que ya cuenta la aviación (Lange et al., 2019).

Figura 3.

Uso de los satélites como medio de apoyo para la transmisión de datos provenientes de los equipos ADS-B de las aeronaves (La Comisión Europea amplía el plazo para el cumplimiento del ADS-B, 2020)



Se han establecido tres tecnologías por parte de la OACI para la codificación y decodificación de datos, cada una de estas opera en las siguientes frecuencias: 1090 MHz, 978 MHz y 136 MHz. Estas tecnologías reciben el nombre de Mode S Extender Squitter (1090ES), Universal Access Transceiver (UAT) y VHF Digital Link Mode 4 (VDL), cada una con su respectiva frecuencia. Cabe señalar que el uso del UAT y VDL se encuentra principalmente localizado en Estados Unidos (Carrasco, 2022; Peña Gallegos & Villareal Hidalgo, 2022). En la Figura 4 y en la Tabla 1 se evidencia la composición de una trama ADS-B, la cual consta de 112 bits separados en 5 bloques (Carrasco, 2022).

Figura 4.
Composición de una trama ADS-B (Sun, 2021)

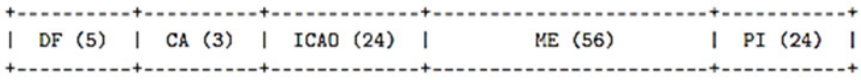


Tabla 1.
Estructura de una trama ADS-B (Sun, 2021)

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

El bloque de mayor tamaño es el cuarto bloque con un tamaño de 56 bits en el cual se encontró la mayor parte de la información proveniente de los diferentes sistemas de la aeronave, para identificar el tipo de información y su contenido, se asocian un numero de bits para cada tipo lo cual se puede evidenciar en la Tabla 2 (Carrasco, 2022).

Tabla 2.

Tipos de mensaje ADS-B (Carrasco, 2022)

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

El primer bloque en la estructura de datos contempla el Downlink Format (DF), compuesto por 5 bits. Esta sección se dedica a identificar el equipo de transmisión de datos empleado, puesto que no todas las aeronaves poseen el mismo tipo de equipo. De hecho, no todas las aeronaves están equipadas con el sistema ADS-B. En este bloque, hay tres posibles valores. Si el bloque tiene un valor de 17, indica que el mensaje ha sido transmitido desde un transpondedor Mode S Extended Squitter. Si el valor es 18, sugiere que el mensaje ha sido transmitido desde un equipo que no es un transpondedor ADS-B. Si no toma ninguno de estos dos valores, se comprende que el mensaje ha sido transmitido a través de otras tecnologías de vigilancia aérea (Sun, 2021).

El segundo bloque encapsula información sobre el nivel del transpondedor de la aeronave, la cual se almacena en 3 bits (Sun, 2021). El código ICAO, también conocido como código hex, es ahora considerado como la identificación de una aeronave, reemplazando al código transpondedor que se asignaba para cada operación por parte del controlador aéreo. Este código, asignado a cada transpondedor de aeronave para toda su vida útil, puede ser reprogramado si se requiere para usos militares o de aviación privada. Dado su papel crucial en las operaciones aéreas para el reconocimiento de las aeronaves, se ubica dentro del tercer bloque, compuesto por 24 bits (Carrasco, 2022; Sun, 2021).

El cuarto bloque, denominado Mensaje, contiene información de diversos sistemas de la aeronave como velocidad, rumbo, latitud, longitud, entre otros. Dentro de este bloque, los primeros 5 bits conforman una sección denominada Type Code (TC), que permite identificar el tipo de contenido que se recibe. Diversos códigos pueden aparecer en esta sección, cada uno correspondiendo a un tipo de información específica (Carrasco, 2022; Sun, 2021). Finalmente, el Código de Redundancia Cíclica (CRC, por sus siglas en inglés), se halla en la última sección de 24 bits, conocida como Parity o Interrogator ID. Este código facilita el control de errores dentro del sistema (Carrasco, 2022).

Las antenas utilizadas para la recepción de datos son, en su mayoría, omnidireccionales y operan en la frecuencia de 1090 MHz. En lo que respecta a los receptores, se está usando cada vez más el Software Defined Radio (SDR), una tecnología que permite la implementación de componentes analógicos en el desarrollo de software para el procesamiento de señales. Entre los receptores más utilizados, destacan los RTL-SDR, originados de los sintonizadores DVB.T (Difusión de video digital – terrestre) USB para televisión basados en el chipset RTL2832U (Carrasco, 2022).

En el caso de Colombia, se ha estipulado el uso del espectro radioeléctrico mediante la frecuencia 1090 MHz para la difusión de datos a través del sistema ADS-B (Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil, 2018).

Según la Resolución 02413 de 2019, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica de Colombia ha establecido que, a partir del 30 de abril de 2022, debe implementarse el ADS-B siguiendo ciertas especificaciones detalladas (Resolución Numero 02413 Por la cual se modifica parcialmente la norma RAC 91 -Reglas Generales de Vuelo y Operación- de Reglamentos Aeronáuticas de Colombia, 2019). Con esta medida, Colombia se suma a la lista de países que regulan el uso de la tecnología ADS-B en su espacio aéreo. Esto permite que los datos puedan ser recopilados de manera independiente y usados para diversos análisis enfocados en la optimización de las operaciones.

Flightradar24, FlightAware, FlightStats son plataformas que sirven para visualizar la información de las aeronaves obtenida a través del sistema ADS-B. Estas plataformas ofrecen de forma gratuita una porción de la información, mientras que el resto debe adquirirse a precios que pueden ser elevados. Por

lo tanto, esto puede plantear un problema para investigaciones que requieran este tipo de información. Es por ello que los estudiantes de la Fundación Universitaria Los Libertadores, en busca de solucionar esta problemática, han implementado su propio sistema para la obtención y decodificación de la información, además de desarrollar un algoritmo que filtre los datos que se encuentren dentro de los parámetros previamente establecidos.

Por medio de los datos ADS-B se han desarrollado diferentes proyectos e investigaciones. Por ejemplo, la detección de aterrizajes frustrados a través de los datos de posicionamiento obtenidos desde datos ADS-B (Proud, 2020), que plantea detectar de forma automática, gracias a los datos ADS-B, los aterrizajes frustrados, para conocer su causa y sus posibles consecuencias. Otra investigación realizada es la predicción de la distancia mínima entre aeronaves a partir de datos ADS-B (Rivas Rincón Antonio, 2020), donde los datos de posicionamiento enviados por las aeronaves permiten predecir la separación mínima entre aeronaves y el momento en que ocurrirá. Esto permite realizar una comparación entre la predicción y los datos reales sobre la separación mínima que presenten las aeronaves que se encuentran sobrevolando una misma área. Finalmente, una investigación muy importante que va de la mano con una de las principales metas de la aviación, como es la búsqueda de que la aviación sea sustentable, evitando el gran impacto en el ambiente, es la investigación acerca de un método para calcular el consumo de combustible y las emisiones de las operaciones de vuelo a partir de las trayectorias ADS-B (Filippone et al., 2021), donde se busca predecir el consumo de combustible y las respectivas emisiones producidas por 23 vuelos que salen del aeropuerto internacional de Nanjing Lukou, el principal aeropuerto de la ciudad de Nankín, capital de la provincia de Jiangsu, en China.

El propósito principal de este proyecto es recolectar los datos de ADS-B provenientes de aeronaves que operan dentro del espacio aéreo de la ciudad de Bogotá, incluyendo específicamente las que realizan operaciones en el Aeropuerto Internacional El Dorado Luis Carlos Galán Sarmiento, identificado con el código OACI SKBO. El proyecto se pone en marcha con la implementación de un algoritmo que nos permitirá filtrar y visualizar los datos de manera geolocalizada en un espacio geográfico que se encuentra claramente delimitado por unas coordenadas y condiciones específicas previamente definidas.

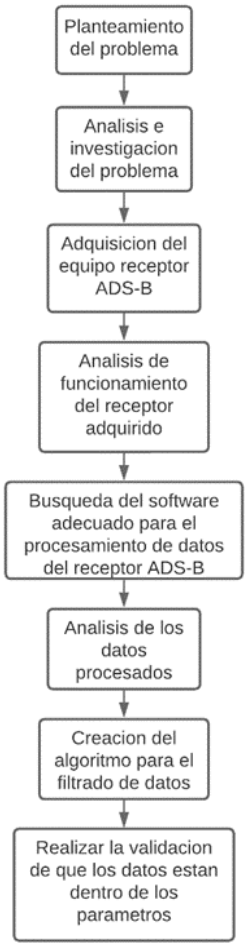
2. METODOLOGÍA

La metodología puede ser vista como un conjunto integrado de técnicas y métodos para abordar sistemáticamente cada actividad del ciclo de vida de un proyecto de desarrollo. Es un proceso de software completo y detallado *(Maida & Pacienzia, 2015)*. En particular, la metodología de desarrollo de software es un enfoque sistemático para la gestión y administración de un proyecto, aumentando su probabilidad de éxito.

En este contexto, las metodologías tradicionales, como la metodología waterfall, se centran en una documentación exhaustiva, planificación y control riguroso, y la definición de un plan de trabajo en la fase inicial del desarrollo del proyecto. Esta metodología, en la cual las etapas se organizan de manera secuencial, fue seleccionada para este proyecto debido a su orden y rigurosidad *(Maida & Pacienzia, 2015)*.

Tras identificar y formular el problema, se decidió dividir la metodología a utilizar en el proyecto, creando una hoja de ruta, como se observa en la figura 5. El primer componente de la metodología utilizada en este proyecto involucra el análisis del ADS-B. Esta necesidad surge después de la regulación del uso de ADS-B en todas las aeronaves según la Resolución 02413 de 2019 por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica. Se identificó la ausencia de una forma clara y sencilla para obtener la información de cualquier ADS-B, dada su libre difusión *(Resolución Numero 02413 Por la cual se modifica parcialmente la norma RAC 91 -Reglas Generales de Vuelo y Operación- de Reglamentos Aeronáuticas de Colombia, 2019)*.

Figura 5.
Metodología seguida durante el desarrollo de la investigación



Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, se encuentra la recepción y decodificación de la señal. La recepción de la señal se realizó por medio de la antena y módulo Nooelec NESDR Smart v4 Bundle (*Nooelec - Nooelec NESDR SMArt v4 Bundle - Premium RTL-SDR w/ Aluminum Enclosure, 0.5PPM TCXO, SMA Input & 3 Antennas. RTL2832U & R820T2-Based*, s/f) con las siguientes características:

- Rango de frecuencia aproximado: 25MHz - 1750MHz.
- Base de antena con cable RG58 de 2 m.
- Antena 1. antena telescópica.
- Antena de 433 MHz (ISM) (frecuencia fija).
- Antena UHF (frecuencia fija).
- RTL2832U Demodulador/IC de interfaz USB.
- Sintonizador R820T2 IC.
- Regulador de voltaje apto para RF.
- Estabilidad de frecuencia: 0,5 PPM (máx.).
- Ruido de fase @1kHz offset: -138dBc/Hz (o mejor).
- Ruido de fase @10kHz: -150dBc/Hz (o mejor).
- Ruido de fase @100kHz: -152dBc/Hz (o mejor).

Como se observa en la Figura 6, para extraer la información procedente del ADS-B, se desarrolló un código en MATLAB capaz de decodificar la señal. Inicialmente, se consideró la implementación de los programas "Planeplotter" y "Aircraft Scatter Sharp"; sin embargo, la información decodificada resultante no era suficientemente clara. La información obtenida en el proceso de decodificación permitió la elaboración de un conjunto de datos o "dataset", el cual se caracterizaba por contener diversos tipos de variables.

A continuación, se realizó la clasificación de la información. Para la clasificación de los datos en el dataset, fue necesario desarrollar un algoritmo específico. Un requisito para la clasificación de información fue la localización de la señal, la cual debía estar dentro de un rango de coordenadas previamente establecido. Estas coordenadas se obtuvieron a partir de la Publicación de Información Aeronáutica (AIP) del Aeropuerto El Dorado (Unidad Administrativa Especial de Aeronautica Civil, 2021) y con la ayuda de la herramienta "Google Earth" (Google Earth, 2022). Se determinó la ubicación de cuatro puntos geográficos del aeropuerto, representando el norte, este, oeste y sur de los límites del Aeropuerto Internacional El

Dorado Luis Carlos Galán Sarmiento (SKBO), tal como se puede apreciar en la Figura 7. Estas coordenadas se pueden consultar en la tabla anexa. Una vez establecidos los parámetros para el filtrado, se evaluaron variables como altitud, latitud y longitud de cada aeronave.

Figura 6.

Antena y equipo receptor usado para el desarrollo del proyecto (Nooelec - Nooelec NESDR SMArt v4 Bundle - Premium RTL-SDR w/ Aluminum Enclosure, 0.5PPM TCXO, SMA Input & 3 Antennas. RTL2832U & R820T2-Based, s/f).

En la fase final del proyecto, se efectúa la validación de los datos obtenidos. Es esencial verificar que el algoritmo desarrollado clasifique de manera precisa y ordenada la señal decodificada de la ADS-B para cualquier aeronave situada dentro o fuera de las coordenadas preestablecidas. Para facilitar este proceso, se optó por la construcción de dos gráficos: uno que engloba la totalidad de los datos, como se muestra en la Figura 8, y otro que representa los datos que cumplen con los parámetros establecidos, como se ilustra en la Figura 9.

La información clasificada obtenida después de este proceso permite un análisis más descriptivo y sencillo de los datos transmitidos por la ADS-B. Este "filtro" podría servir como punto de partida para futuras investigaciones, potenciando el crecimiento exponencial que está experimentando el sector aeronáutico.

3. RESULTADOS

Una vez conectado el receptor y sincronizado con MATLAB, el software de procesamiento, se generó un archivo que contenía datos tales como el mensaje ADS-B, fecha y hora, código OACI, identificador de vuelo, estado del vuelo, altitud, longitud, latitud, velocidad, rumbo, entre otros. A partir de este archivo, se aplicó el algoritmo desarrollado con el propósito de filtrar las aeronaves que se encuentran en el espacio terrestre del Aeropuerto El Dorado. Para esto, se establecieron ciertos parámetros, incluyendo las coordenadas del espacio del Aeropuerto El Dorado que se presentan en la Tabla 3. Tras establecer estos parámetros, se graficaron todos los datos de latitud y longitud de las diferentes aeronaves, como se muestra en la Figura 8. El objetivo de esta etapa fue permitir una comparación rápida de la efectividad del algoritmo una vez finalizado su procesamiento.

Procesados los datos a través del algoritmo, se obtuvo la información de aquellas aeronaves que estaban dentro de las coordenadas previamente establecidas. Así, se generó la Figura 9, en la que solo se muestran las aeronaves que cumplen con las condiciones establecidas. De esta forma, se puede considerar concluido el proyecto de manera satisfactoria, con la posibilidad de que su desarrollo sirva como una herramienta valiosa para su aplicación en diversas investigaciones.

Figura 7.
Mapa del área del aeropuerto el Dorado y los respectivos puntos usados para la investigación.

Figura 8.

Gráfica con la totalidad de los datos antes de ser procesados por el filtro

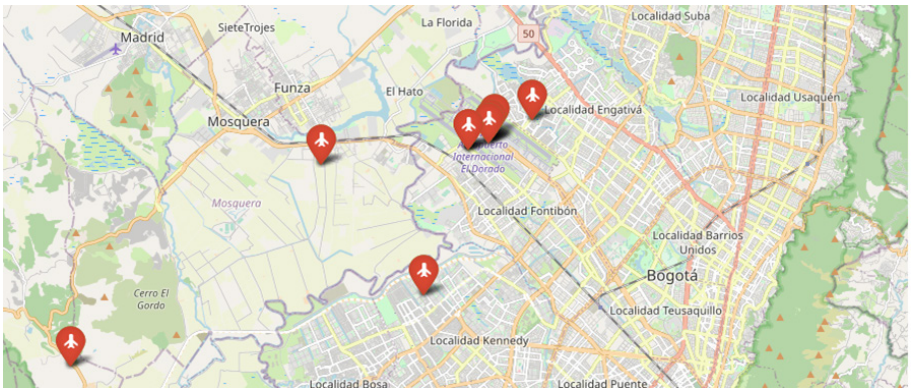


Figura 9.

Gráfica con los datos después de ser filtrados

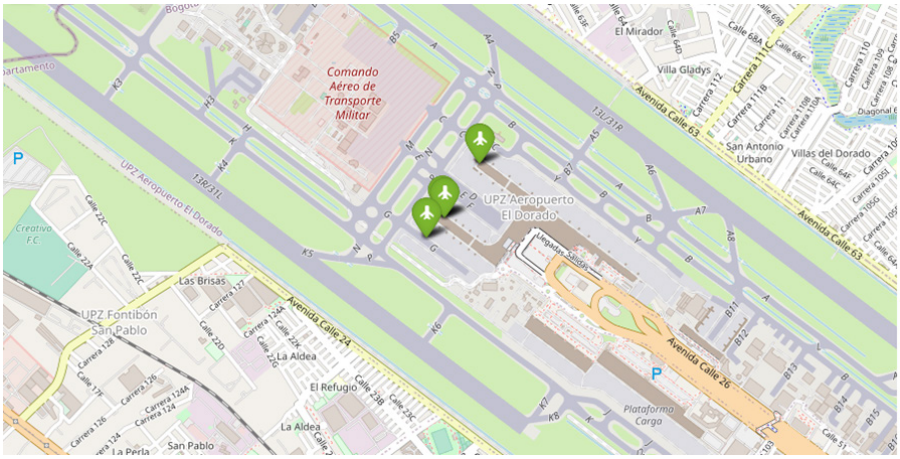


Tabla 3.

Coordenadas establecidas para el filtro de datos del espacio terrestre del aeropuerto el Dorado

COORDENADAS ESPACIO DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL EL DORADO – BOGOTÁ, D. C.		
PUNTO CARDINAL	**LATITUD**	**LONGITUD**
NORTE	4,7015248	-74,1472789

PUNTO CARDINAL	LATITUD	LONGITUD
ORIENTE	4,698861	-74,134986
OCCIDENTE	4,7096217	-74,1559888
SUR	4,7012117	-74,1506179

La Tabla 4 muestra la recopilación de información a través de Matlab de algunas de las columnas más relevantes para el estudio. Se obtiene un archivo de texto plano con la información de las tramas enviadas desde las aeronaves a la antena ubicada en el Aeropuerto El Dorado. El primer filtro se aplica a la columna 2, que representa el Código de Redundancia Cíclica (CRC). Este debe ser igual a cero (0) para que la información se considere válida.

Tras superar el primer filtro de verificación de la información, se aplica un segundo filtro basado en las coordenadas establecidas en la Tabla 3. La información resultante de esta segunda etapa de filtrado se visualiza en la Figura 9. De esta manera, la metodología permite obtener y procesar datos precisos de las aeronaves dentro de las coordenadas definidas del Aeropuerto El Dorado.

Tabla 4. Gráfica con los datos después de ser decodificados

Message	CRC	Time	DF	CA	ICAO24	TC	Altitude	Latitude	Longitude
8DAA542 F585127 2254022 95F35B9	0	26/04/ 2022 10:47	17	5	AA542F	11	15050	4.78082172	285.54342862
8DE8042 B583F93 3B1DA14 D028088	0	26/04/ 2022 10:47	17	5	E8042B	11	11625	4.84634399	-74.34890488
8D0C205 1586B33 1D31947 027178F	0	26/04/ 2022 10:47	17	5	0C2051	11	20275	4.67102051	285.49779860

...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
8F0D0B3 4583103 27B5AFA FBF74D8	0	26/04/ 2022 10:48	17	7	0D0B34	11	8600	4.73263550	-74.17749954
8DAA542 F584B87 2C9BFDE 9D8C9D5	0	26/04/ 2022 10:48	17	5	AA542F	11	14000	4.84203791	285.49190653

4. DISCUSIÓN

Como se mencionó al principio de este artículo, el sistema ADS-B está emergiendo como el reemplazo de los sistemas de vigilancia aérea convencionales debido a su eficiencia, facilidad de instalación, sencillez en la obtención de datos, y menor costo de las estaciones terrestres, entre otras ventajas que lo distinguen como la opción más viable. Aunque la adquisición de datos puede ser sencilla para cualquier persona, también puede presentar desafíos.

Las plataformas existentes que ya cuentan con antenas y receptores para recibir la información no son del todo económicas. Estas ofrecen una fracción limitada de la totalidad de la información transmitida por el sistema de forma gratuita, incentivando la adquisición del resto de la información a través de membresías o suscripciones costosas. Parte de esta investigación buscaba una manera de obtener datos sin incurrir en estos gastos.

Mediante la implementación de un sistema propio para la libre adquisición de datos, se pretende ofrecer un ejemplo para futuras investigaciones que deseen utilizar el sistema ADS-B como un componente crucial. Así, se puede facilitar el desarrollo de investigaciones sin la necesidad de grandes gastos, promoviendo un mayor número de estudios sobre este sistema.

Debido a la vasta cantidad de información recibida en una sola trama del sistema ADS-B, filtrar y buscar datos específicos puede ser un proceso desafiante. Aquí es donde el algoritmo desarrollado en esta investigación demuestra su eficacia, al procesar rápidamente la información deseada. Dependiendo de los datos filtrados, la información puede ser graficada para una mejor comprensión.

Finalmente, con esta investigación, esperamos contribuir al campo aeronáutico al destacar la facilidad con la que podemos obtener información del sistema ADS-B en la actualidad. Deseamos promover la gran cantidad de investigaciones derivadas de esta información, resaltar la recuperación y avance de la aviación después de ser severamente impactada por la pandemia del COVID-19, y evidenciar cómo la industria está implementando sistemas de vigilancia aérea para optimizar el espacio aéreo en respuesta al creciente volumen de operaciones aéreas.

5. CONCLUSIONES

A partir de este estudio, queda claro que la implementación del sistema ADS-B juega un papel fundamental en la navegación aérea debido a la precisión que se logra y la accesibilidad a los datos que ofrece. Con el equipo adecuado, cualquier individuo puede acceder y analizar los datos proporcionados por este sistema, abriendo el camino para un amplio rango de estudios e investigaciones futuras.

La creación de algoritmos como el desarrollado en esta investigación resulta esencial para futuros análisis que requieran de la filtración de datos. Dependiendo de las especificidades del estudio a realizar, puede ser crucial que los datos cumplan con ciertos criterios establecidos previamente. Estos algoritmos proporcionan una solución eficiente para la gestión de información, permitiendo una mejor organización, clasificación y visualización de los datos.

Además, es importante destacar que la incorporación de tecnología de vigilancia aérea como el sistema ADS-B contribuye significativamente a la optimización del espacio aéreo. A medida que el volumen de operaciones aéreas continúa aumentando, la necesidad de sistemas de monitoreo precisos

y eficientes se vuelve cada vez más crítica. El sistema ADS-B, con su capacidad para proporcionar datos en tiempo real y su fácil accesibilidad, se presenta como una herramienta valiosa en este aspecto.

Por último, este estudio subraya la relevancia de promover y facilitar la adquisición de habilidades técnicas en el campo de la ingeniería aeronáutica. La implementación de proyectos como este en un entorno educativo brinda a los estudiantes la oportunidad de poner en práctica sus conocimientos teóricos, preparándolos mejor para las demandas y desafíos del mundo profesional.

6. REFERENCIAS

Carrasco, D. (2022). *Desarrollo de una interfaz para recepción, procesamiento y visualización de tramas ADS-B de aeronaves usando un módulo RTL-SDR* . Escuela Politécnica Nacional.

Filippone, A., Parkes, B., Bojdo, N., & Kelly, T. (2021). Prediction of aircraft engine emissions using ADS-B flight data. *Aeronautical Journal*, *125*(1288). https://doi.org/10.1017/aer.2021.2

Google Earth. (2022). https://earth.google.com/web/@4.6997113,-74.14636804,2547.39954144a,7957.08569001d,30y,38.87511618h,0t,0r

IATA. (2020). *La recuperación se retrasa ante el continuo bloqueo de los viajes internacionales*.

Indra. (2015). *SISTEMA ADS-B ATM*.

La Comisión Europea amplía el plazo para el cumplimiento del ADS-B. (2020, mayo 6). https://aviaciondigital.com/la-comision-europea-amplia-el-plazo-para-el-cumplimiento-del-ads-b/

Lange, A., Sieling, J., & Gonzalez Parra, G. (2019). Convergence in airline operations: The case of ground times. *Journal of Air Transport Management*, *77*, 39–45. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.03.001

Maida, E. G., & Pacienzia, E. (2015). *METODOLOGIAS DE DESARROLLO DE SOFTWARRE*. Pontificia Universidad Católica Argentina Santa María de los Buenos AIRES.

Nooelec - Nooelec NESDR SMArt v4 Bundle - Premium RTL-SDR w/ Aluminum Enclosure, 0.5PPM TCXO, SMA Input & 3 Antennas. RTL2832U & R820T2-Based. (s/f). Recuperado el 20 de agosto de 2022, de https://www.nooelec.com/store/nesdr-smart.html

Number of Flights Worldwide in 2022/2023: Passenger Traffic, Behaviors, and Revenue. (2021). https://financesonline.com/number-of-flights-worldwide/

Organización de Aviación Civil Internacional. (2021). *Panorama de la Vigilancia dependiente automática - emisión (ADS-B OUT).*

Peña Gallegos, K. A., & Villareal Hidalgo, N. N. (2022). *Implementación de un receptor de datos ADS-B basado en SDR y desarrollo de una interfaz de visualización para supervisar en tiempo real la trayectoria de una aeronave de la FAE.* Universidad de las Fuerzas Armadas.

Proud, S. R. (2020). Go-Around Detection Using Crowd-Sourced ADS-B Position Data. *Aerospace 2020, Vol. 7, Page 16*, *7*(2), 16. https://doi.org/10.3390/AEROSPACE7020016

Que es ADS-B IN & OUT? (s/f). Recuperado el 22 de agosto de 2022, de http://www.aeroservicio.com/adsb-in-out/

Rivas Rincón Antonio. (2020). Predicción de distancia mínima entre aeronaves a partir de datos ADS-B. En *Universidad de Sevilla, Sevilla*. Universidad de Sevilla.

Sun, J. (2021). *The 1090 Megahertz Riddle A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals* (2a ed.).

Resolución Numero 02413 Por la cual se modifica parcialmente la norma RAC 91 -Reglas Generales de Vuelo y Operación- de Reglamentos Aeronáuticas de Colombia, (2019). https://www.aerocivil.gov.co/normatividad/ResolucionesOTA2019/RESL.%20%20N%C2%B0%2002413%20%20AGO%2008%20de%202019.pdf

Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil. (2018). *Generalidades para la aprobación de Aeronavegabilidad del Sistema ADS-B OUT.*

Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil. (2021). *Plan de Navegación Aérea para Colombia. 2.*

Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2021). *AIP SKBO - Bogotá* (Tercera).

Zhang, Z. (2018). Optimization performance analysis of 1090ES ADS-B signal separation algorithm based on PCA and ICA. *International Journal of Performability Engineering*, *14*(4). https://doi.org/10.23940/ijpe.18.04.p17.741750

CAPÍTULO 10

APLICACIONES DE IMÁGENES SATELITALES FACSAT-1 PARA LA DEFINICIÓN DE MAPAS DE COBERTURA DE LA TIERRA

TE. William Efrén Chirán Alpala
https://orcid.org/0000-0002-5370-5704
William.chiran@fac.mil.co

Cristian David Moreno Ortega
cristianmore05@gmail.com

CT. Lorena Paola Cárdenas Espinosa
https://orcid.org/0000-0003-2473-0932
Lorena.cardenas@fac.mil.co

MY. Paola Andrea Zárate Luna
https://orcid.org/0000-0001-8774-8369
Paola.zarate@fac.mil.co

ST. Álvaro Andrés Mora Nieto
https://orcid.org/0000-0003-1126-9964
Alvaro.mora@fac.mil.co

Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE)
Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez"
Fuerza Aeroespacial Colombiana

Resumen

Los datos relativos a la cobertura de la Tierra son elementos esenciales para la planificación territorial, la conservación, la investigación científica en campos como la hidrología y la climatología, así como para los procesos de ordenación y el monitoreo ambiental del territorio. Según MINCIENCIAS (2016), Colombia ostenta el título de ser el segundo país más biodiverso del mundo. Esto lo convierte en un país privilegiado debido a sus riquezas naturales, su variada y hermosa geografía, y la diversidad de sus ecosistemas. Sin embargo, lamentablemente, todavía no se tiene un conocimiento completo del estado y las condiciones de todo el territorio colombiano, lo que a menudo conduce a una explotación inadecuada de los recursos. Por tanto, es imperativo unir esfuerzos para mantener actualizada constantemente la información sobre la cobertura de la tierra. Una forma de lograrlo es mediante el uso de imágenes capturadas por el nanosatélite FACSAT-1. Estas imágenes proporcionan productos relacionados con mapas de cobertura para varias áreas del territorio colombiano, con una resolución espacial de 30 m x 30 m, correspondientes al año 2018. Este proceso se basa en técnicas de clasificación no supervisada y utiliza la metodología CORINE Land Cover, que ha sido adoptada por Colombia para llevar a cabo el inventario de la cobertura de la tierra.

Palabras clave: Cobertura de la tierra, biodiverso, nanosatélite, ecosistemas, mapas de cobertura, clasificación no supervisada.

Abstract. *Land cover data are fundamental inputs for territorial planning and conservation, scientific research in hydrology, climatology, management processes and environmental monitoring of the territory. According to* MINCIENCIAS (2016) *today Colombia is the second most biodiverse country in the world, privileged by its natural wealth, its variety, geographic beauty and the diversity of its ecosystems. Unfortunately, the state and conditions of the entire Colombian territory are still not fully known, and as a consequence, the resources are not adequately exploited. It is necessary to join efforts to constantly update land cover information, therefore, using FACSAT-1 nanosatellite images, the products corresponding to coverage maps of several areas of the Colombian territory are presented at a spatial resolution of 30 m x 30 m for the year 2018, using unsupervised classification procedures and the CORINE Land Cover methodology adopted by Colombia to carry out the land cover inventory.*

Keywords: Land cover, biodiverse, nanosatellite, ecosystems, land cover maps, unsupervised classification.

1. INTRODUCCIÓN

Según González-González et al. (2022), los datos relativos al uso y cobertura de la tierra proporcionan información fundamental y esencial para la planificación, la gestión ambiental y la investigación científica, tanto a escala global como local. De manera similar, Tsendbazar et al. (2021) enfatizan la importancia de comprender la dinámica de la cobertura de la tierra, dado que los cambios en la cobertura del suelo pueden tener un impacto significativo en los procesos biológicos y bioquímicos de la Tierra. Además, contar con datos actualizados sobre la cobertura de la tierra, como mencionan Alvarado-Solano y Otero Ospina (2015), junto con la referencia no disponible de Gutiérrez (2021), permite comprender mejor el impacto ambiental que se produce diariamente en nuestro planeta. Dicho impacto incluye cambios globales en los bosques, tierras de cultivo, vías fluviales y la atmósfera, impulsados por la necesidad de proporcionar alimento, fibra, agua y refugio a más de seis mil millones de personas, según Foley et al. (2005).

En la actualidad, Colombia se enfrenta a diversas amenazas ambientales, tal como lo señala la referencia no disponible de Yepes (2011), así como el estudio de El Bosque et al. (2015). Estas amenazas incluyen la deforestación, la degradación de los bosques y el cambio climático, que impactan directamente los ecosistemas de bosques naturales. González-González et al. (2021) resaltan que la tasa anual promedio de pérdida de la cubierta terrestre en los bosques a nivel mundial ha aumentado en un 30%, lo que afecta a los ecosistemas que albergan biodiversidad y se ven perjudicados por la degradación del hábitat.

Dada la necesidad de contar con información continua, oportuna y estandarizada sobre las coberturas del territorio nacional, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) adoptó y estandarizó, desde Europa, la metodología y la leyenda de coberturas terrestres CORINE Land Cover - CLC en 2004, con el propósito de establecer un sistema de monitoreo que permitiera generar información actualizada, confiable y trazable sobre la cobertura de la tierra (Suárez-Parra et al., 2016a).

El objetivo principal de este trabajo es generar un producto de Cobertura terrestre utilizando las imágenes satelitales proporcionadas por el satélite colombiano FACSAT-1 (El Tiempo, 2018), que ofrece imágenes con una resolución espacial de 30 m x 30 m de varias regiones del país. Esto se logra mediante la clasificación no supervisada y la aplicación de la metodología CORINE Land Cover para describir la leyenda de mapas de cobertura a una escala de 1:100.000.

2. METODOLOGÍA

Citando a Soto Vega et al. (2021), las condiciones ambientales, la variabilidad geográfica y las diferentes propiedades de los sensores hacen que no sea viable emplear clasificadores previamente entrenados para nuevos datos sin una caída significativa en la precisión de la clasificación.

Estudios realizados por Wehrmann et al. (2004), Ruggeri et al. (2021a), Organización Meteorológica Mundial (2016) e IDEAM (2010) dan a conocer que debido a la complejidad y el esfuerzo que requiere realizar la clasificación manual de datos (clasificación supervisada), tanto en términos de tiempo como de personal altamente especializado, se considera la automatización de la clasificación (clasificación no supervisada) de la cobertura del suelo como una prioridad en la investigación. Además, el mapeo de la cobertura del suelo en zonas de alta montaña sigue siendo un desafío, principalmente debido a la presencia de nubes y sombras en las imágenes satelitales, así como a los problemas de acceso a áreas remotas que pueden limitar el uso de clases supervisadas.

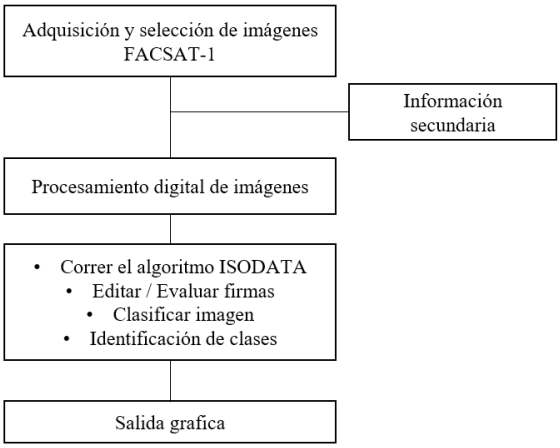
Por lo tanto, para definir los mapas de cobertura en este trabajo, se realizó una clasificación no supervisada de los diferentes tipos de cobertura. Siguiendo la referencia no disponible de Hori (1998), Alonso (2018), Vera (2020) y Ruggeri et al. (2021b), la clasificación no supervisada evalúa los valores y las posiciones de los píxeles en la imagen para identificar grupos presentes dentro de los rangos de los datos. Cada grupo representa características únicas, y esto depende en su mayoría de la propiedad de reflectancia de los píxeles. Por lo tanto, corresponde al usuario identificar el número de conglomerados que se generarán y las bandas que se elegirán. A partir de las clases generadas, se nombrarán manualmente las coberturas, y si se encuentra que varias clases en realidad representan una misma clase, es deber del usuario fusionar tales

clases. Según Lozano (2021), la clasificación no supervisada desempeña un papel importante cuando las subdivisiones en las que las muestras de datos deben dividirse son desconocidas para el usuario. En tales casos, se utiliza para generar clases distintas, también denominadas clases espectralmente separadas o clústeres (Nijhawan et al., 2018).

La varianza entre los conglomerados se calcula para obtener estos grupos, y, según las características de las coberturas terrestres presentes en el proceso de clasificación, el etiquetado de píxeles se realiza después de la determinación de conglomerados (Gil, 2003).

Figura 1.

Diagrama de flujo de la metodología implementada en la definición de cobertura de tierras, a partir de imágenes de FACSAT-1



Fuente: Adaptado de (Batravil et al., 1990; Polanco & de Mesa, 2012)

Para la clasificación de la leyenda se utilizó la metodología CORINE Land Cover, cuyo principal objetivo es la estandarización para los estudios que se realicen sobre coberturas (Valencia, 2009; Caita, 2021; Calvo, 2021; Lamprea, 2017; Suárez-Parra et al., 2016b). Entre las ventajas de esta metodología se encuentra que permite obtener las coberturas terrestres de forma sencilla y eficiente, facilita la comparación de datos y estadísticas entre diferentes lugares y países que la adopten y posibilita análisis multitemporales de la ocupación del territorio.

En la Figura 1, se presenta la metodología implementada en la definición de cobertura de tierras a partir de imágenes de FACSAT-1. Se realizó un preprocesamiento de las imágenes, llevando la imagen a valores de reflectividad de superficie, para posteriormente realizar la clasificación no supervisada por medio de procesamiento digital de imágenes, lo que permitió obtener información de las diferentes coberturas.

Para Colombia, se consideraron cinco divisiones según la metodología CORINE Land Cover (Corredor, 2019; Aguiar, 2021; Cerrato, 2017; Lozano, 2002). En el primer nivel de clasificación, se encuentran los territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua. Estas categorías se dividen en los niveles dos y tres. Posteriormente, el usuario puede realizar adaptaciones para mejorar la clasificación. Para este propósito, se emplean los niveles cuatro y cinco de la metodología (ver Figura 2) (Costa, 2010).

Las imágenes del nanosatélite FACSAT-1 utilizadas en este proyecto corresponden a zonas donde únicamente se presentan cubiertas correspondientes a territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales.

Figura 2.

Coberturas de la tierra para la leyenda nacional, escala 1:100.000, de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia

Fuente: Adaptada de (IDEAM, 2010); (IGAC, 2021)

3. RESULTADOS

En la identificación y selección de imágenes que se ajusten a las áreas núcleo de deforestación definidas a nivel nacional determinadas por diferentes estudios del IDEAM (2014), y nombradas por Elena Ana et al. (2013), se presenta para el caso de las imágenes adquiridas con el satélite colombiano FACSAT-1 un listado de las que tienen presencia en estas áreas, de las que se descartan

algunas que no cuentan con correcciones radiométricas y geométricas, por lo que se decide seleccionar las identificadas con el ID 500, 581, 604, 605, 812, 811, 810, 827, 828, 829, 1381, 1382, 1549; para las cuales se identifica su localización en la Figura 3 y Tabla 1.

Tabla 1.

Imágenes de FACSAT-1 con representación dentro de las áreas núcleo de deforestación a nivel nacional

No. de imagen	Departamento	Ubicación especifica
1446	Cúcuta	La Esperanza
1550	Cúcuta	El Astillero
1791	Norte de Santander	La Libertad
1801	Nariño	El Charco
1852	Guaviare	Mocuare
1853	Guaviare	El Retorno
500	Cauca	Timbiquí
581	Antioquia	Segovia
604	Norte de Santander	Teorama
605	Norte de Santander	El Zulia
812	Norte de Santander	El Astillero
811	Norte de Santander	La Llana
810	Norte de Santander	Tibú
827	Guaviare	San José del Guaviare
828	Guaviare	Calamar
829	Caquetá	San Vicente del Caguán
1381	Sincelejo	Majagual
1382	Antioquia	Nechi
1465	Nariño	Tumaco
1549	Vichada	La Chorrera

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.
Ubicación geográfica de las imágenes de FACSAT-1 implementadas en este estudio

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de la aplicación de la metodología expuesta en el numeral anterior y donde se identifica que para las imágenes adquiridas por FACSAT-1 en 2018, no se tienen cobertura sobre territorios marinos y costeros, se presentan los siguientes resultados para cada una de los ID, mencionados anteriormente.

- **Imagen ID 500**

En las coberturas del área de interés de la imagen FACSAT-1 con ID 500, se encuentran diferentes tipos de coberturas. Por ejemplo, el bosque denso alto de tierra firme ocupa 61.797 hectáreas, lo que representa el 48% del área total. El bosque denso alto inundable abarca 10.211 hectáreas, equivalente al 8% del área total. Además, se identificaron áreas de vegetación secundaria alta

y baja, bosque fragmentado con vegetación secundaria, así como coberturas de menor extensión, como zonas pantanosas, bosque de galería y ripario, aeropuertos y tejidos urbanos (ver Tabla 2).

Además, la cobertura correspondiente a bosque denso alto de tierra firme se concentra sobre el margen derecho de la Figura 4, y el bosque denso alto inundable sobre la margen derecha, y cercana a las costas, donde también se encuentra la vegetación secundaria, en el bosque denso alto se observa una buena conectividad con parches entre esta cobertura de bosque fragmentado y vegetación herbácea.

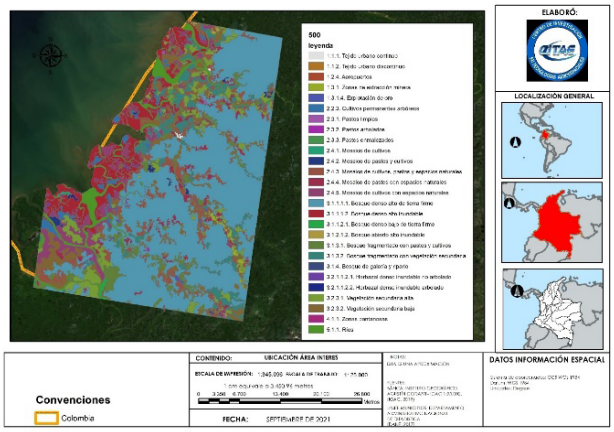
Tabla 2.
Coberturas 2018 imagen FACSAT-1 No. 500

Cobertura	Área (ha)
Tejido urbano continuo	94,78
Tejido urbano discontinuo	97,57
Aeropuertos	14,27
Zonas de extracción minera	689,42
Cultivos permanentes arbóreos	1807,71
Pastos limpios	105,56
Pastos arbolados	62,13
Pastos enmalezados	332,15
Mosaico de cultivos	96,16
Mosaico de pastos y cultivos	562,52
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	7180,18
Mosaico de pastos con espacios naturales	3669,42
Mosaico de cultivos con espacios naturales	6169,62
Bosque de galería y ripario	23,86
Zonas pantanosas	40,08
Ríos	6905,56
Explotación de oro	324,42
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	4316,00
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	6950
Vegetación secundaria alta	7167

Cobertura	Área (ha)
Vegetación secundaria baja	8781,20
Bosque denso alto de tierra firme	61797,45
Bosque denso alto inundable	10211,02
Bosque denso bajo de tierra firme	227,49
Bosque abierto alto inundable	127,60
Herbazal denso inundable no arbolado	139,79
Herbazal denso inundable arbolado	80,78

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.
Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 500 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 581**

En las coberturas de la imagen identificadas con el ID 581, se encuentran diversas categorías de cobertura. Por ejemplo, el bosque denso alto de tierra firme abarca 59.226 hectáreas, lo que representa el 35% del área total. Los pastos limpios ocupan un 32% de la extensión. Además, se observa vegetación secundaria alta, mosaico de pastos con espacios naturales, y se identifican pequeñas áreas que sugieren la presencia de zonas de explotación de oro. Se encuentra también bosque fragmentado con pastos y cultivos, así como

plantaciones forestales. En aproximadamente un 2 a 3% del área, se pueden identificar posibles zonas de explotación minera en las proximidades de la rivera del río (ver Tabla 3).

El bosque denso alto de tierra firme se localiza principalmente en la zona septentrional del área, en la que también se encuentran parches y pequeños polígonos de bosque abierto alto de tierra firme, pero los mayores polígonos se ubican al lado este y sur, junto a vegetación secundaria alta, además algunas zonas de explotación de oro se hallan dentro del bosque denso alto de tierra firme, y el núcleo de deforestación y perdida de bosque se halla sobre el área sur de la imagen (ver Figura 5).

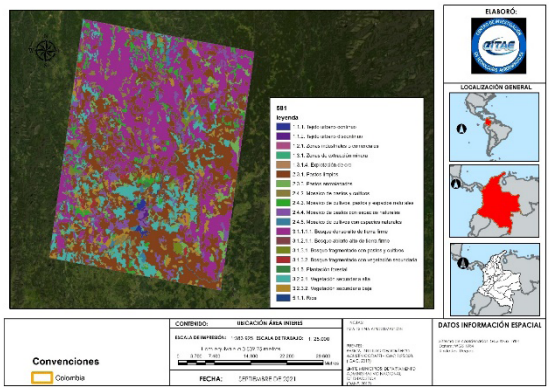
Tabla 3.
Coberturas 2018 de la imagen con ID 581

Cobertura	Área (ha)
Tejido urbano continuo	630,21
Tejido urbano discontinuo	336,18
Zonas industriales o comerciales	11,90
Zonas de extracción minera	1115,82
Pastos limpios	55356,61
Pastos enmalezados	6923,10
Mosaico de pastos y cultivos	3477,02
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	6773,82
Mosaico de pastos con espacios naturales	6262,74
Mosaico de cultivos con espacios naturales	1510,05
Plantación forestal	163,96
Ríos	972,89
Explotación de oro	90,99
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	2167,60
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	1354,01
Vegetación secundaria alta	16255,30
Vegetación secundaria baja	8785,85
Bosque denso alto de tierra firme	59226,83
Bosque abierto alto de tierra firme	200,31

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 581 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 604**

En las coberturas del suelo de la imagen satelital FACSAT-1 con ID 604, y teniendo en cuenta la información generada por Garavito (2017) se encuentran que la cobertura preponderante es la de bosque denso alto de tierra firme con 95.096 hectáreas o el 64,69%, y el mosaico de pastos, cultivos y espacios naturales con 9.228 hectáreas o el 5,21%; y las coberturas de menor valor es el arbustal denso, y el bosque denso bajo de tierra firme (ver Tabla 4).

En la Figura 5, se observa que la cobertura de bosque denso alto de tierra firme domina sobre la zona occidental, y se encuentra densamente concentrado, mientas que sobre la zona oriental y una pequeña parte del sur se observan procesos de degradación del bosque y conversión de otras coberturas, en los que se originan bordes y fragmentación con los mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales.

Tabla 4

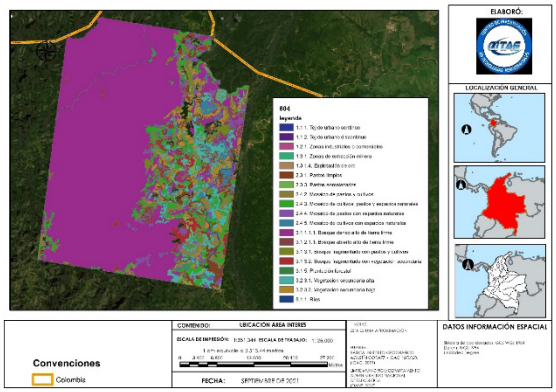
Coberturas 2018 de la imagen con ID 604

Cobertura	Área (ha)
Tejido urbano discontinuo	22,40
Pastos limpios	6304,97
Pastos enmalezados	1933,38
Mosaico de cultivos	295,43
Mosaico de pastos y cultivos	4741,59
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	9228,31
Mosaico de pastos con espacios naturales	4749,81
Mosaico de cultivos con espacios naturales	2022,41
Bosque de galeria y ripario	295,50
Vegetación secundaria o en transición	724,37
Ríos	1168,85
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	2726,69
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	2857,63
Arbustal denso	55,98
Vegetación secundaria alta	7659,85
Vegetación secundaria baja	5851,71
Bosque denso alto de tierra firme	95096,70
Bosque denso bajo de tierra firme	187,39
Bosque abierto bajo de tierra firme	1073,06

Fuente: Elaboración propia

Figura 6.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 604 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 605**

En la imagen FACSAT-1 con ID 605 se encuentran principalmente las coberturas de mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales con 28.468 hectáreas, mosaico de pastos y cultivos con 24.039 hectáreas, mosaico de pastos con espacios naturales con 16.386 hectáreas, pastos limpios con 15.579 hectáreas (ver Tabla 5).

En la Figura 6 se observa la distribución espacial de las coberturas, una matriz heterogénea de coberturas donde se halla altamente fragmentado el bosque denso alto de tierra firme, con parches de pastos limpios, pastos enmalezados, mosaico de pastos con espacios naturales, lo que demuestra diferentes procesos de división del bosque, dado que sobre el centro del área permanece el parche de mayor extensión, y que por las coberturas subyacentes puede deberse a una dinámica de la frontera agropecuaria (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (Colombia), 2013).

Tabla 5.

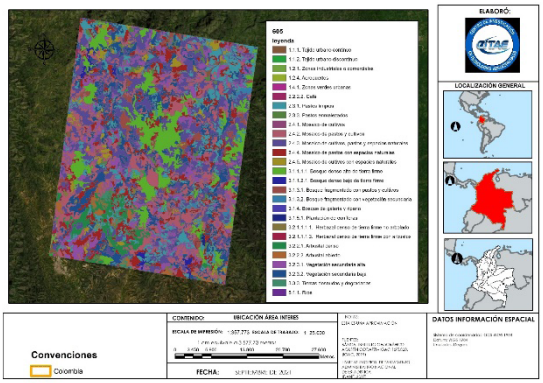
Coberturas 2018 de la imagen con ID 605

Cobertura	Área (ha)
Tejido urbano continuo	449,81
Tejido urbano discontinuo	213,71
Zonas industriales o comerciales	143,94
Aeropuertos	12,21
Zonas verdes urbanas	41,79
Pastos limpios	15579,19
Pastos enmalezados	1983,14
Mosaico de cultivos	87,66
Mosaico de pastos y cultivos	24039,85
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	28468,56
Mosaico de pastos con espacios naturales	16386,14
Mosaico de cultivos con espacios naturales	4056,34
Bosque de galería y ripario	458,13
Tierras desnudas y degradadas	892,21
Ríos	1171,66
Café	87,61
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	3266,53
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	931,03
Plantación de coníferas	165,57
Arbustal denso	4960,91
Arbustal abierto	1393,18
Vegetación secundaria alta	13938,69
Vegetación secundaria baja	17103,38
Bosque denso alto de tierra firme	17249,45
Bosque denso bajo de tierra firme	1151,33
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	904,94
Herbazal denso de tierra firme con arbustos	775,82

Fuente: Elaboración propia

Figura 7.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 605 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 810**

Para la imagen con el ID 810 se encuentra que las coberturas con mayor área son la de la palma de aceite con 11.781 hectáreas, la vegetación secundaria al con 7.459 hectáreas, mosaico de pastos y cultivos 7.443 hectáreas, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales con 8.445 hectáreas, mosaico de cultivos con espacios naturales con 3.963 hectáreas (ver Tabla 6).

Ahora, por distribución espacial se encuentra que hay dominancia de cultivos de palma sobre el centro oriente del área, y bosque fragmentado sobre la zona noroccidental, y otros pequeños parches de bosque denso alto de tierra firme, y de bosque de galería y ripario (Núñez-Avellaneda, L. A., Castro et al., 2019) sobre el suroccidente (ver Figura 7).

Tabla 6.

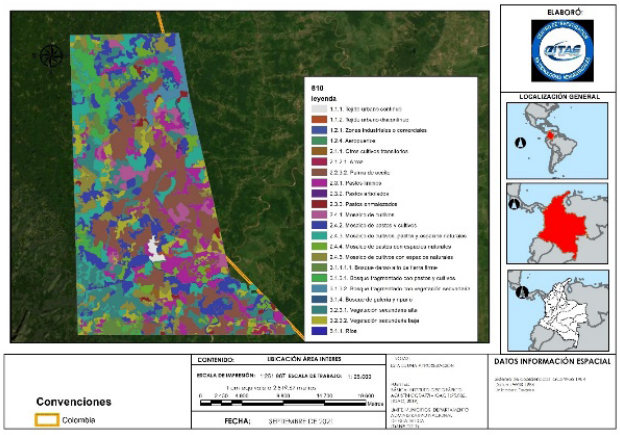
Coberturas 2018 de la imagen con ID 810

Cobertura	Área (ha)
Tejido urbano continuo	304,26
Tejido urbano discontinuo	201,37
Zonas industriales o comerciales	62,65
Aeropuertos	27,75
Otros cultivos transitorios	85,18
Pastos limpios	292,43
Pastos limpios	6023,72
Pastos arbolados	50,69
Pastos enmalezados	575,57
Mosaico de cultivos	2193,80
Mosaico de pastos y cultivos	7443,54
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	6805,62
Mosaico de pastos con espacios naturales	2719,13
Mosaico de cultivos con espacios naturales	3963,91
Bosque de galería y ripario	147,21
Ríos	490,45
Arroz	142,37
Palma de aceite	11781,89
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	2634,72
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	1549,53
Vegetación secundaria alta	7459,66
Vegetación secundaria baja	3764,88
Bosque denso alto de tierra firme	1051,24

Fuente: Elaboración propia

Figura 8.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 810 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 811**

En las coberturas de mayor extensión para la imagen 811, se encuentran las de bosque denso alto de tierra firme de 22.130 hectáreas, pastos limpios con 19.674 hectáreas, vegetación secundaria alta con 18.375 hectáreas (ver Tabla 7).

En la distribución espacial de las coberturas se hallan fragmentos de bosque denso alto de tierra firme sobre la zona occidental, en los que se encuentran pastos enmalezados, pero también sobre la zona oriental se encuentra bosque fragmentado, y en general hay diferentes coberturas en la que dominan los pasto y las coberturas de vegetación, con el parche al occidente del bosque que tiene diferentes procesos de fragmentación y disección (ver Figura 8).

Tabla 7.

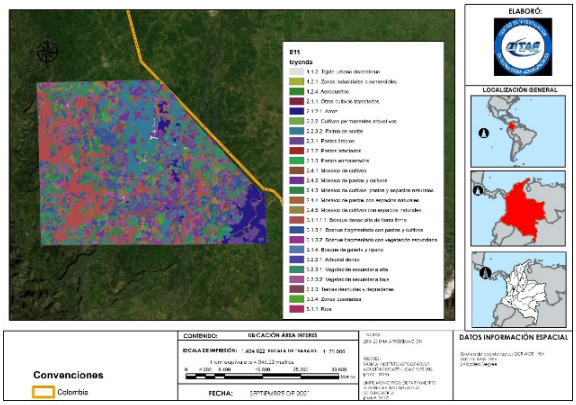
Coberturas 2018 de la imagen con ID 811

Cobertura	Área (ha)
Tejido urbano discontinuo	321,56
Zonas industriales o comerciales	111,91
Aeropuertos	12,07
Otros cultivos transitorios	85,18
Cultivos permanentes arbustivos	30,45
Pastos limpios	19674,00
Pastos arbolados	280,20
Pastos enmalezados	3659,02
Mosaico de cultivos	687,00
Mosaico de pastos y cultivos	8318,02
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	11649,23
Mosaico de pastos con espacios naturales	8677,49
Mosaico de cultivos con espacios naturales	5553,52
Bosque de galería y ripario	829,14
Tierras desnudas y degradadas	128,31
Zonas quemadas	166,49
Ríos	1842,44
Arroz	7640,85
Palma de aceite	15522,40
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	10083,48
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	1300,20
Arbustal denso	143,98
Vegetación secundaria alta	18375,71
Vegetación secundaria baja	9602,95
Bosque denso alto de tierra firme	22130,61

Fuente: Elaboración propia

Figura 9.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 811 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 812**

En las coberturas de la imagen 812 se encuentran dominando las coberturas de pastos limpios con 28.430 hectáreas, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales con 20.995 hectáreas, mosaico de pastos con espacios naturales con 19.093 hectáreas, vegetación secundaria alta con 18.902 hectáreas (Ver Tabla 8 y Figura 9).

Tabla 8.

Coberturas 2018 de la imagen con ID 812

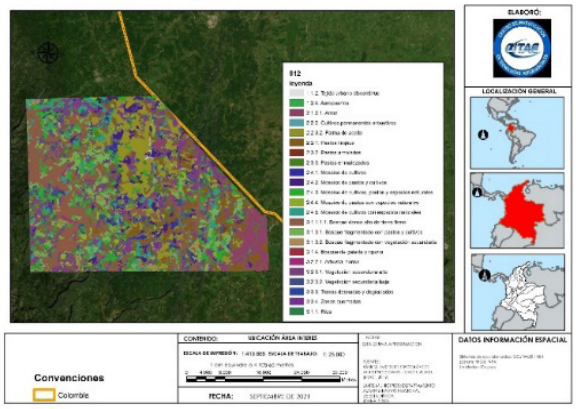
Cobertura	**Área (ha)**
Tejido urbano continuo	132,64
Tejido urbano discontinuo	320,02
Aeropuertos	10,83
Zonas de extracción minera	682,99
Cultivos permanentes arbustivos	30,45
Pastos limpios	28430,33
Pastos arbolados	448,67
Pastos enmalezados	6987,43
Mosaico de cultivos	215,39
Mosaico de pastos y cultivos	4943,56

Cobertura	**Área (ha)**
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	20995,97
Mosaico de pastos con espacios naturales	19093,85
Mosaico de cultivos con espacios naturales	4276,42
Bosque de galería y ripario	5596,51
Plantación forestal	341,65
Tierras desnudas y degradadas	671,59
Zonas quemadas	164,57
Ríos	1344,01
Cuerpos de agua artificiales	26,78
Arroz	13722,39
Café	15,30
Palma de aceite	2262,83
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	10172,97
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	2479,48
Arbustal denso	1462,72
Arbustal abierto	1315,24
Vegetación secundaria alta	18902,04
Vegetación secundaria baja	14368,60
Bosque denso alto de tierra firme	10810,60
Bosque denso bajo de tierra firme	4042,62
Bosque abierto alto de tierra firme	51,61
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	3222,87
Herbazal denso de tierra firme con arbustos	280,76

Fuente: Elaboración propia

Figura 10.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 812 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 827**

Para la imagen 827 se encuentran las coberturas dominantes de bosque denso alto de tierra firme con 95.494 hectáreas o el 48 %, pastos limpios con 48.769 hectáreas (24%), herbazal denso de tierra firme no arbolado con 14.515 hectáreas, y bosque denso bajo de tierra firme con 12.469 hectáreas (ver Tabla 9).

En la dinámica espacial de las coberturas se halla que el denso alto de tierra firme se distribuye en la mayor parte de la imagen, pero se concentra sobre la zona inferior izquierda, y el herbazal denso se encuentra adyacente a esta sobre la parte superior (ver Figura 10).

Tabla 9.

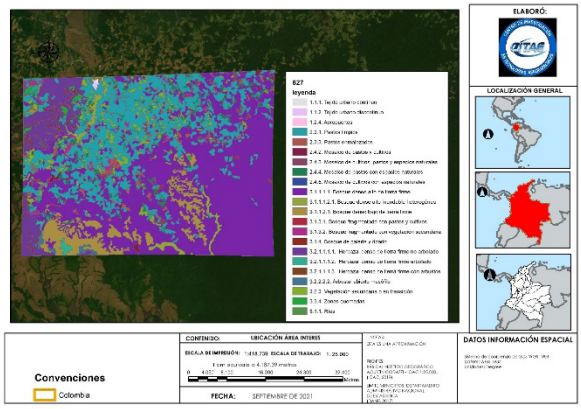
Coberturas 2018 de la imagen con ID 827

Cobertura	Área (ha)
Tejido urbano continuo	87,85
Tejido urbano discontinuo	93,99
Aeropuertos	31,20
Pastos limpios	48769,74
Pastos enmalezados	3119,81
Mosaico de pastos y cultivos	731,13
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1314,44
Mosaico de pastos con espacios naturales	5609,89
Mosaico de cultivos con espacios naturales	46,02
Bosque de galeria y ripario	1741,50
Vegetación secundaria o en transición	7503,50
Zonas quemadas	856,32
Rios	39,74
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	503,40
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	2404,89
Bosque denso alto de tierra firme	95494,88
Bosque denso bajo de tierra firme	12469,95
Arbustal abierto mesófilo	753,93
Bosque denso alto Inundable heterogeneo	2579,31
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	14515,43
Herbazal denso de tierra firme arbolado	623,70
Herbazal denso de tierra firme con arbustos	37,50

Fuente: Elaboración propia

Figura 11.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 827 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 828**

En las coberturas de la imagen 828 se distinguen las coberturas de bosque denso alto de tierra firme con 119.134 hectáreas, y herbazal denso de tierra firme no arbolado con 40.756 hectáreas, bosque denso alto inundable heterogéneo con 13.608 hectáreas (ver Tabla 9).

Sobre la distribución de las coberturas se encuentra una franja de gran extensión del bosque denso alto sobre toda la zona oriental, y un proceso de fragmentación sobre los márgenes occidentales, pero esta cobertura se encuentra conectada con coberturas naturales de herbazal y bosque de galería y ripario (ver Figura 11).

Tabla 10.

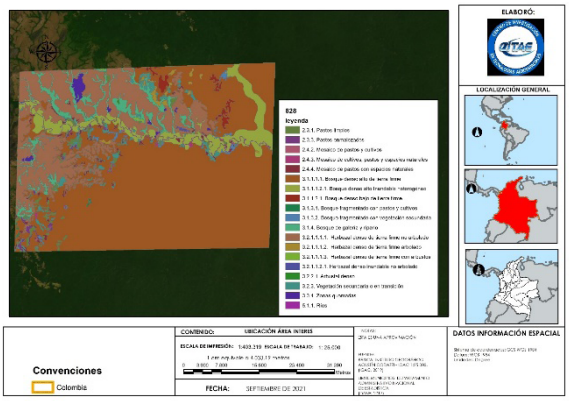
Coberturas 2018 de la imagen con ID 828

Cobertura	Área (ha)
Pastos limpios	2610,17
Pastos enmalezados	737,02
Mosaico de pastos y cultivos	67,51
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	374,05
Mosaico de pastos con espacios naturales	1860,72
Bosque de galería y ripario	8936,48
Vegetación secundaria o en transición	4097,29
Zonas quemadas	1425,04
Ríos	1005,13
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	142,76
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	938,37
Arbustal denso	31,54
Bosque denso alto de tierra firme	119134,38
Bosque denso bajo de tierra firme	1619,83
Bosque denso alto Inundable heterogéneo	13608,72
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	40756,91
Herbazal denso de tierra firme arbolado	1138,37
Herbazal denso de tierra firme con arbustos	131,48
Herbazal denso inundable no arbolado	160,99

Fuente: Elaboración propia

Figura 12.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 828 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 829**

La cobertura que tiene mayor área es la de bosque denso alto de tierra firme, que cuenta con 18.475 hectáreas o el 92%, el bosque denso alto inundable heterogéneo con 8.949 hectáreas, vegetación secundaria o en transición con 2.223 hectáreas, pastos limpios con 3.139 hectáreas (ver Tabla 10).

En general de la distribución espacial se encuentra una matriz en la que domina la cobertura de bosque denso alto de tierra firme, con parches de pastos limpios y enmalezados sobre la zona noroccidental, y una conexión con la cobertura de bosque denso alto inundable heterogéneo (ver Figura 12).

Tabla 11.

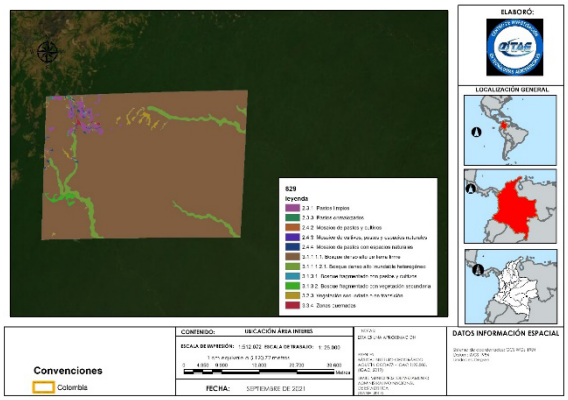
Coberturas 2018 de la imagen con ID 829

Cobertura	Área (ha)
Pastos limpios	3139,97
Pastos enmalezados	194,98
Mosaico de pastos y cultivos	157,64
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	267,92
Mosaico de pastos con espacios naturales	509,38
Vegetación secundaria o en transición	2223,77
Zonas quemadas	292,31
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	55,43
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	1015,69
Bosque denso alto de tierra firme	184175,23
Bosque denso alto Inundable heterogéneo	8949,22

Fuente: Elaboración propia

Figura 13.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 829 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 1381**

En las coberturas de la imagen 1381 se encuentra de los pastos limpios (21%), las zonas pantanosas, el mosaico de pastos y cultivos, y desde la distribución

espacial se observa una conexión entre las zonas pantanosas y el herbazal alto inundable, con intervención de la cobertura antrópica de pastos limpios (ver Tabla 11 y Figura 13).

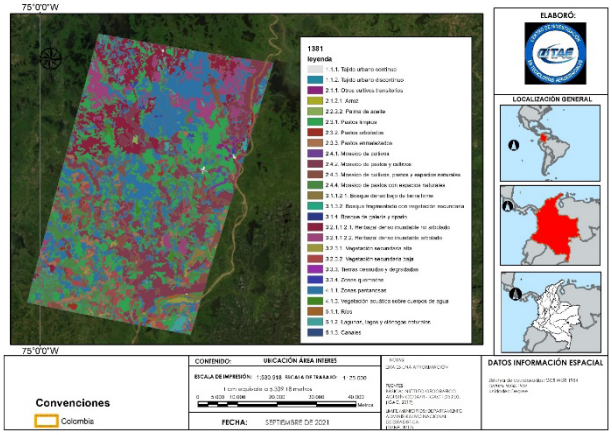
Tabla 12.
Coberturas 2018 de la imagen con ID 1381

Cobertura	Área **(ha)**
Tejido urbano continuo	279,88
Tejido urbano discontinuo	516,56
Otros cultivos transitorios	843,87
Pastos limpios	63413,44
Pastos arbolados	2084,54
Pastos enmalezados	10409,68
Mosaico de cultivos	685,58
Mosaico de pastos y cultivos	45658,50
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	15623,28
Mosaico de pastos con espacios naturales	23108,84
Bosque de galería y ripario	43,75
Tierras desnudas y degradadas	111,59
Zonas quemadas	734,50
Zonas pantanosas	63408,87
Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	2227,33
Ríos	3633,97
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	5604,51
Canales	311,87
Arroz	6,08
Palma de aceite	230,38
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	142,34
Vegetación secundaria alta	2053,11
Vegetación secundaria baja	14225,34
Bosque denso bajo de tierra firme	948,67
Herbazal denso inundable no arbolado	28563,09
Herbazal denso inundable arbolado	17750,95

Fuente: Elaboración propia

Figura 14.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 1381 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 1382**

En el área de la imagen 1382 se encuentran principalmente las coberturas de pasto limpios (24%) y el mosaico de pastos con espacios naturales (15%), zonas pantanosas (12%) y vegetación secundaria baja (11%) (ver Tabla 12 y Figura 14).

Tabla 13.

Coberturas 2018 de la imagen con ID 1382

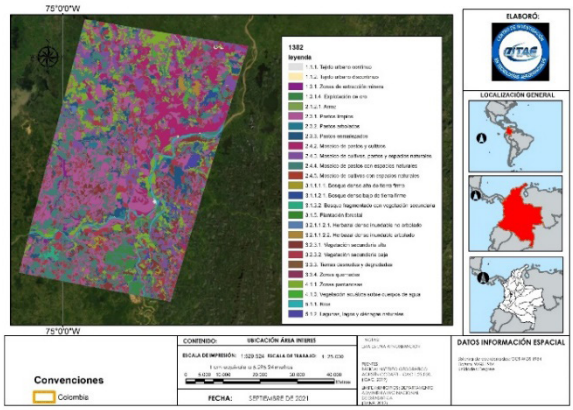
Cobertura	Área (ha)
Tejido urbano continuo	151,29
Tejido urbano discontinuo	220,95
Zonas de extracción minera	2725,31
Pastos limpios	71756,76
Pastos arbolados	2251,65
Pastos enmalezados	18026,44
Mosaico de pastos y cultivos	30359,05
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	17525,41
Mosaico de pastos con espacios naturales	44917,13

Cobertura	Área (ha)
Mosaico de cultivos con espacios naturales	319,74
Plantación forestal	130,65
Tierras desnudas y degradadas	71,69
Zonas quemadas	76,07
Zonas pantanosas	35642,10
Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	2576,20
Ríos	6184,29
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	5591,46
Explotación de oro	5322,58
Arroz	488,51
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	1213,88
Vegetación secundaria alta	14458,96
Vegetación secundaria baja	34456,40
Vegetación secundaria baja	264,01
Bosque denso alto de tierra firme	2180,26
Bosque denso bajo de tierra firme	948,67
Herbazal denso inundable no arbolado	353,69
Herbazal denso inundable arbolado	1548,61

Fuente: Elaboración propia

Figura 15.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 1382 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 1549**

En las coberturas de la imagen 1549 se encuentra principalmente el bosque denso alto de tierra firme con 337.900 hectáreas o el 69%, bosque denso alto inundable heterogéneo, herbazal abierto rocoso, y bosque denso bajo de tierra firme, y desde la distribución espacial se halla principalmente el dominio de las coberturas naturales (ver Tabla 13 y Figura 15).

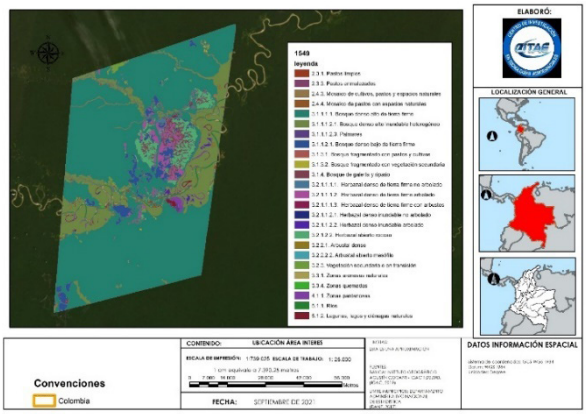
Tabla 14.
Coberturas 2018 de la imagen con ID 1549

Cobertura	Área (ha)
Pastos limpios	882,63
Pastos enmalezados	576,15
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	218,90
Mosaico de pastos con espacios naturales	1140,15
Bosque de galeria y ripario	7232,69
Vegetación secundaria o en transición	7184,54
Zonas arenosas naturales	1576,41
Zonas quemadas	229,44
Zonas pantanosas	2421,97
Rios	6239,02
Lagunas, lagos y cienagas naturales	2073,20
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	495,86
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	709,20
Arbustal denso	1733,67
Bosque denso alto de tierra firme	337900,21
Bosque denso bajo de tierra firme	16558,97
Herbazal abierto rocoso	19269,46
Arbustal abierto mesófilo	245,68
Bosque denso alto Inundable heterogeneo	71436,68
Palmares	547,80
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	829,79
Herbazal denso de tierra firme arbolado	10973,71
Herbazal denso de tierra firme con arbustos	808,22
Herbazal denso inundable no arbolado	101,61
Herbazal denso inundable arbolado	1319,14

Fuente: Elaboración propia

Figura 16.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 1549 para el año 2018



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 500**

En las coberturas de la imagen 500 para el año 2020 se encuentra principalmente la de bosque denso (13%), vegetación secundaria o en transición con 18833 hectáreas (11%), la de bosque fragmentado con 13975 hectáreas, y la de los ríos con 12803 hectáreas, y de la distribución de los parches de bosque se hallan sobre el centro y el extremo superior izquierdo (ver Tabla 14 y Figura 16).

Tabla 15.

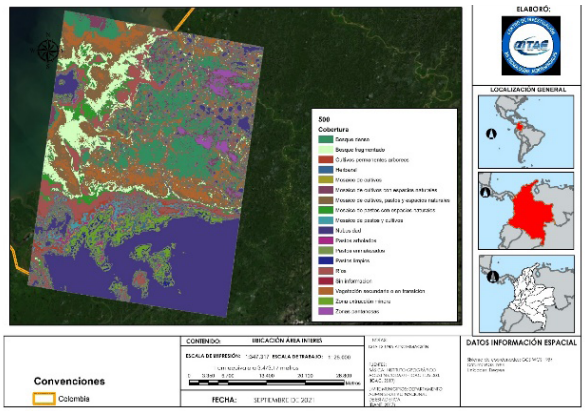
Coberturas 2018 de la imagen con ID 500

Cobertura	Área (ha)
Sin información	370,91
Zonas pantanosas	2752,13
Mosaico de cultivos con espacios naturales	6646,44
Bosque denso	22071,17
Vegetación secundaria o en transición	18833,94
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	14442,74
Bosque fragmentado	13975,14
Mosaico de pastos con espacios naturales	6599,26
Rios	12803,31
Cultivos permanentes arbóreos	3478,93
Mosaico de pastos y cultivos	3456,42
Pastos arbolados	2799,70
Mosaico de cultivos	2861,72
Herbazal	3088,94
Zona extracción minera	6443,47
Pastos limpios	2918,50
Pastos enmalezados	3404,92
Nubosidad	37912,65

Fuente: Elaboración propia

Figura 17.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 500 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 581**

En las coberturas de la imagen 581 para el año 2020 se halla principalmente la de pastos limpios con 38869 hectáreas (23%), bosque denso con 21.641 hectáreas (13%), vegetación secundaria o en transición con 17231 hectáreas, pastos enmalezados con 14.463 hectáreas (ver Tabla 15 y Figura 17).

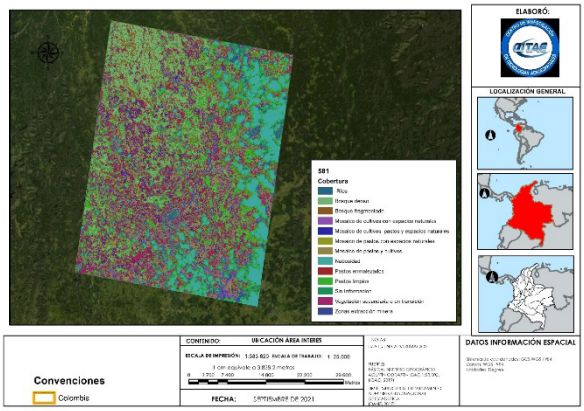
Tabla 16.
Coberturas 2018 de la imagen con ID 581

Cobertura	**Área (ha)**
Sin Información	390,581
Bosque fragmentado	7796,330
Bosque denso	21641,388
Pastos limpios	38869,164
Vegetación secundaria o en transición	17231,612
Pastos enmalezados	14463,838
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	13409,818
Mosaico de pastos con espacios naturales	11394,077
Mosaico de pastos y cultivos	10141,686
Mosaico de cultivos con espacios naturales	6544,709
Zonas extracción minera	5716,384
Ríos	7462,168
Nubosidad	16555,265

Fuente: Elaboración propia

Figura 18.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 581 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 604**

En las coberturas de la imagen 604 se halla el bosque denso con el 12 % o 19.133 hectáreas, el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales con 18.723 hectáreas, y en la dinámica espacial se puede visualizar que hay pastos enmalezados en los parches de bosque denso y fragmentado (ver Tabla 16 y Figura 18).

Tabla 17.

Coberturas 2020 de la imagen con ID 604

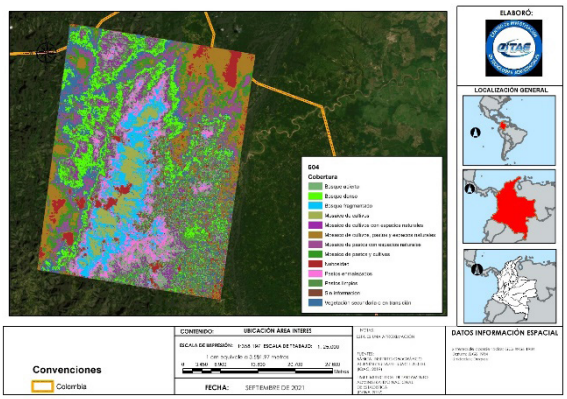
Cobertura	Área (ha)
Sin información	343,13
Mosaico de cultivos	7395,26
Bosque fragmentado	11277,89
Pastos enmalezados	10451,88
Bosque abierto	9680,94
Mosaico de cultivos con espacios naturales	10823,25
Pastos limpios	15069,39
Bosque denso	19133,54

Cobertura	Área (ha)
Vegetación secundaria o en transición	17792,36
Mosaico de pastos con espacios naturales	14745,37
Mosaico de pastos y cultivos	12660,10
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	18723,05
Nubosidad	7822,42

Fuente: Elaboración propia

Figura 19.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 604 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 605**

Para la imagen 605 se encuentra mayoritariamente la cobertura de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales con 30.552 hectáreas o el 20%, seguido por la plantación forestal con 18.593 hectáreas, pastos limpios con 12.205 hectáreas, arbustal con 11.848 hectáreas, y en la dinámica espacial se detalla que hay polígonos de bosque denso que están rodeados por el bosque fragmentado (ver Tabla 17 y Figura 19).

Tabla 18.

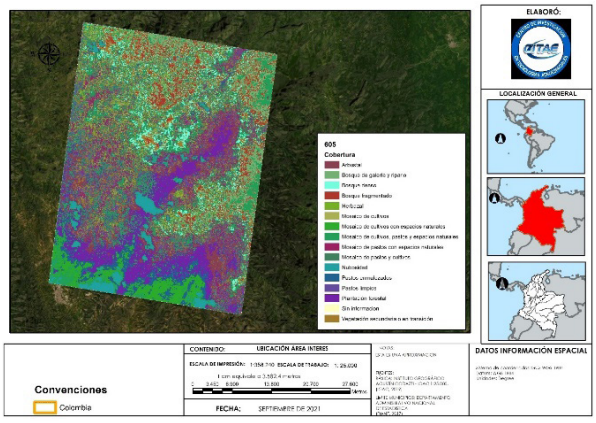
Coberturas 2020 de la imagen con ID 605

Cobertura	Área (ha)
Sin información	352,79
Bosque de galería y ripario	5676,35
Bosque fragmentado	6894,30
Vegetación secundaria o en transición	15195,23
Bosque denso	8790,55
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	30552,34
Mosaico de pastos y cultivos	8865,07
Mosaico de cultivos	5027,18
Mosaico de pastos con espacios naturales	8719,65
Herbazal	5816,71
Pastos limpios	12205,52
Arbustal	11848,29
Plantación forestal	18593,99
Pastos enmalezados	6385,81
Mosaico de cultivos con espacios naturales	6926,87
Nubosidad	4062,60

Fuente: Elaboración propia

Figura 20.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 605 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 810**

En la imagen 810 se halla la vegetación secundaria o en transición con el 26%, mosaico de pastos y cultivos con 14%, los pastos arbolados con el 12%, y en la dinámica espacial el bosque denso y fragmentado se encuentra rodeado en parte por el mosaico de pastos y cultivos (ver Tabla 18 y Figura 20).

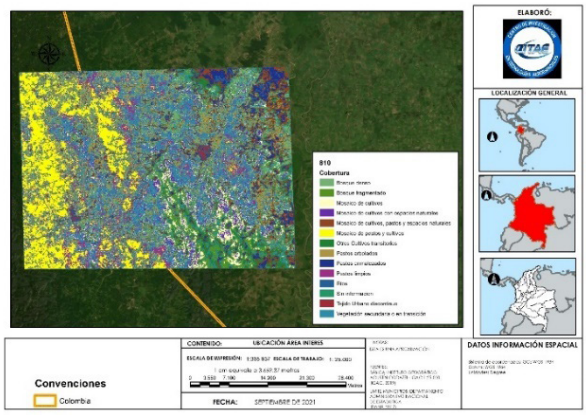
Tabla 19.
Coberturas 2018 de la imagen con ID 810

Cobertura	Área (has)
Sin información	399,23
Mosaico de pastos y cultivos	23781,97
Pastos limpios	10828,70
Vegetación secundaria o en transición	46623,57
Mosaico de cultivos con espacios naturales	10404,34
Pastos arbolados	20207,13
Mosaico de cultivos	8800,70
Bosque denso	12960,08
Bosque fragmentado	9369,47
Otros Cultivos transitorios	8454,58
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	10912,65
Pastos enmalezados	8645,00
Ríos	3604,60
Tejido Urbano discontinuo	1208,39

Fuente: Elaboración propia

Figura 21.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 810 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 811**

En la imagen 811 se encuentra principalmente el bosque denso con el 47%, continuando con los pastos limpios con el 20%, y la vegetación secundaria o en transición con el 12 % (ver Tabla 19 y Figura 21).

Tabla 20.

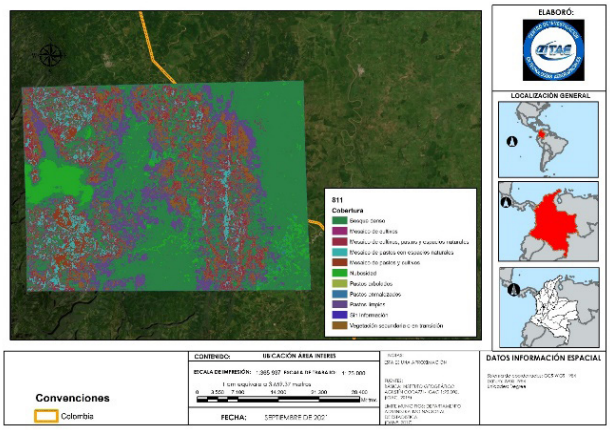
Coberturas 2020 de la imagen con ID 811

Cobertura	Área (ha)
Sin Información	398,73
Mosaico de pastos y cultivos	3202,96
Mosaico de pastos con espacios naturales	9103,44
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	14613,76
Vegetación secundaria o en transición	20391,69
Pastos enmalezados	736,24
Pastos limpios	34433,33
Pastos arbolados	31,51
Bosque denso	82543,54
Mosaico de cultivos	94,17
Nubosidad	10651,84

Fuente: Elaboración propia

Figura 22.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 811 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 812**

En la imagen 812 se encuentran las coberturas de áreas con vegetación herbácea y arbustiva con 20704 hectáreas, pastos limpios con 12111 hectáreas, y mosaicos de pastos con espacios naturales con 11537 hectáreas, también es evidente que en la zona central de la vegetación herbácea se encuentran parches de pastos limpios (ver Tabla 20 y Figura 22).

Tabla 21.

Coberturas 2020 de la imagen con ID 812

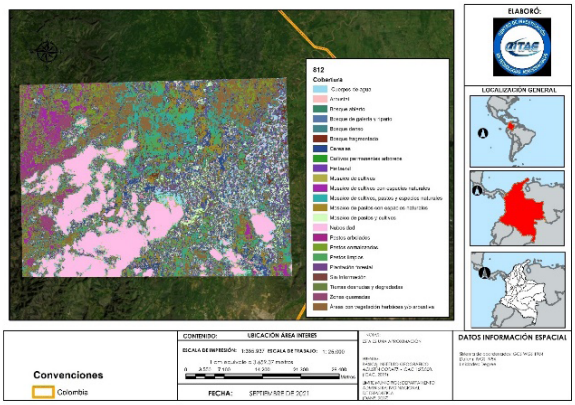
Cobertura	Área (ha)
Sin Información	399,01
Zonas quemadas	3005,62
Mosaico de cultivos con espacios naturales	5561,86
Pastos enmalezados	7091,68
Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	20704,04
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	12081,09
Pastos limpios	12111,03

Cobertura	Área (ha)
Bosque fragmentado	7707,31
Mosaico de pastos con espacios naturales	11537,34
Bosque de galería y ripario	6792,00
Cereales	9442,44
Herbazal	5414,78
Bosque denso	7791,23
Arbustal	5159,11
Mosaico de pastos y cultivos	6050,85
Pastos arbolados	3818,55
Tierras desnudas y degradadas	4775,52
Bosque abierto	2943,76
Plantación forestal	3325,41
Cultivos permanentes arbóreos	2206,42
Cuerpos de agua	8437,42
Mosaico de cultivos	3245,74
Nubosidad	28226,65

Fuente: Elaboración propia

Figura 23.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 812 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 827**

Para la imagen 827 sobre las coberturas se encuentra que el bosque denso representa el 24%, la vegetación secundaria o en transición, el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales con el 9%, los pastos limpios con el 8%, el herbazal con el 8%; y también se denota una presencia del bosque fragmentado (ver Tabla 21 y Figura 23).

Tabla 22.

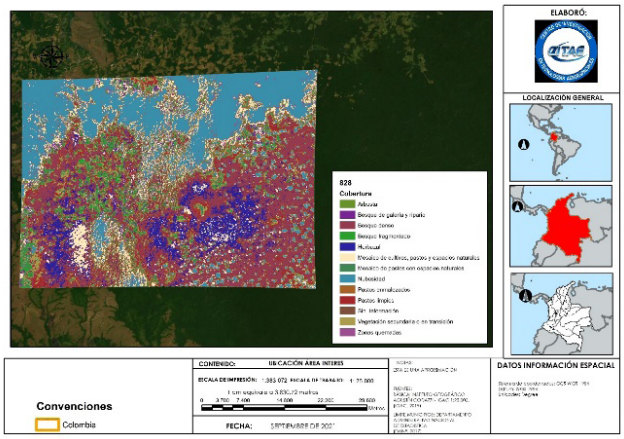
Coberturas 2020 de la imagen con ID 827

Cobertura	Área (ha)
Sin Información	459,34
Herbazal	16476,92
Bosque denso	47996,51
Pastos limpios	16517,66
Vegetación secundaria o en transición	13079,58
Mosaico de pastos con espacios naturales	11696,31
Bosque fragmentado	6686,40
Pastos enmalezados	6834,38
Bosque de galería y ripario	6109,70
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	18625,17
Arbustal	4858,62
Zonas quemadas	5609,52
Nubosidad	44381,17

Fuente: Elaboración propia

Figura 24.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 827 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 828**

Las coberturas que dominan en la imagen 828 son las de herbazal (15%), la de vegetación secundaria o en transición (14%), pastos limpios (11%), mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (10%) (ver Tabla 22 y Figura 24).

Tabla 23.

Coberturas 2020 de la imagen con ID 828

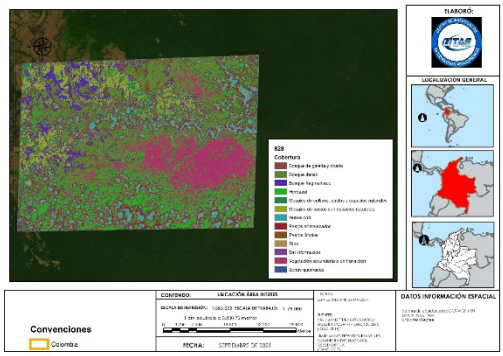
Cobertura	**Área (ha)**
Sin información	437,88
Vegetación secundaria o en transición	26940,39
Bosque denso	30058,98
Herbazal	29348,61
Pastos limpios	21232,85
Pastos enmalezados	10398,50
Bosque fragmentado	17757,69
Mosaico de pastos con espacios naturales	18697,66
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	19037,32

Cobertura	Área (ha)
Zonas quemadas	3595,63
Bosque de galería y ripario	6542,50
Ríos	8034,11
Nubosidad	6698,08

Fuente: Elaboración propia

Figura 25.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 828 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 829**

En la imagen 829 se hallan las coberturas de bosque denso con el 31%, seguido de la cobertura de bosque fragmentado con 22%, pastos limpios con 11%, y vegetación secundaria o en transición (9%), y en referencia a la dinámica espacial se visualiza que la vegetación secundaria o en transición se encuentra rodeada por mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (ver Tabla 23 y Figura 25).

Tabla 24.

Coberturas 2020 de la imagen con ID 829

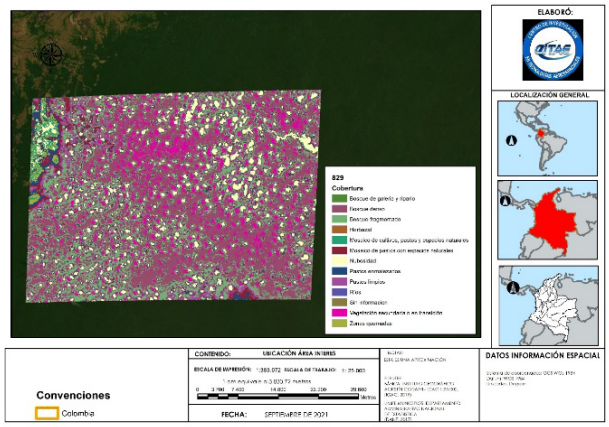
Cobertura	Área (ha)
Sin información	449,478
Vegetación secundaria o en transición	17745,533
Bosque denso	62158,188
Bosque fragmentado	43316,909

Cobertura	Área (ha)
Pastos limpios	22342,340
Mosaico de pastos con espacios naturales	13996,591
Pastos enmalezados	10487,701
Zonas quemadas	8029,157
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	7013,779
Nubosidad	6234,060
Nubosidad	9203,348

Fuente: Elaboración propia

Figura 26.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 829 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 1391**

En las coberturas de la imagen 1381 de acuerdo con la clasificación realizada sin supervisión, se encuentra que la cobertura de mayor área es la de pastos limpios con 41.793 hectáreas, y la de zonas pantanosas con 67.262 hectáreas o el 22%; y de acuerdo con la Figura 26 se puede visualizar que la vegetación secundaria o en transición, se encuentra rodeada por los pastos limpios y los pastos enmalezados (ver Tabla 24).

Tabla 25.

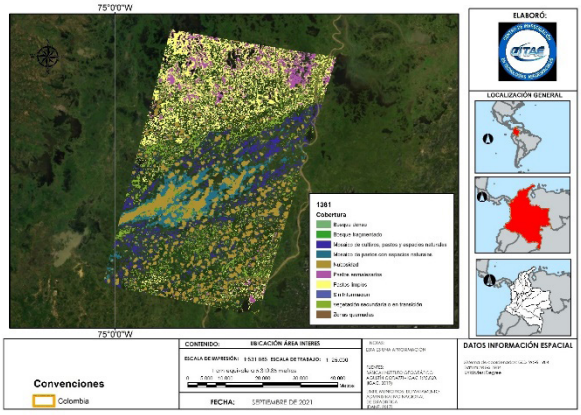
Coberturas 2020 de la imagen con ID 1381

Cobertura	Área (ha)
Sin información	664,631
Pastos enmalezados	14999,626
Pastos limpios	41793,806
Mosaico de pastos y cultivos	23709,449
Pastos arbolados	14374,301
Vegetación secundaria o en transición	16063,814
Mosaico de cultivos	12807,704
Otros cultivos transitorios	14307,925
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	16949,905
Herbazal	18898,376
Zonas pantanosas	67262,565
Mosaico de pastos con espacios naturales	18266,174
Bosque fragmentado	1244,057
Nubosidad	41277,572

Fuente: Elaboración propia

Figura 27.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 1381 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 1382**

En la imagen 1382, la cobertura que tiene mayor extensión es la de pastos limpios con 70.574 hectáreas (24%), vegetación secundaria o en transición con 32.525 hectáreas (11%), y mosaico de pastos con espacios naturales con el 7% (ver Tabla 25 y Figura 27).

Tabla 26.

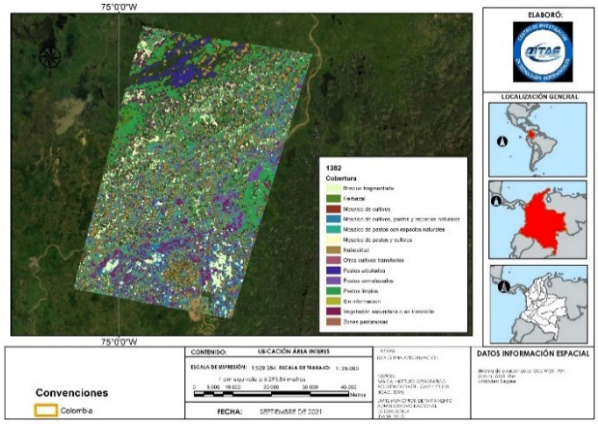
Coberturas 2020 de la imagen con ID 1382

Cobertura	Área (ha)
Sin información	666,35
Bosque fragmentado	7608,28
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	14298,28
Vegetación secundaria o en transición	32525,12
Pastos enmalezados	18091,59
Mosaico de pastos con espacios naturales	20730,99
Zonas pantanosas	19938,85
Pastos limpios	70574,52
Mosaico de pastos y cultivos	18674,85
Ríos	17358,90
Zonas extracción minera	5840,43
Herbazal	10148,49
Plantación forestal	9632,53
Pastos arbolados	10896,49
Cereales	10332,03
Mosaico de cultivos con espacios naturales	9732,81
Nubosidad	22706,64

Fuente: Elaboración propia

Figura 28.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 1382 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

- **Imagen ID 1549**

En las coberturas de la imagen 1549, la de mayor predominancia es la de bosque denso con 252387 hectáreas (52%), el herbazal con 90.155 hectáreas, las zonas pantanosas con 71.949 hectáreas, la vegetación secundaria o en transición con 25.152 hectáreas (ver Tabla 26 y Figura 28).

Tabla 27.

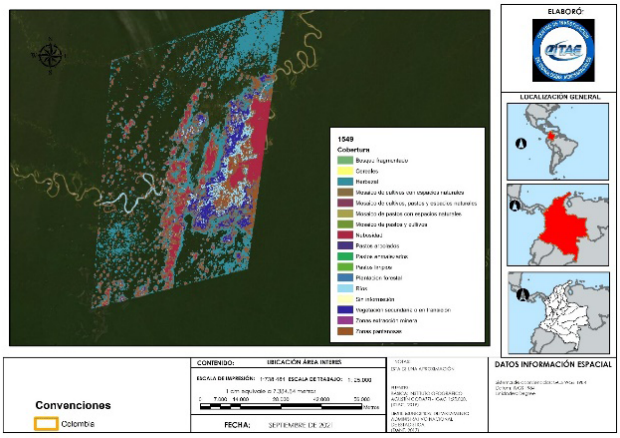
Coberturas 2020 de la imagen con ID 1549

Cobertura	**Área (ha)**
Sin información	1082,04
Herbazal	90155,07
Bosque denso	252387,01
Nubosidad	31889,65
Bosque de galería y ripario	959,53
Vegetación secundaria o en transición	25152,21
Zonas pantanosas	71949,16
Ríos	16484,99

Fuente: Elaboración propia

Figura 29.

Mapa de las coberturas de la imagen FACSAT-1 con ID 1549 para el año 2020



Fuente: Elaboración propia

4. DISCUSIÓN

En general, en la Figura 29 se observa que para el año 2020 y dadas las características de las imágenes, hay una interferencia de las coberturas de nubosidad sobre gran parte de las imágenes, lo que genera áreas sin información.

En la mayoría de las imágenes utilizadas en el proyecto, prevalece la cobertura de bosque denso alto. Esto se debe a que, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014), Colombia cuenta con 59,9 millones de hectáreas de bosque natural, equivalente al 52% de su territorio, siendo Colombia el tercer país de Suramérica con mayores áreas de bosques (ver Tabla 27).

También, se presentan amplias coberturas de mosaico de pastos y cultivos. Contrastándolo con información alterna, vemos que, según Agronegocios (2020), 5.3 millones de hectáreas se destinan a este tipo de actividades.

Se puede observar en cada uno de los mapas de cobertura que dependiendo de la región se presentan diferentes tipos de coberturas. Esto depende de la altura sobre el nivel del mar y la temperatura, que difieren en cada región. De acuerdo con Ecured (2021), existe una estrecha relación entre la vegetación y el clima. Incluso se llega a dar nomenclatura a los climas según el tipo de vegetación que

crece en la zona donde imperan, como los climas de selva, sabana y taiga.

5. CONCLUSIONES

Se presentan los productos de mapas de cobertura de la tierra a partir de imágenes satelitales FACSAT-1 con una resolución espacial de 30 m x 30 m del territorio colombiano, en el período comprendido de 2018 a 2020. Estos mapas se generaron utilizando procedimientos de clasificación no supervisada y la metodología CORINE Land Cover para realizar el inventario de la cobertura de la tierra, lo que permitió obtener áreas específicas de los diferentes tipos de cubiertas.

La generación de estos mapas de cobertura tiene un gran impacto para el país. Los resultados de este trabajo se basan en información adquirida por un activo estratégico colombiano, abriendo las puertas al desarrollo aeroespacial y evidenciando ampliamente sus beneficios.

6. REFERENCIAS

AGRONEGOCIOS *(2020). Los cultivos con mayor número de hectáreas se concentran en el café, palma y arroz*. Retrieved September 11, 2022, from https://www.agronegocios.co/agricultura/los-cultivos-con-mayor-numero-de-hectareas-se-concentran-en-el-cafe-palma-y-arroz-3033622

Alvarado-Solano, D. P., & Otero Ospina, J. T. (2015). Spatial distribution of tropical dry forest in Valle del Cauca, Colombia. *Acta Biologica Colombiana*, *20*(3), 141–153. https://doi.org/10.15446/abc.v20n2.46703

Aguiar Cardenas, J. S. (2021). Generación de insumos técnicos de 7 humedales no reconocidos de la Vereda Canoas que aporten a su reconocimiento e incorporación en la estructura ecológica principal del Municipio de Soacha – Cundinamarca. Recuperado de: http://hdl.handle.net/11349/27836.

Batravil, R., Escuela, A., Panamericana, A., & Honduras, Z. (1990). *Evaluación del cambio de cobertura boscosa en seis áreas protegidas de Honduras en el periodo 1990-2010*.

Corredor Jiménez, S. H. (2019). Revisión y comparación del índice de fragmentación de coberturas naturales para cuatro cuencas hidrográficas en estudio. Recuperado de: http://hdl.handle.net/11349/22764.

Cifuentes, A. K. & Niño, N. S. (2022). Terrorismo ambiental: una modalidad distinta de terrorismo accionada en Colombia (2015-2020). Recuperado de: http://hdl.handle.net/20.500.12495/7451.

Garavito Sánchez, J. D. (2017). Clasificación de uso y cobertura del suelo Corine Land Cover y elaboración de cartografía temática como sustentación a él plan general de ordenación forestal (PGOF) y a la fase de diagnóstico del plan de ordenación de cuencas Río Loro y Rio Las Ceibas en el departamento de Huila. Recuperado de: http://hdl.handle.net/11349/5897.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. Science, 309(5734), 570-574. https://doi.org/10.1126/science.1111772

Gil, J. L., García, E. B., Ponvert-Delisles, D. R., Sánchez, R., & Vega, M. B. (n.d.). *Enfoques para la clasificación digital de imágenes mono y multiespectrales y su implementación en el software cubano TN Estudio V2.0*.

González-González, A., Clerici, N., & Quesada, B. (2022). A 30 m-resolution land use-land cover product for the Colombian Andes and Amazon using cloud-computing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *107*. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102688

González-González, A., Villegas, J. C., Clerici, N., & Salazar, J. F. (2021). Spatial-temporal dynamics of deforestation and its drivers indicate need for locally-adapted environmental governance in Colombia. *Ecological Indicators*, *126*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107695

Gutiérrez Gil, A. Marcela, & Briceño Zuluaga, P. D. Francisco Javier. (2021). Análisis Multicriterio para la Ubicación de un Relleno Sanitario para los Municipios de Mocoa, Villagarzón y Puerto Caicedo en el Departamento de Putumayo [Multi-Criteria Analysis for the Location of a Sanitary Landfill for the Municipalities of Mocoa, Villagarzón, and Puerto Caicedo in the Department of Putumayo]. Tesis de Especialización en Geomática, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, junio de 2021.

IDEAM. (2012). *METODOLOGÍA DE REINTERPRETACIÓN - I*Retrieved September 11, 2022, from http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-de-reinterpretacion

IDEAM. (n.d.). *Deforestación en Colombia* - Retrieved September 9, 2022, from http://www.ideam.gov.co/web/bosques/deforestacion-colombia

Infografía Imagen. (n.d.). Retrieved September 11, 2022, from https://www.eltiempo.com/infografias/2018/11/satelite_facsat1/desktop/infografia.html

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (Colombia). (2013). *Analisis de dinamicas de Cambio de las coberturas de la tierra en Colombia, escala 1:100.000, periodos: 2000-2002 y 2005-2009 : datos generados a partir de la aplicacion de la metodologia corine, land cover adaptada para Colombia*.

Martínez Ardila, N. Javier., & Murcia García, U. Gonzalo. (n.d.). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra : metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia : escala 1:100.00*.

Minambiente (s.f.). Importancia de los bosques, Colombia tercer país de la región en cobertura boscosa - Red de Desarrollo Sostenible de Colombia. (n.d.). Retrieved September 11, 2022, from https://www.rds.org.co/es/novedades/importancia-de-los-bosques-colombia-tercer-pais-de-la-region-en-cobertura-boscosa

Minciencias. (2016). *Colombia, el segundo país más biodiverso del mundo* | Retrieved September 8, 2022, from https://minciencias.gov.co/sala_de_prensa/colombia-el-segundo-pais-mas-biodiverso-del-mundo

Nijhawan, R., Srivastava, I., & Shukla, P. (2018). Land cover classification using super-vised and unsupervised learning techniques. *ICCIDS 2017 - International Conference on Computational Intelligence in Data Science, Proceedings*, *2018-January*, 1–6. https://doi.org/10.1109/ICCIDS.2017.8272630

Núñez-Avellaneda, L. A., Castro, M. I., Mestre, G., & Lozano, L. (2019). Los bosques de galería conectores de vida. *Ámbito Investigativo*, *4 (1)*(1), 14–19.

Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en condición. Hotspot y Global Climatic Tensor. Introducción. (n.d.). Retrieved September 11, 2022, from https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/18927

Polanco, J. A., & de Mesa, L. (2012). *TELEDETECCIÓN DE LA VEGETACIÓN DEL PÁRAMO DE BELMIRA CON IMÁGENES LANDSAT REMOTE SENSING ANALYSIS OF BELMIRA'S PARAMO VEGEATATION WITH LANDSAT IMAGERY*. *79*, 222–231.

Popovici, Elena Ana & Balteanu, Dan & Kucsicsa, Gheorghe. (2013). Assessment of changes in land-use and land-cover pattern in Romania using CORINE Land Cover database. Carpathian journal of earth and environmental sciences. 8. 195-208.

Ruggeri, S., Henao-Cespedes, V., Garcés-Gómez, Y. A., & Parra Uzcátegui, A. (2021a). Optimized unsupervised CORINE Land Cover mapping using linear spectral mixture analysis and object-based image analysis. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *24*(3), 1061–1069. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.10.009

Ruggeri, S., Henao-Cespedes, V., Garcés-Gómez, Y. A., & Parra Uzcátegui, A. (2021b). Optimized unsupervised CORINE Land Cover mapping using linear spectral mixture analysis and object-based image analysis. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *24*(3), 1061–1069. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.10.009

Soto Vega, P. J., Costa, G. A. O. P. da, Feitosa, R. Q., Ortega Adarme, M. X., Almeida, C. A. de, Heipke, C., & Rottensteiner, F. (2021). An unsupervised domain adaptation approach for change detection and its application to deforestation mapping in tropical biomes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *181*, 113–128. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.08.026

Suárez-Parra, K. v., Cély-Reyes, G. E., & Forero-Ulloa, F. E. (2016a). Validación de la metodología Corine Land Cover (CLC) para determinación espacio-temporal de coberturas: caso microcuenca de la quebrada Mecha (Cómbita, Boyacá), Colombia. *Biota Colombiana*, *17*(1), 1–15. https://doi.org/10.21068/c2016v17r01a01

Suárez-Parra, K. v., Cély-Reyes, G. E., & Forero-Ulloa, F. E. (2016b). Validación de la metodología Corine Land Cover (CLC) para determinación espacio-temporal de coberturas: caso microcuenca de la quebrada Mecha (Cómbita, Boyacá), Colombia. *Biota Colombiana*, *17*(1), 1–15. https://doi.org/10.21068/c2016v17r01a01

Tsendbazar, N., Herold, M., Li, L., Tarko, A., de Bruin, S., Masiliunas, D., Lesiv, M., Fritz, S., Buchhorn, M., Smets, B., van de Kerchove, R., & Duerauer, M. (2021). Towards operational validation of annual global land cover maps. *Remote Sensing of Environment*, *266*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112686

Vegetación - EcuRed. (n.d.). Retrieved September 11, 2022, from https://www.ecured.cu/Vegetaci%C3%B3n

Wehrmann, T., Dech, S., & Glaser, R. (2004). An automated object-based classification approach for updating CORINE land cover data. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IV*, *5574*, 100. https://doi.org/10.1117/12.565234

Valencia Hernández, G. M., & Anaya Acevedo, J. A. (1). Implementación de la metodología Corine Land Cover con imágenes Ikonos. Revista Ingenierías Universidad De Medellín, 8(15), 39-52. Retrieved from https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/245

World Meteorological Organization. (n.d.). R*The Global Observing System for Climate: Implementation Needs | R*etrieved September 11, 2022, from https://public.wmo.int/en/resources/library/global-observing-system-climate-implementation-needs

Yepes Quintero, A.; Duque-Montoya Á.; Navarrete-Encinales, D; Phillips-Bernal, J.; CabreraMontenegro, E.; Corrales-Osorio, A.; Álvarez-Dávila, E.; Galindo-García, G.; García-Dávila, M.C.; Idárraga, A.; Vargas-Galvis, D. (2011). Estimación de las reservas y pérdida de carbono por deforestación en el periodo 2000-2007 en los bosques

del departamento de Antioquia, Colombia. Revista Actualidades Biológicas 33(95): 193-208.

Zonificación de las coberturas de la tierra mediante la aplicación de herramientas SIG para la revisión y ajuste del P.O.T en el marco del crecimiento urbano y la conurbación norte: caso Municipio de Zipaquirá - hdl:11349/25625. (n.d.). Retrieved September 11, 2022, from https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25625

CAPÍTULO 11

SISTEMA DE RECEPCIÓN Y DECODIFICACIÓN DE IMÁGENES ATMOSFÉRICAS PROVENIENTES DE SATÉLITES METEOROLÓGICOS DE ÓRBITA BAJA

Juan David Bautista Muñoz
https://orcid.org/0000-0002-0209-1925
juan.bautista01@uptc.edu.co

Fabian Rolando Jiménez López
https://orcid.org/0000-0003-4507-2035
fabian.jimenez02@uptc.edu.co

Oscar Fernando Vera Cely
https://orcid.org/0000-0002-0008-8343
oscar.vera@uptc.edu.co

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Resumen

El monitoreo del clima es una de las tareas globales más importantes en la actualidad y, por lo tanto, una de las que ha experimentado un mayor desarrollo tecnológico. Los satélites meteorológicos son herramientas fundamentales para el seguimiento climatológico, ya que proporcionan imágenes e información valiosa al respecto. Este proyecto se centra en el diseño e implementación de un sistema de recepción de imágenes satelitales en la banda de muy alta frecuencia (VHF) provenientes de satélites meteorológicos de órbita baja, como el NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19 y Meteor M2. Se ha desarrollado un modelo de sistema de seguimiento de satélites meteorológicos basado en rotores Yaesu G-5500 para el control de la azimut y elevación, la recepción de señales transmitidas en VHF a través de una antena Eggbeater, la demodulación de la señal mediante el uso de software definido por software (SDR) y la decodificación de imágenes del sistema NOAA en formato APT y del satélite Meteor-M2 en formato LRTP, utilizando software de código abierto. Este sistema se ha implementado en la estación terrena de la UPTC, donde se ha realizado un análisis de las potencias de señal recibida desde los satélites, tanto con amplificación como sin ella. La visibilidad de los satélites ha permitido obtener imágenes que abarcan una superficie de aproximadamente 15 millones de kilómetros cuadrados en Centroamérica, el Caribe y parte del norte y centro de América del Sur.

Palabras clave: Transmisión automática de Imágenes (APT), Satélites meteorológicos, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Meteor, Transmisión de imágenes a baja velocidad (LRPT), Estación terrena.

Abstract.. Weather monitoring is one of the most important and technologically developed global tasks today. The weather satellites are a great tool for weather monitoring, providing useful images and data in this regard. This project is focused on the design and implementation of a satellite image reception system on VHF band, coming from Low Earth Orbit weather satellites such as NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19 and Meteor M2. Achieving a model of weather satellite tracking system based on Yaesu G-5500 azimuth and elevation rotors, reception of signals transmitted in the VHF band by means of an Eggbeater antenna, signal demodulation using SDR and decoding of NOAA system images on APT format, and Meteor-M2 satellite in LRTP

format, using free software. The system was implemented at the UPTC ground station, where the respective analysis of the power received from the satellites was carried out, with and without amplification was carried out, and its visibility allowed obtaining images with an approximate area of 15 million square kilometers of part from Central America, the Caribbean, and northern and central part of South America.

Palabras clave: Automatic Picture Transmission (APT), Ground Station, Meteor, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Low Rate Picture Transmission (LRPT), Weather satellites.

1. INTRODUCCIÓN

Desde los primeros días de la humanidad, el interés por comprender y predecir los fenómenos meteorológicos ha sido evidente. Los primeros observadores del cielo comenzaron a desarrollar reglas primitivas que les permitieran anticipar cambios climáticos [1].

La meteorología ha sido una de las disciplinas que más se ha beneficiado de los avances en la exploración espacial. En 1960, tan solo tres años después del lanzamiento del Sputnik 1, se llevó a cabo la primera observación del clima atmosférico desde el espacio con el satélite meteorológico TIROS-1. Este hito representó el primer paso experimental de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA) para evaluar el potencial de los satélites en el estudio de la Tierra [2].

Desde entonces, se han desarrollado numerosas misiones destinadas a observar y analizar el clima terrestre desde el espacio. En la actualidad, aproximadamente 25 satélites meteorológicos están en funcionamiento, orbitando tanto en órbitas geoestacionarias como polares. Estas misiones incluyen los satélites GOES y NOAA de Estados Unidos, los satélites Fengyun de China, los satélites Meteor de Rusia, y los satélites MetOp y Meteosat de la Unión Europea. Cada uno de estos satélites está equipado con cargas útiles específicas para la recopilación de datos climáticos, incluyendo sensores que capturan información en diversas bandas del espectro electromagnético, como el infrarrojo cercano, medio y térmico [3].

La Estación Terrena Satelital de la UPTC dispone de antenas VHF y UHF para el seguimiento de satélites CubeSat, sin embargo, se ha identificado una baja utilización de esta infraestructura [4].

Este documento presenta el diseño e implementación de un sistema destinado a la recepción y decodificación de imágenes atmosféricas de satélites meteorológicos de órbita baja, en alta y baja resolución. El objetivo principal de este proyecto es aumentar la utilización de la Estación Terrena y proporcionar datos meteorológicos que puedan beneficiar a la comunidad, ofreciendo información relevante sobre el clima y otros fenómenos relacionados.

2. SATÉLITES METEOROLÓGICOS

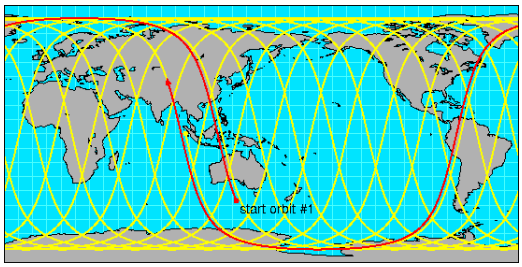
Se cuenta con 2 tipos de satélites meteorológicos en la actualidad según su órbita: geoestacionarios y polares.

Los satélites geoestacionarios orbitan a una distancia aproximada de 36 000 km del ecuador terrestre; orbitando a la misma velocidad de la Tierra, por lo que siempre miran a un solo lado del planeta, lo que permite que el satélite capte imágenes del mismo lugar, cada 30 minutos [5].

Un satélite de órbita polar, que gira alrededor de la Tierra a una altitud entre 800 km y 900 km, a una velocidad de 7 a 8 km/s, monitorea aproximadamente el mismo punto de la Tierra dos veces al día, y pueden brindar imágenes detalladas de la Tierra por su cercanía a la misma.

Figura 1.

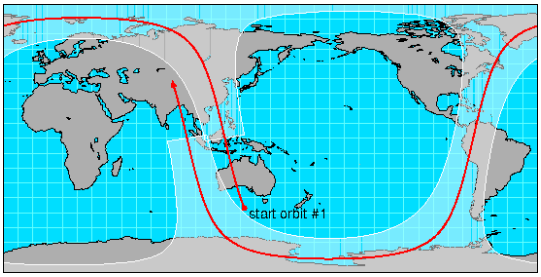
Trayectorias alrededor del globo para un satélite de órbita polar



Fuente: http://tornado.sfsu.edu/geosciences/classes/m415_715/Monteverdi/Satellite/PolarOrbiter/Polar_Orbits.html

Poseen un desfase en sus trayectorias, que permite escanear toda la superficie terrestre cada medio día (ver la Figura 1), y a diferencia de los satélites geoestacionarios, estos pueden escanear los polos de la tierra, ofreciendo datos importantes sobre el cambio climático (ver Figura 2).

Figura 2.
Trayectoria de una vuelta de un satélite polar alrededor de la tierra



Fuente: http://tornado.sfsu.edu/geosciences/classes/m415_715/Monteverdi/Satellite/PolarOrbiter/Polar_Orbits.html

Este artículo se enfoca en 4 satélites polares, NOAA 15, NOAA 18, NOAA 19 y Meteor-M2 con las características expuestas en la Tabla 1.

Tabla 1.
Características de los satélites polares con transmisión de imágenes en VHF

Satélite	NOAA-15	NOAA-18	NOAA-19	Meteor-M2
Nombre oficial	NOAA-K	NOAA-N	NOAA-N Prime	Meteor-M Numero 2
Fecha de lanzamiento	05 / 13 / 1998	05 / 20 / 2005	02 / 06 / 2009	08 / 07 / 2014
País	EE. UU	EE. UU	EE. UU	Rusia.
Periodo orbital	101.1 min	102.12 min	102.14 min	101.4 min
Inclinación	98.5°	98.74°	98.7°	98.47°
Altitud.	807 km	854 km	870 km	835 km
Peso	1 479 kg	1 479 kg	1 440 kg	2 900 kg
Velocidad	7,455 km/s	7,42 km/s	7,421 km/s	7,446 km/s
Sensor	AVHRR/3	AVHRR/3	AVHRR/3	MSU-MR
Modulación en VHF e información	AM/FM-APT	AM/FM-APT	AM/FM-APT	QPSK-LRPT

Frecuencia de transmisión	137,62 MHz	137,9125MHz	137,1 MHz	137.1 MHz
Resolución	4 km/píxel	4 km/píxel	4 km/píxel	1,09 km/ píxel
Velocidad de trasmisión de datos	2 líneas por segundo.	2 líneas por segundo.	2 líneas por segundo.	6 líneas por segundo. (72 kbps)
Ancho de banda	38 kHz	38 kHz	38 kHz	150 kHz
Polarización	RHCP	RHCP	RHCP	RHCP

Fuente: Elaboración propia

- **Formato APT y LRPT**

Los satélites meteorológicos tienen un formato especial para la transmisión de sus imágenes en VHF.

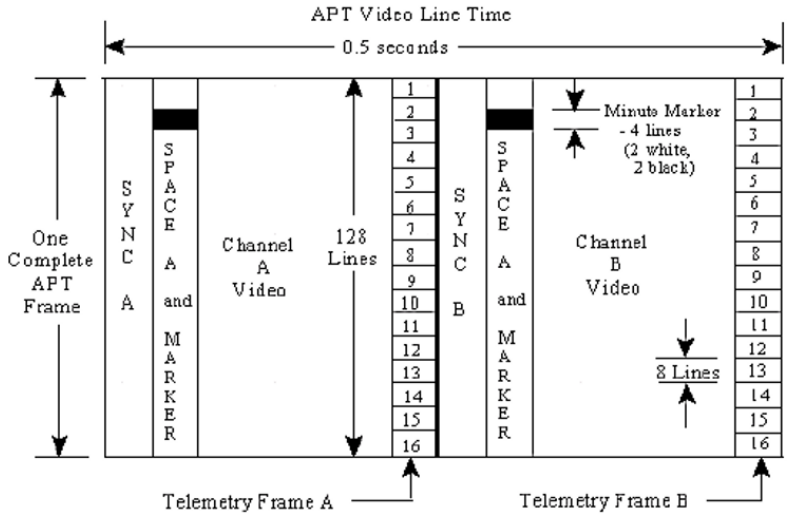
- **Formato de Transmisión Automática de Imágenes (APT, Automatic Picture Transmission)**

Las imágenes atmosféricas generadas por estos satélites se obtienen a través del Radiómetro Avanzado de muy Alta Resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés), un instrumento clave diseñado para capturar datos en el espectro visible e infrarrojo. La señal APT (Transmission por Pulso Analógico) se deriva de los datos digitales originales capturados por el sensor AVHRR. Esta señal se multiplexa de manera que solo dos de los canales originales se presenten en formato APT, es decir, los canales infrarrojo y visible. Este proceso de multiplexado se realiza en el satélite mismo, utilizando cada tercera línea de exploración de los datos digitales HRPT (High-Resolution Picture Transmission), que se producen a una velocidad de 360 líneas por minuto. La señal APT modula la amplitud de un tono de 2.4 kHz, y la velocidad de escaneo de esta señal es de 120 líneas por minuto, es decir, 2 líneas por segundo.

Cada cuadro de imagen, similar al que se muestra en la figura 3, requiere 64 segundos para ser recibido, lo que equivale a 128 líneas de datos. Cada línea de datos de imagen tiene una duración de 500 ms y se divide en 250 ms de datos infrarrojos y 250 ms de datos de luz visible, representados en una escala de grises de 8 bits.

Figura 3.

Formato de telemetría empleado en la transmisión APT satelital



Fuente: NOAA - User's Guide for Building and Operating Environmental Satellite Receiving Stations

Para el escaneo Infrarrojo, los objetos de la superficie de la tierra captados por el satélite aparecen en tonos gris oscuro o negros si se trata de objetos cálidos, para objetos fríos, estos aparecen en tonos gris claro o blanco.

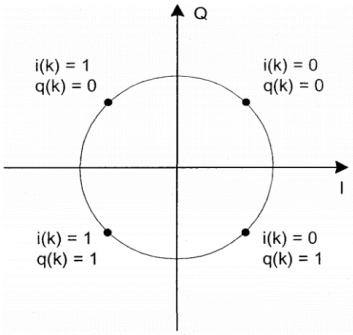
El escaneo de luz visible usa la luz reflejada por la superficie de la tierra, las nubes y los océanos, las nubes en la imagen se observan en varios tonos de blanco, el agua en negro, y la tierra en diversos tonos de gris [7].

- **Formato de Transmisión de Imágenes de Baja Velocidad (LRPT, Low-Rate Picture Tranmission)**

LRPT es un sistema de datos totalmente digital, en modulación QPSK a diferencia del AM/FM del APT.

Figura 4.

Diagrama de constelación QPSK codificado a Gray para datos de LRTP



Fuente: http://mdkenny.customer.netspace.net.au/METOP_HRPT_LRPT.pdf.

La transmisión LRPT es similar a la transmisión HRPT, con la diferencia, que, los datos de imagen LRPT se comprimen. Se requiere tanto software como hardware para realizar la demodulación, sincronización de bits y procesamiento del flujo de datos codificados. A pesar de la complejidad de su formato, ofrece mejor resolución que el formato APT [8].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación, se ha seguido una metodología que combina enfoques documentales y experimentales. El enfoque documental se ha centrado en la transmisión de imágenes de satélites meteorológicos de órbita baja (LEO) a través de señales VHF, haciendo hincapié en el uso de antenas adecuadas para esta transmisión. Esto implica el estudio de literatura, documentos técnicos y fuentes de información que aborden el funcionamiento y los componentes necesarios para la recepción de estas señales.

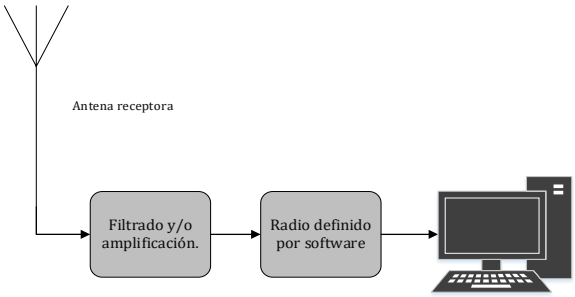
Además, se ha utilizado un enfoque experimental cuantitativo para llevar a cabo cálculos y simulaciones relacionados con los factores que influyen en la transmisión y recepción de imágenes atmosféricas de satélites meteorológicos LEO. Esta parte experimental implica la recopilación de datos empíricos y mediciones, así como la evaluación de los parámetros técnicos necesarios para un enlace exitoso.

Para desarrollar un sistema de recepción y decodificación de imágenes atmosféricas de satélites meteorológicos de órbita baja, se han tenido en cuenta una serie de requisitos que guían el proceso. Estos requisitos son fundamentales para garantizar el funcionamiento y la efectividad del sistema y pueden incluir aspectos técnicos, de hardware, software y procedimientos operativos.

- Una antena VHF con una frecuencia central de 137,5 MHz aproximadamente, apta para polarización RHCP.
- Un filtro pasa banda entre 137MHz y 138MHz.
- Un amplificador de bajo ruido apto para VHF.
- Un Radio Definido por Software.
- Un computador.

Figura 5.

Estructura basada en radio definido por software para la recepción de señales de satélites meteorológicos de orbita LEO en VHF



Fuente: Elaboración propia

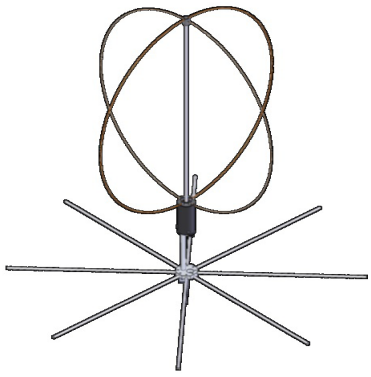
- **Antena**

La antena idónea para la recepción de señales en VHF de los satélites meteorológicos de órbita baja, es una cuya polarización sea circular derecha (RHCP), que tenga una frecuencia central de 137,5 MHz.

Para cumplir con los requerimientos del sistema, se empleó una antena Eggbeater, ideal para recepción satelital en VHF.

Esta antena posee un par de dipolos cerrados con longitud de λ, que están desfasados 90° tanto geométrica como eléctricamente; con esta configuración se tiene una antena con polarización circular y omnidireccional (ver Figura 7). Que trabajar tanto en RHCP como en LHCP al conmutar las conexiones de los bucles. Cada uno de los dipolos tiene una impedancia de 100Ω que al acoplarlos en paralelo se obtiene una impedancia de 50Ω.

Figura 6.
Antena Eggbeater con reflectores a λ/8



Fuente: https://www.m2inc.com/FGEB144RK2M

La antena Eggbeater empleada es de la empresa M2 Antenna Systems Inc; y cuenta con las características expuestas en la Tabla 2.

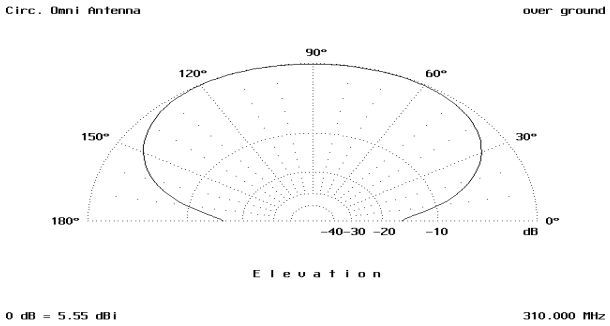
Tabla 2. *Características de la antena Eggbeater usada para el proyecto*

Modelo	EB-144/RK2M
Rango de frecuencias	135 - 150 MHz
Ganancia a 90°	5.5 dBic
Impedancia	50Ω
VSWR	<2.0:1
VSWR	1.2:1 entre 144 y 148MHz
Patrón de radiación	Omnidireccional
Polarización	RHCP

Fuente: https://www.m2inc.com/FGEB144RK2M

Figura 7.

Patrón de radiación de la antena EB-144/RK2M



Fuente: https://www.m2inc.com/FGEB144RK2M

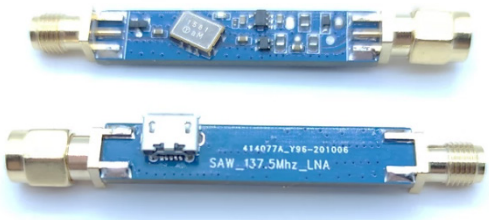
- **Filtrado y Amplificación**

La señal de un satélite de órbita baja en VHF se ve significativamente afectada por el clima, el ruido, estaciones de radio, diferentes servicios en la misma banda, entre otros factores.

En el sistema se equipó con un LNA+ BPF compacto (ver Figura 8), el cual cuenta con un ancho de banda de aproximadamente 1,8 MHz, una frecuencia central de 137,5 MHz, y una banda de atenuación de 135,5 MHz a 136 MHz y de 138,3 MHz a 139,5 MHz, asegura una ganancia proporcional de 30dB a 134 MHz y 23dB a 141MHz, además cuenta con una impedancia de salida de 50Ω.

Figura 8.

LNA+BPF empleado en el sistema



Fuente: https://www.aliexpress.com/item/1005001627969372.html

➢ Radio definido por software

El SDR AirSpy R2 empleado en el sistema (ver Figura 9), ofrece un ancho de banda hasta de 10MHz y opera en un rango de frecuencias de 24 a 1700 MHz, se puede configurar su muestreo a 10MSPS o 2.5MSPS. Opera con un procesador Cortex de 32 bits y un ADC de alta velocidad de 12bits. El dispositivo requiere una impedancia de entrada de 50Ω, la conexión por cable Micro-USB 2.0 le asegura una alimentación de 5VDC, y trabaja entre una corriente de 50 a 340 mA.

Figura 9.
SDR AirSpy R2

Fuente: https://airspy.com/airspy-r2

➢ Sistema de control de posición

La estación terrena satelital de la UPTC cuenta con un sistema de servomotores YAESU G5500, (ver Figura 10), capaces de ofrecer un giro de 180° en elevación y de 450° el azimut, generando una cobertura total para seguir el a los satélites en cualquier punto del cielo.

Figura 10.
Rotor YAESU G5500

Fuente: https://www.dxengineering.com/parts/ysu-g-5500

- **Cálculo del radioenlace**

Se realizaron los respectivos cálculos del radio enlace de los satélites NOAA para determinar el ancho de banda, el nivel de señal recibida y otros factores que permiten mejorar o respaldar los resultados del sistema de recepción. Un aspecto importante a considerar cuando se reciben señales de satélites de órbita baja (LEO) es el efecto Doppler, lo que implica que el ancho de banda del sistema debe aumentar para captar la totalidad de la señal.

Para calcular el efecto Doppler en sistemas de radiofrecuencia (RF), se utiliza la siguiente ecuación:

$$F_r = \left(\frac{F_T}{c}\right) \cdot v_s \quad (1)$$

Donde:

F_r es la frecuencia de desviación vista desde el receptor en Hz.

F_T es la frecuencia del transmisor en Hz.

c es la velocidad de la luz (299 792 458 m/s).

v_s es la velocidad del transmisor en m/s.

Se calcula la frecuencia de desviación con el satélite más veloz, en este caso en NOAA-15.

$$F_r = \left(\frac{137{,}62 \cdot 10^6\ Hz}{299\,792\,458\ {}^{m}/_{S}}\right) \cdot 7\,550\ {}^{m}/_{\square}$$

$$F_r = 3\,466\ Hz$$

Ecuación de ancho de banda del sistema de recepción:

$$B_r = B_T + 2f_r \qquad (2)$$

Donde:

B_r es el ancho de banda que debe tener el transmisor.

B_T es el ancho de banda de la señal trasmitida.

Se calcula el ancho de banda que debe tener el receptor para recibir una señal APT del sistema NOAA.

$$B_r = 38\ kHz + 2 \cdot (3{,}5kHz)$$

$$B_r = 45kHz$$

La frecuencia de desviación se puede aumentar, como regla de diseño, para asegurarse que el sistema reciba por completo la señal del satélite.

La distancia entre el transmisor y el receptor afecta de manera significativa las pérdidas del enlace, lo que en telecomunicaciones se conoce como perdidas de espacio libre, se calculan teniendo en cuenta la distancia de las antenas y la frecuencia de transmisión.

Ecuación de pérdidas de espacio libre.

$$L_p = 32{,}45 + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(D) \qquad (3)$$

Donde:

f es la frecuencia del enlace en MHz.

D es la distancia de las antenas en km.

Usando del satélite NOAA-19 que es el más lejano a la tierra se tiene:

$$L_p = 32{,}45 + 20 \cdot \log(137{,}1) + 20 \cdot \log(870)$$

$$L_p = 133{,}95\ dB$$

El manual de usuario del NOAA POES, establece que la potencia isotrópica radiada efectiva o PIRE (EIRP por sus siglas en inglés) es de ±33,5 dBm [7].

Las pérdidas atmosféricas están relacionadas a la ubicación geográfica de la estación, para este caso de la estación terrera de la UPTC en VHF es de 2,1 dB aproximadamente.

Del lado del receptor, la antena Eggbeater empleada posee una ganancia de 5,5 dB para señales polarizadas circularmente; el LNA+BPF posee una ganancia aproximada de 26,5 dB en la frecuencia de interés y se estima una perdida en los conectores y cables, aproximadamente de 1dB.

La relación de ganancia a temperatura equivalente de ruido se emplea para medir la calidad del receptor respecto a un satélite, este parámetro se calcula con base en las ganancias del lado del receptor, en dB, respecto a una temperatura de ruido del receptor, en este caso 30°C o 303°K.

Relación de ganancia a temperatura equivalente de ruido:

$$\frac{G}{T_e}(dBK^{-1}) = 10\log\left(\frac{G}{T_e}\right) = G_{(dB)} - T_{e(dBK)} \qquad (4)$$

Con base en estos parámetros se calcula la relación señal a ruido, y el nivel de señal decodificable, que se relaciona en la ecuación 5.

Ecuación de Relación Señal a ruido:

$$SNR = PIRE - L_p$$

$$SNR = 33.5\ dBm - 133{,}95dB \qquad (5)$$

$$SNR = -100{,}45dB$$

Sin embargo, la diferencia entre la relación señal a ruido (SNR, Signal Noise Ratio, por sus siglas en inglés) y el piso de ruido (Noise Floor) presente en la banda, es la mínima señal decodificable (MDS, Minimum Decodable Signal, por sus siglas en inglés).

Ecuación de piso de ruido:

$$Noise\ Floor = 10\log(kT_e \cdot 10^3) + NF + 10\log_{10}(BW_R) \quad (6)$$

Donde:

T_e es la temperatura de ruido del receptor en °k.

NF la figura de ruido (Noise Factor, por sus siglas en inglés) del receptor en dB.

El SDR AirSpy asegura una figura de ruido entre 1,7 dB y 2,2dB (se toma un valor medio de 1,95 dB para los cálculos), de igual manera para calcular este parámetro se toma que el ancho de banda del receptor es el mismo que el del transmisor, teniendo un piso de ruido con base en la ecuación 8 de:

$$Noise\ Floor = -173{,}785dB + 1{,}95dB + 45{,}8dB$$

$$Noise\ Floor = -126{,}035dB$$

El nivel de señal decodificable que se recibe del satélite estaría dado por:

$$MDS = SNR - Noise\ Floor$$

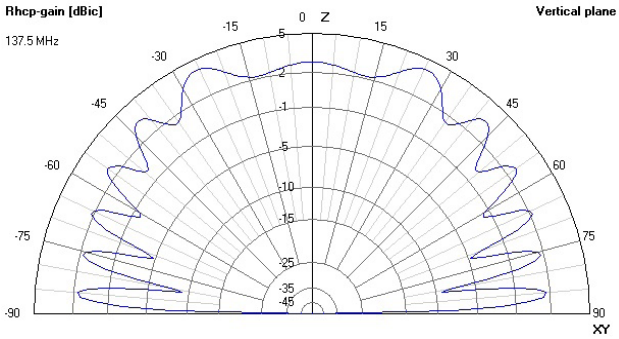
$$MDS = -100{,}45dB + 126{,}035dB \quad (7)$$

$$MDS = 25{,}585\ dB$$

A partir de la caracterización, y lo establecidos en la hoja de datos de la antena Eggbeater 144/RK2M; esta ofrece una ROE entre 2.0:1 para señales entre los 135MHz y 150MHz, sin embargo, para determinar un patrón de radiación más real, se realiza la simulación en el Software 4NEC2 (ver Figuras 11, 12 y 13), para estimar el comportamiento de la antena a 137,5 MHz.

Figura 11.

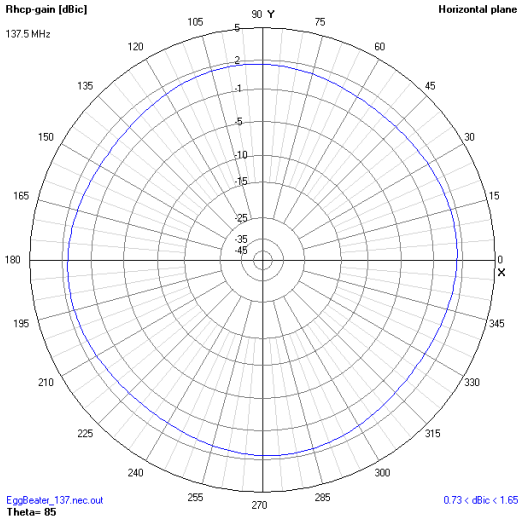
Patrón de radiación RHCP vertical de una antena Eggbeater



Fuente: Elaboración propia

Figura 12.

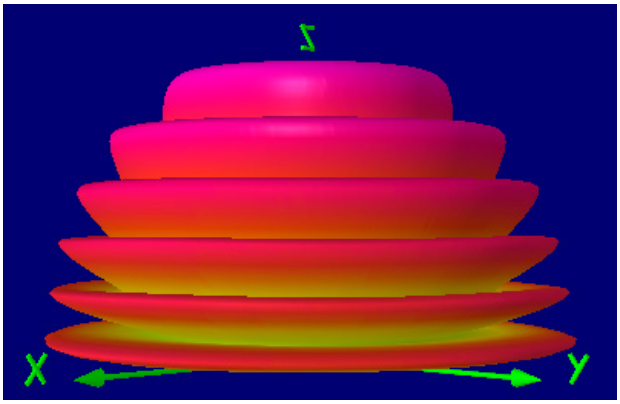
Patrón de radiación RHCP horizontal de una antena Eggbeater



Fuente: Elaboración propia

Figura 13.

Patrón de radiación RHCP en 3D de una antena Eggbeater

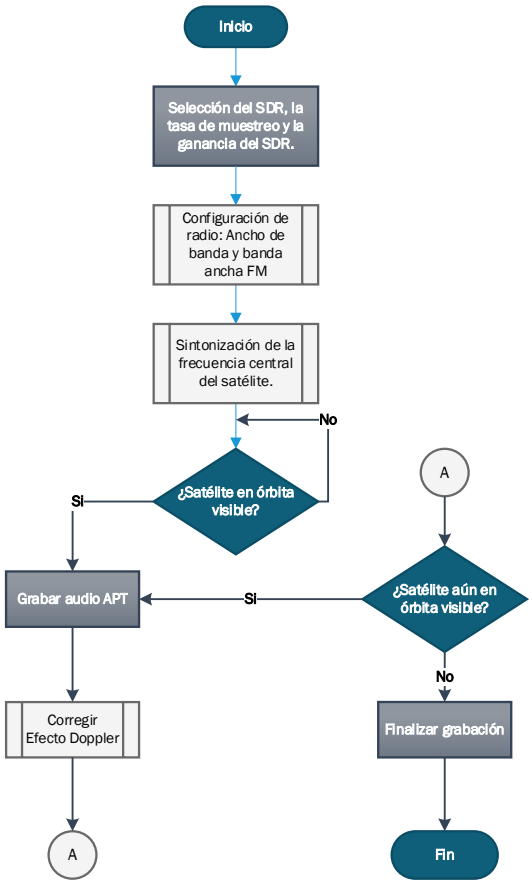


Fuente: Elaboración propia

El proceso de demodulación de la señal APT proveniente de los satélites NOAA se realiza en Wideband Modulated Frequency (WFM, Banda ancha de Frecuencia Modulada, por sus siglas en inglés). A diferencia de la modulación digital del satélite Meteor, los NOAA requieren corrección por efecto Doppler, a continuación, en la Figura 14, se presenta un diagrama lógico del proceso de recepción y demodulación de la señal APT.

Figura 14.

Diagrama de flujo del proceso de recepción y demodulación de la señal APT desde el software SDR#



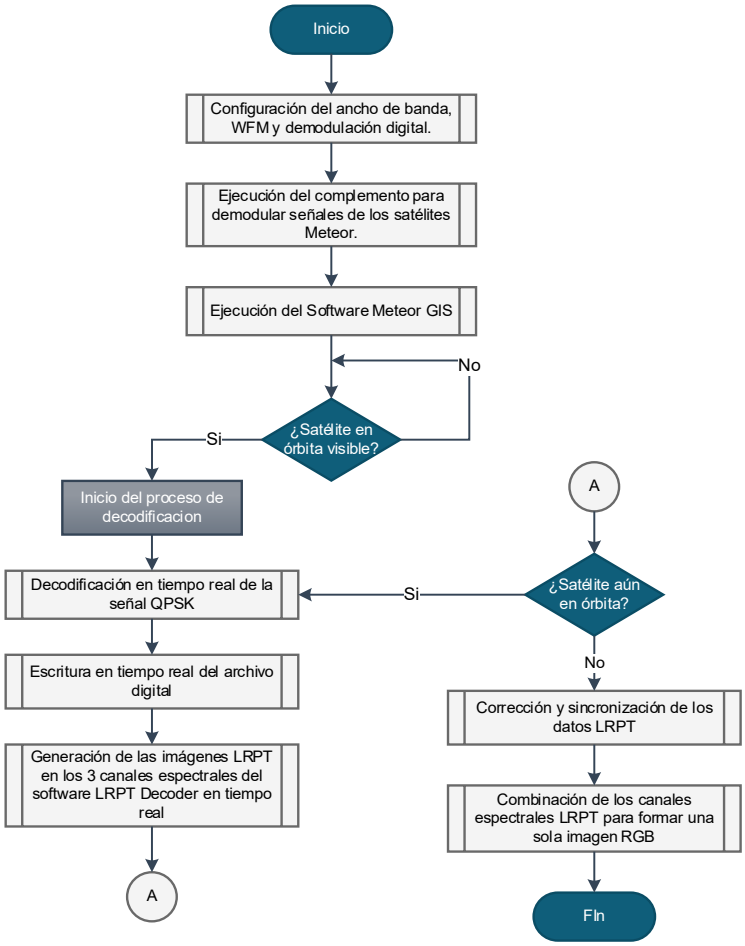
Fuente: Elaboración propia

Una vez el satélite complete su recorrido, se detiene la grabación, y se genera como resultado un archivo de audio en Waveform Audio Format (WAV, Formato de Audio de Forma de Onda, por sus siglas en inglés) que contiene la señal APT demodulada, Se implementó un sistema de procesamiento de señales para decodificar las imágenes captadas por los satélites meteorológicos NOAA, usando software de uso libre: NOAA APT image decoder; el cual se encarga de decodificar los tonos del audio a escala de grises de 8 bits que contienen la imagen captada por el sensor del satélite.

En la Figura 15 se muestra el diagrama lógico del proceso por el cual se decodifican las señales LRPT del satélite Meteor-M2, usando los softwares SDR#, LRPT Image Processor y Meteor GIS.

Figura 15.

Diagrama de flujo del proceso de recepción y decodificación de la imagen en formato LRPT del satélite Meteor



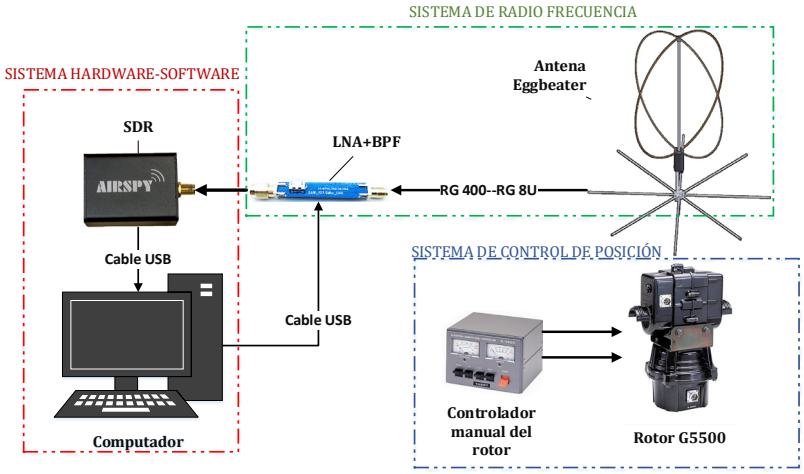
Fuente: Elaboración propia

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas de funcionamiento del sistema de recepción y decodificación de las imágenes atmosféricas provenientes de los satélites NOAA y Meteor-M2 se hicieron a 2735 msnm con una visibilidad de 171, 5° de elevación de 180° posibles; el sistema completo implementado se muestra en la Figura 16.

Figura 16.

Estación terrena implementada para la recepción VHF proveniente de satélites meteorológicos



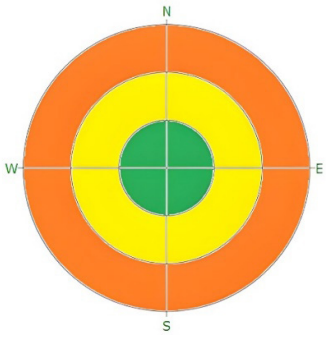
Fuente: Elaboración propia

- ***Pruebas de recepción***

La Figura 17 expone un mapa polar con centro en una ubicación de interés, para el caso de la investigación, la estación terrena de la UPTC. La zona naranja representa un ángulo de elevación de 0° a 30°, la zona amarilla un ángulo de elevación entre los 30° a los 60°, y la zona verde un ángulo de elevación entre los 60° y los 90°.

Figura 17.

Mapa polar de la distancia de un satélite a la estación terrena

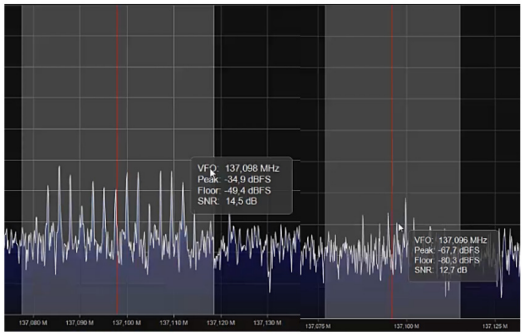


Fuente: Elaboración propia

Se realizaron las pruebas de recepción de la señal VHF de los satélites NOAA con y sin el uso de LNA+BPF, con el fin de observar el funcionamiento del sistema implementado y comparar los resultados con los cálculos realizados.

Figura 18.

A la izquierda, Señal recibida a un ángulo de elevación menor a 30°, del satélite NOAA-19, usando LNA+BPF; a la derecha, sin LNA+BPF

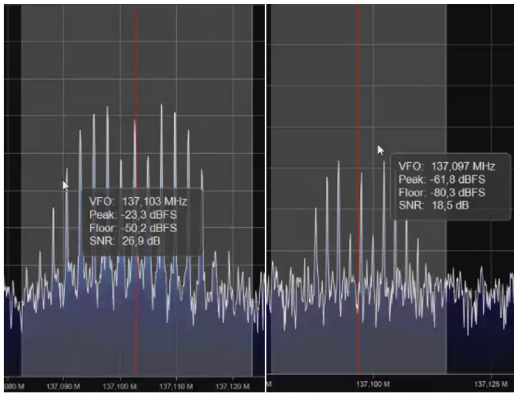


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 18, se observa la señal recibida, para el mismo ángulo de elevación entre 0° a 30°, con la diferencia en el uso del LNA+BPF, se observa que, al emplearlo, la señal aumenta aproximadamente 1,8 dB, de igual manera se observa un incremento significativo del número de armónicos que contiene.

Figura 19.

A la izquierda, Señal recibida a un ángulo de elevación entre 30°y 60°, del satélite NOAA-19, usando LNA+BPF; a la derecha, sin LNA+BPF

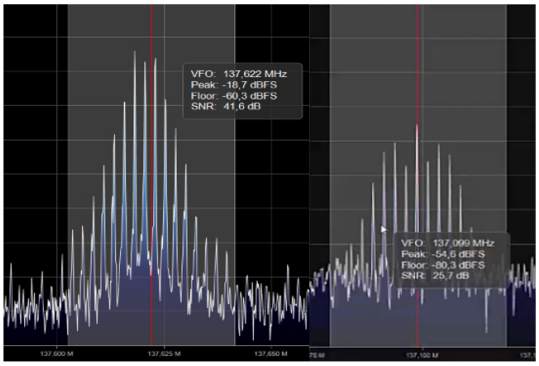


Fuente: Elaboración propia

La Figura 19 expone la diferencia entre la recepción con y sin LNA+BPF, para un ángulo de elevación entre los 30° y los 60°, se observa un aumento significativo en la SNR (una amplificación de aproximadamente 8,4dB) al punto de ser 1,2dB superior al máximo valor de recepción de la señal sin el uso de LNA+BPF mostrado a la derecha de la Figura 20.

Figura 20.

A la izquierda, Señal recibida a un ángulo de elevación entre 60° y 90°, del satélite NOAA-19, usando LNA+BPF; a la derecha, sin LNA+BPF



Fuente: Elaboración propia

La señal expuesta en la Figura 20, se recibe cuando el satélite está en su punto más cercano a la estación, es decir un rango de 60° a 90°, se evidencia un aumento de 15,9 dB en la SNR, donde incluso, este parámetro puede llegar a un valor de 43dB.

En la Figura 20, se observa a la derecha, que la diferencia entre el Piso de Ruido y el pico máximo de señal recibido del satélite es de 25,7 dB, lo que es igual al nivel mínimo de señal de codificable.

Ecuación de error relativo.

$$E_R = \left| \frac{V_T - V_E}{V_T} \right| \cdot 100\% \qquad (8)$$

Donde:

E_R es el error relativo en %.

V_T es el valor teórico de la variable en sus respectivas unidades.

V_E es el valor experimental u obtenido de la variable en sus respectivas unidades.

A partir de los cálculos del nivel mínimo de señal decodificable, el valor experimental de este parámetro expuesto en la Figura 20 y la ecuación 8, se calcula el error porcentual de dicho parámetro:

$$E_R = \left| \frac{25{,}585\ dB - 25{,}7\ dB}{25{,}585\ dB} \right| \cdot 100\%$$

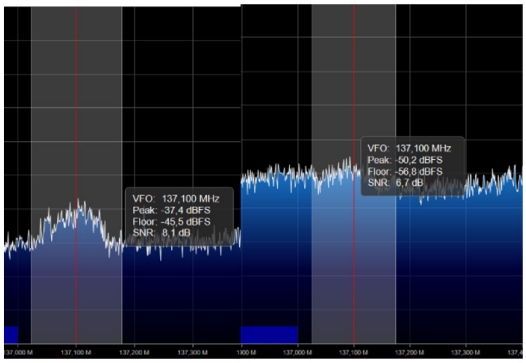
$$E_R = 0{,}45\%$$

El error relativo de 0,45% del mínimo nivel de señal decodificable recibido respecto al valor teórico de uno de los satélites NOAA, indica que el sistema no posee mayores pérdidas internas y que la Figura de Ruido de todo el sistema podría aproximarse a solo la del SDR.

De igual manera que con los satélites NOAA, el satélite Meteor-M2 presenta una mejora significativa en su señal al usar el LNA+BPF para su recepción, como se observa en la Figura 21, la señal presenta un aumento de 1,4dB en su señal y una reducción del ruido en la recepción, para un ángulo de recepción entre 0° y 30° de elevación.

Figura 21.

A la izquierda, Señal recibida a un ángulo de elevación menor a 30°, del satélite Meteor M2, usando LNA+BPF; a la derecha, sin LNA+BPF

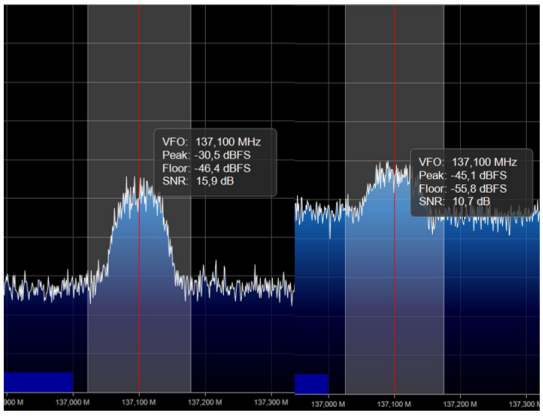


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 22 se muestra la recepción de la señal con y sin LNA+BPF del satélite Meteor-M2 con un ángulo de elevación entre 30° y 60°, la ganancia aportada por el LNA+BPF es de 5,2dB, y de igual manera se observa una disminución significativa del ruido en el ancho de banda de recepción.

Figura 22.

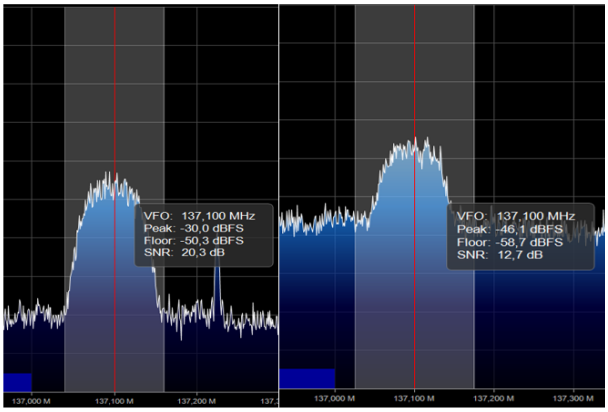
A la izquierda, Señal recibida a un ángulo de elevación entre 30°y 60°, del satélite Meteor M2, usando LNA+BPF; a la derecha, sin LNA+BPF



Fuente: Elaboración propia

La señal presentada en la Figura 23 se recibe cuando el satélite está en el punto más próximo a la estación, con y sin LNA+BPF, es decir un rango de 60° a 90° de elevación, la diferencia en su ganancia es de 7,6 dB; la SNR del satélite Meteor-M2 con condiciones climáticas favorables puede llegar incluso a los 22dB.

Figura 23.
A la izquierda, Señal recibida a un ángulo de elevación entre 60°y 90°, del satélite Meteor M2, usando LNA+BPF; a la derecha, sin LNA+BPF



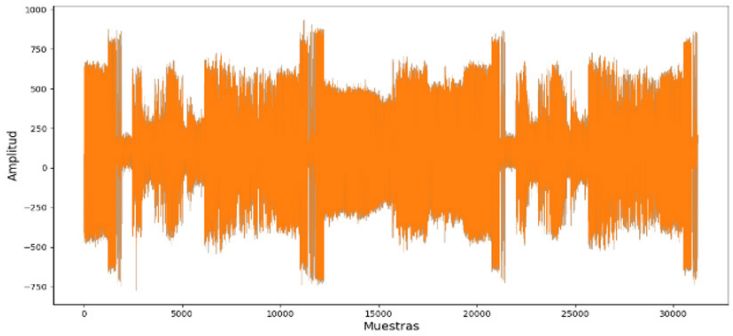
Fuente: Elaboración propia

- ***Decodificación de imágenes***

Con ayuda del software NOAA-APT imagen Decoder 13.0, el cual se encarga de decodificar los tonos del audio a escala de grises de 8 bits que contienen la imagen captada por el sensor del satélite NOAA.

El resultado de la demodulación de la señal VHF de los satélites NOAA, es una señal de audio AM de 2,4 kHz con pulsos de sincronización de 832Hz y de 1040 Hz, como se muestra en la Figura 24, generada en Python™.

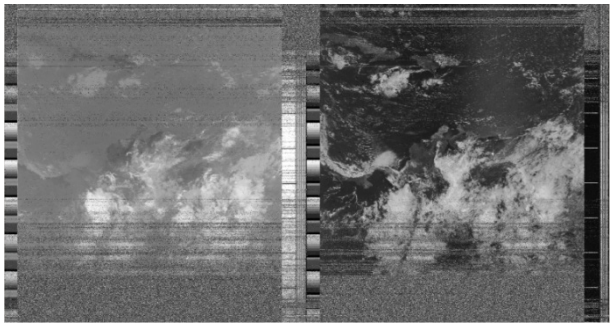
Figura 24.
Señal AM de 2.4 kHz recibida del satélite NOAA-19



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 25 se observa que la estación sin el LNA+BPF puede recibir las señales de los satélites meteorológicos de órbita LEO en VHF, se pueden recibir alrededor de 7 fracciones o cuadros de formato APT, es decir una imagen que muestra una superficie aproximada de 8,18 millones de km².

Figura 25.
Imagen captada del satélite NOAA 18 sin el LNA+BPF



Fuente: Elaboración propia

Las pérdidas máximas en el horizonte, y los ángulos mínimos de hacen que el número máximo de cuadros completos de la señal APT se reduzcan como se expone en las recepciones satelitales de las imágenes 26, 27 y 28. En la Tabla 3 se exponen el número de cuadros APT, y la superficie aproximada captada por cada satélite.

Tabla 3.

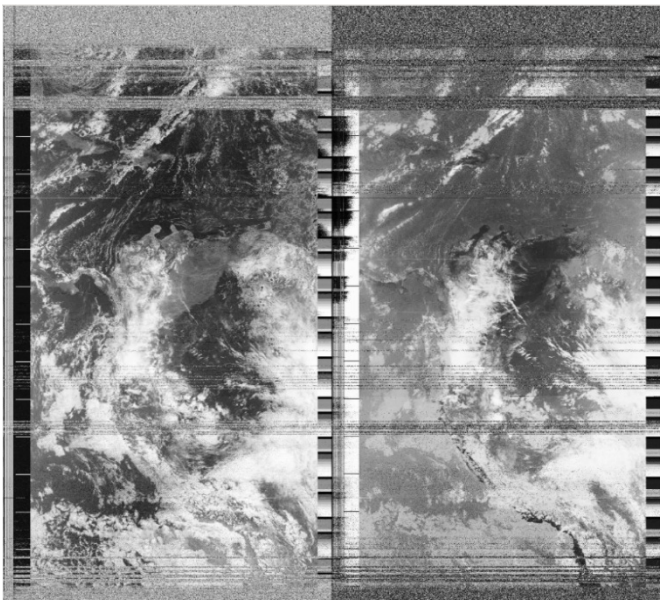
Número de cuadros en formato APT recibido de los satélites NOAA

Satélite	No. de cuadros APT	Superficie aproximada
NOAA-18	12	13 920 000 km²
NOAA-15	12	13 920 000 km²
NOAA-19	13	15 138 000 km²

Fuente: Elaboración propia

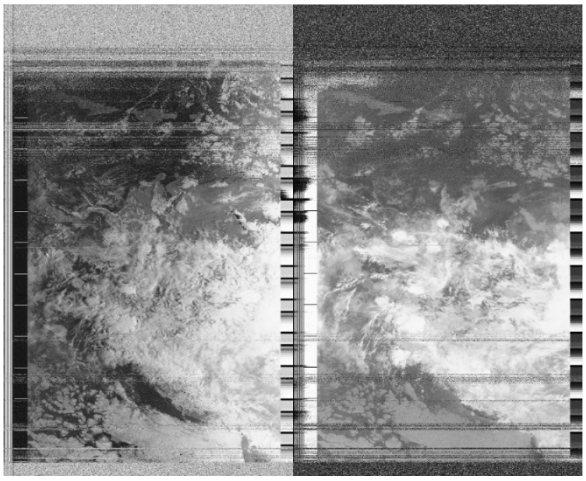
Figura 26.

Imagen recibida del satélite NOAA 18 el 14/01/2022



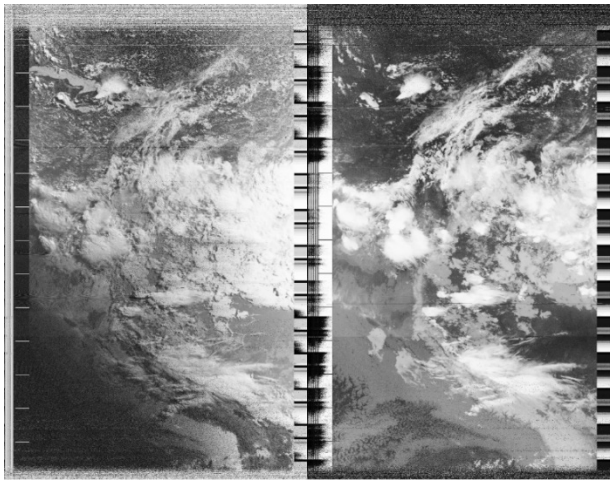
Fuente: Elaboración propia

Figura 27.
Imagen recibida del satélite NOAA 15 el 26/01/2022



Fuente: Elaboración propia

Figura 28.
Imagen recibida del satélite NOAA 19 el 03/06/2021



Fuente: Elaboración propia

En las imágenes recibidas de los satélites NOAA-18 y el NOAA-15 (Figuras 26 y 27 respectivamente), se tiene una franja sin señal al inicio y al final de la

transmisión, siendo la primera más ancha que la segunda, causadas por las pérdidas en el horizonte; esta franja es menor en la imagen recibida del satélite NOAA-19 (Figura 28), debido a que las imágenes 26 y 27 fueron captadas en temporada lluvias en la zona, a diferencia de la imagen 28 que fue captada en temporada seca, de igual manera la transmisión del satélite NOAA-19, está más separada en términos frecuenciales, de la transmisión de los taxis de la ciudad (138,1 MHz) que es una de las mayores fuentes de interferencia en la banda de 137 MHz a 138MHz.

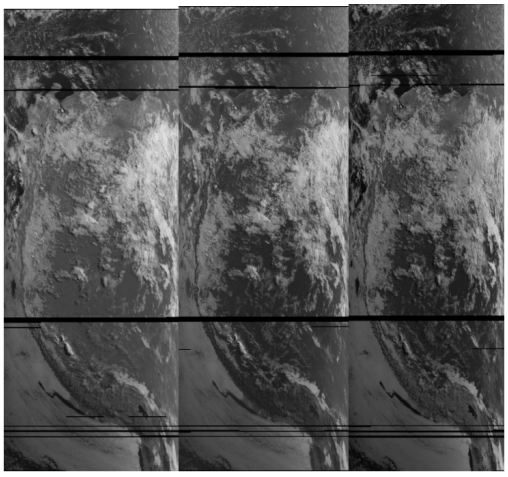
En la Figura 29 se exponen los 3 canales espectrales decodificados del formato LRPT, por el software LRPT Decoder; cada canal representa un color diferente del formato RGB.

Con los tres canales decodificados, el Software Meteor GIS realiza su respectiva combinación obteniendo de este modo una sola imagen a color, por medio de la técnica de "Falso Color", usada en técnicas satelitales y astronómicas para estimar los colores reales de una imagen.

En la Figura 30 se muestra la combinación de los 3 canales de la Figura 29, además de limites oceánicos trazados por el Software Meteor GIS.

Figura 29.

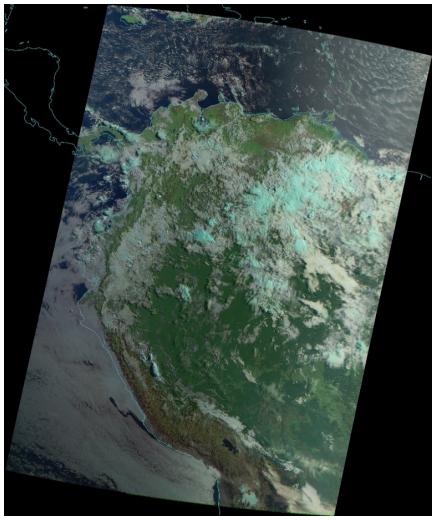
De izquierda a derecha, Canal rojo de imagen LRPT captada del satélite Meteor-M2, canal verde y canal azul



Fuente: Elaboración propia

Figura 30.

Imagen recibida del satélite Meteor M2 recibida el 20/05/2021



Fuente: Elaboración propia

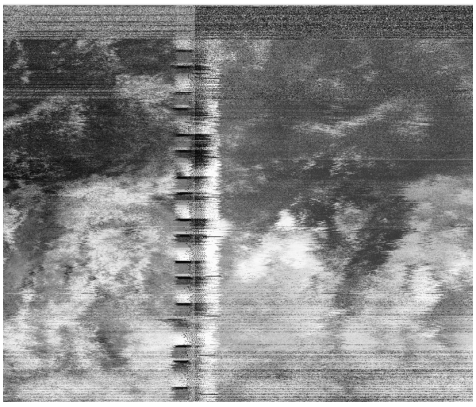
- ***Procesamiento digital de las imágenes APT***

Con el fin de mejorar la calidad de las imágenes APT, se emplea filtrado en 2D, con filtros realizados en Python™ por medio de su librería OpenCV (dedicada al procesamiento digital imágenes), usando una máscara de mediana de 3x3 píxeles.

La Figura 31 corresponde a una imagen recibida la cual está completamente afectada por el ruido blanco. Cabe destacar que la imagen se recibió el 20 de diciembre del 2021, periodo de gran actividad en la ciudad, debido a las festividades de fin de año.

Figura 31.

Ruido blanco en una imagen recibida por el satélite NOAA 18 el 20/12/2021

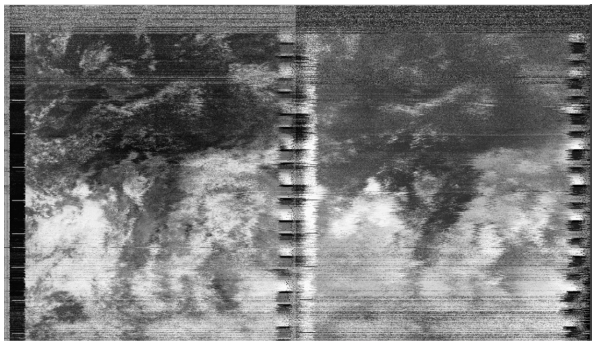


Fuente: Elaboración propia

Como se expone en la Figura 32, con el filtro de Mediana se difumina la imagen y los píxeles con cambios bruscos de color, desaparecieron. Aunque se pierde en menor grado la resolución de la imagen.

Figura 24.

Imagen satelital APT con ruido blanco filtrada con una máscara de mediana de 3x3 píxeles



Fuente: Elaboración propia

5. DISCUSIÓN

Las imágenes obtenidas en esta investigación han tenido un tamaño significativo, logrando la recepción de 12 cuadros de imagen APT de un total de 15 posibles en condiciones ideales. Este tamaño es ligeramente mayor en comparación con otras investigaciones, como la de Rojas Molina (2019), que recibió imágenes desde Quito, Ecuador, con un tamaño aproximado de 9 cuadros de imagen APT [9]. Asimismo, en la investigación de Ccanccapa Surco (2020), se logró la recepción de entre 10 y 11 cuadros de imagen APT en Arequipa, Perú [10]. Sin embargo, es menor en tamaño en comparación con la investigación de Cañelles Bofarull (2018) en Cataluña, España, que obtuvo imágenes de aproximadamente 14 cuadros de imagen APT [11].

Estos resultados demuestran la efectividad del sistema de recepción implementado en la Estación Terrena, lo que ha permitido obtener un mayor número de cuadros de imagen APT en comparación con investigaciones previas.

6. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de recepción y decodificación de imágenes atmosféricas de baja resolución provenientes de satélites meteorológicos de órbita baja. Además, el sistema permitió la recepción y decodificación de imágenes atmosféricas en alta resolución del satélite Meteor-M2. Se obtuvieron imágenes de una superficie aproximada de 15 millones de km² a través de los dos tipos de transmisión satelital, APT y LRPT.

Las pruebas del sistema de recepción arrojaron resultados satisfactorios. Se registró una alta potencia recibida por el sistema, lo que se reflejó en una alta relación señal-ruido (SNR) de 20,3 dB para el satélite Meteor y 41,6 dB para los satélites NOAA. Se concluye que las pérdidas en todo el enlace no superan las ganancias en el tiempo del enlace con la estación, a excepción de cuando la pérdida por espacio libre es máxima, como en los puntos de mayor distancia a la estación.

El uso de un amplificador de bajo nivel de ruido (LNA) junto con un filtro pasa banda (BPF) en la banda de 137 - 138 MHz ayudó a mitigar el ruido fuera de la banda de interés. Esto mejoró significativamente la SNR de los dos tipos

de transmisión satelital en VHF, lo que no solo aumentó la calidad de las imágenes, sino también su tamaño. Sin embargo, se observó que en periodos de gran actividad humana, el ruido aumentó significativamente, lo que afectó la calidad de las imágenes.

7. REFERENCIAS

[1] VIÑAS, José Miguel. Origen y desarrollos actuales de la predicción meteorológica. En: Encuentros Multidisciplinares. Vol., 45° (sep., 2013) p. 8.

[2] Choi, Charles Q. How Weather Satellites Changed the World [En linea]. (13 de abril de 2010). [Consultado: 15 de noviembre de 2020]. Disponible en: https://www.space.com/8186-weather-satellites-changed-world.html

[3] National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA POES - Earth Online. [En línea]. Agencia Espacial Europea. [Consultado: 15 de noviembre de 2020]. Disponible en: https://earth.esa.int/web/guest/missions/3rd-party-missions/current-missions/noaa-avhrr

[4] MAURY ATENCIA, María Paula y VERA CELY, Oscar Fernando. Identificación de funciones complementarias para la estación terrena satelital de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. En: Redes de Ingeniería. Bogotá: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Julio, 2017 nro.8 p 29-35. ISSN: 2248-762X.

[5] National Weather Service - National Oceanic and Atmospheric Administration. Satellites. [En línea]. [Consultado: 30 de marzo de 2021]. Disponible en: https://www.weather.gov/about/satellites.

[6] National Oceanic and Atmospheric Administration. User's Guide for Building and Operating Environmental Satellite Receiving Stations. U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. (marzo de 2009). [Consultado:11 de abril de 2021]. Disponible en: https://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/pubs/Users_Guide-Building_Receive_Stations_March_2009.pdf

[7] National Oceanic and Atmospheric Administration. User's Guide for Building and Operating Environmental Satellite Receiving Stations. [En línea] U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. (marzo de 2009). [Consultado:11 de abril de 2021]. Disponible en: https://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/pubs/Users_Guide-Building_Receive_Stations_March_2009.pdf

[8] Boissin; Neri; Edwars y Cohen. Diagrama de constelación QPSK codificado a Gray para datos de LRTP [imagen]. (1998). [En línea]. [Consultado: 12 de abril de 2021]. Disponible en: http://mdkenny.customer.netspace.net.au/METOP_HRPT_LRPT.pdf.

[9] ROJAS MOLINA, Richard David. Diseñar un prototipo para recepción de imágenes APT (Automatic Picture Transmission) del sistema satelital NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) usando RTL-SDR. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero en Electrónica Digital y Telecomunicaciones. Quito. Universidad Tecnológica Israel. 2019. 31-33 p

[10] CCANCCAPA SURCO, Max Harry. Diseño de un sistema de recepción de imágenes satelitales meteorológicas en alta resolución utilizando Radio Definido por Software. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero en telecomunicaciones, Arequipa. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

[11] CAÑELLES BOFARULL, Daniel. Obtenció d'imatges de satèl·lits meteorològics polars amb una antena quadrifilar [en línea]. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero en telecomunicaciones. Universidad politécnica de Cataluña, 2010. 35-55, 67 p. [Consultado: 15 de febrero de 2021] Disponible en: https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/9885?locale-attribute=es

CAPÍTULO 12

ESTUDIO DE CONCEPTO PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO DE CUALIFICACIÓN DE UN ROVER LUNAR

Mario A. Higuera G.
https://orcid.org/0000-0001-6617-1046
mahiguerag@unal.edu.co
Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia AstroCO – ACCEFYN

Jhonathan Murcia Piñeros
https://orcid.org/0000-0002-7013-6515
jhonathan.pineros@unifesp.br
Instituto de Ciencia y Tecnología, Universidad Federal de São Paulo

Javier Enciso
https://orcid.org/0000-0002-1623-4640
jenciso@encisosystems.com
CEO, Enciso Systems

Alejandro Serna
alejandro.serna@icra.com.co
ICRA – Instituto Colombiano de Robótica Avanzada

Jack Rueda Gil
https://orcid.org/0000-0002-5795-0010
jackruedagil@gmail.com
Diesel del Oriente

Jesús Mario Vargas Plaza
gerencia@orioncamp.com
Orión Campamento

John Fabio Aguilar Sánchez
https://orcid.org/0000-0002-4752-2784
john.aguilar@unimilitar.edu.co
Universidad Militar Nueva Granada

Resumen

El presente trabajo muestra el documento de diseño conceptual para el desarrollo de un explorador (Rover) lunar. En esta dirección es el primer documento técnico producido en el país con el claro objetivo de cumplir con la fase inicial de validación técnica, identificar las necesidades de la misión y establecer una aproximación financiera, en la dirección de diseñar y construir un explorador que pueda alcanzar la superficie de la Luna; un proyecto, que se enmarca en la cooperación internacional alrededor del proyecto Artemis y del cual Colombia se ha vinculado como país firmante. Los resultados presentados en este trabajo muestran la viabilidad técnica de un proyecto de esta naturaleza, para esta Fase y sus conclusiones sugieren que es necesario la incorporación de otras entidades del Estado colombiano que permitan alcanzar los objetivos propuestos.

Palabras clave: Diseño de artefacto espacial, proyecto de rover, robótica, vehículos no tripulados de superficie.

Abstract. The present work shows the conceptual design document for the development of a lunar rover. In this sense, it is the first technical document produced in the country with the clear objective of fulfilling the initial phase of technical validation, identifying the needs of the mission and establishing a financial approach, in the direction of designing and building a rover that can reach the surface of the Moon; a project, which is framed in the international cooperation around the Artemis project and to which Colombia has been linked as a signatory country. The results presented in this work show the technical feasibility of a project of this nature for this phase, and its conclusions suggest that the incorporation of other Colombian state entities is necessary to achieve the proposed objectives.

Keywords: Spacecraft design, surface vehicles, robotics, rover project, unmanned ground vehicles.

1. INTRODUCCIÓN

Frente al renovado y creciente proceso en el cual varios países, liderados por los Estados Unidos, la República de China, la Confederación Rusa, entre otros, vuelven a poner sus ojos en la exploración espacial humana, enfocada en el regreso a la Luna y también en llevar al hombre a la superficie de Marte. Es posible visualizar que Colombia sí puede entrar en esta área del desarrollo tecnológico y espacial. En esta dirección se presenta este trabajo.

1.1. Antecedentes

El origen del estudio de la astronomía y las ciencias del espacio en Colombia se remonta a 1803, cuando en Santafé de Bogotá, la capital del Virreinato del Nuevo Reino de Granada, hoy República de Colombia, se inauguró el primer observatorio en América. Su evolución a lo largo de 219 años ha permitido al Observatorio Astronómico Nacional de Colombia (OAN), una unidad académica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, disponer de dos sedes donde se están formando talentos y desarrollando proyectos de investigación en el marco de sus programas de Maestría y Doctorado.

Al finalizar 2020, como parte de un proceso de integración de la comunidad de egresados del OAN en Colombia y en el exterior, se llevó a cabo el seminario web *"Maratón Colombia Espacial",* una actividad que se desarrolló en dos sesiones[2] y que brindó una excelente oportunidad para fortalecer el camino construido por todos. Esta actividad se repitió en diciembre de 2021[3]. A lo largo de las presentaciones y foros, jóvenes talentos e investigadores colombianos reconocidos en diferentes campos demostraron cómo la capacidad de superar barreras es posible en el camino hacia el desarrollo científico nacional, especialmente en tecnologías espaciales y robótica.

2 Enlace sesión día 1: https://youtu.be/COnpS7tij2A
Enlace sesión día 2: https://youtu.be/1-uERdjGNWU?t=40

3 Enlace sesión día 1: https://youtu.be/bDY35vTeH8g?t=213
Enlace sesión día 2: https://youtu.be/QXWzkT8zD-k?t=520

1.2. Estado actual

La entidad del sector productivo, el Instituto Colombiano de Robótica Avanzada (ICRA), cuenta con experiencia en el desarrollo de plataformas robóticas terrestres, productos esenciales que fomentan el crecimiento de la industria 4.0 en el país. Estos robots se utilizan para automatizar procesos y pueden ser operados de forma remota en tareas que podrían ser riesgosas para los seres humanos. Por otra parte, el Observatorio Astronómico Nacional (OAN) lleva a cabo investigaciones respaldadas por trabajos de tesis en las áreas de instrumentación y desarrollo tecnológico.

En el contexto colombiano, la firma de los Acuerdos Artemis (The Artemis Accords, 2020) con el gobierno de los Estados Unidos y la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de dicho país (NASA) permite a Colombia utilizar el transporte de cargas comerciales a la Luna para transportar experimentos, lo que contribuye a la generación de nuevo conocimiento y aporta a las ciencias espaciales y la economía espacial en el territorio nacional. Al mismo tiempo, estos acuerdos, que establecen un marco legal, junto con el documento CONPES de Política Espacial, son fundamentales para cumplir con las recomendaciones de la Misión de Sabios. En este contexto, se plantea un proyecto colaborativo entre la academia y cuatro entidades del sector productivo de Colombia que, en el futuro, permita enviar el primer experimento espacial del país a la superficie de otro cuerpo celeste.

La metodología seleccionada para llevar a cabo el proyecto, incluyendo los prototipos y la operación del sistema espacial (que no forma parte de la presente propuesta, pero depende de los resultados generados con la ejecución del proyecto), es la metodología de sistemas adaptada y revisada por la NASA (Hirshorn et al., 2017), la cual se describe detalladamente en la sección 2 (Metodología).

El desarrollo de un experimento que sea transportado al espacio y/o a otro cuerpo celeste requiere la creación de un sistema que tome datos del objeto a analizar, en este caso, el Sol. Esto se debe a que es parte del área de estudio del grupo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia, y porque es la estrella más cercana al planeta, ejerciendo una gran influencia en el clima terrestre y teniendo un gran impacto en las actividades humanas. El sistema que toma datos y que integra los sensores de observación solar es conocido como carga útil. Esta carga útil necesita de un soporte vital que

le permita operar de forma remota en el espacio exterior. Dicho soporte incluye suministro energético, soporte estructural, almacenamiento de datos, comunicaciones, capacidad motriz, entre otros (Nishida & Wakabayashi, 2012; Wertz et al., 2011).

El conjunto de subsistemas que conforman el sistema mayor que brinda soporte a la carga útil se denomina "rover" cuando opera en la superficie de otro cuerpo celeste. En este caso, el rover se denomina "micro vehículo robótico de superficie lunar", aunque no es parte del proyecto transportarlo a la Luna.

El vehículo robótico está diseñado y desarrollado para operar en las condiciones ambientales de la superficie lunar, las cuales incluyen la radiación y luminosidad solar, el impacto de los rayos cósmicos, las variaciones de temperatura que oscilan entre -50 °C y 150 °C (Jaffe, 1967), las partículas y la geología de la superficie lunar (Krasilnikov et al., 2021), la distancia necesaria para establecer y mantener un enlace de comunicaciones, la falta de presión atmosférica, las vibraciones generadas por el cohete lanzador, la nave de transporte y la de alunizaje, entre otros.

El micro vehículo robótico de superficie lunar, diseñado para operar en ambientes espaciales, se fabrica como un prototipo operacional utilizando materiales y componentes aeroespaciales que le permiten sobrevivir y operar en el espacio. Cuando se pone a prueba o se valida en laboratorios que simulan las condiciones reales de operación, se conoce como un "modelo de cualificación" (Hirshorn et al., 2017; Wertz et al., 2011). Esto significa que es un modelo que podría ser utilizado para ser enviado a la superficie de la Luna, ya que tiene altas probabilidades de operar correctamente y cumplir con la misión para la cual fue diseñado.

El micro vehículo robótico con la carga útil integrada puede ser denominado un "observatorio solar móvil". La movilidad de la carga útil es importante para alejarse del vehículo de transporte (alunizador) y otros obstáculos que puedan interferir con la toma de datos, tanto electromagnéticamente como visualmente. El término "micro vehículo robótico espacial" se utilizó por primera vez para designar al rover *Sojourner* de la misión *Pathfinder* de la NASA, que llegó a Marte en 1997 (Matijevic and Shirley, 1997). Este rover, con menos de 12 kg de masa y una longitud inferior a 65 cm, fue diseñado como un sistema espacial pequeño, de bajo peso, bajo costo de producción y rápida fabricación (The Rover Team, 1997; Shirley and Matijevic, 1995).

Mediante el uso de elementos comerciales (COTS - Commercial Off The Shelf), es posible integrar un micro vehículo robótico con características similares a las del *Sojourner*. Además, implementando el conocimiento y la experiencia adquiridos de la tecnología de los *CubeSats* (NASA, 2017), se pueden reducir los costos del proyecto y los riesgos asociados. En la superficie lunar, han llegado rovers como Luna 17 (1970) y Luna 21 (1971) de la ex Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (Siddiqi, 2018) y los rovers Yutu 1 (2009) y Yutu 2 (2019) de la República Popular de China (Ding et al., 2022; Li et al., 2015).

Para los subsistemas que serán diseñados por parte de las entidades que conforman la alianza, se propone seleccionar e integrar tecnología comercial con el fin de reducir los costos, la complejidad y los riesgos. Muchos componentes, como sensores y microcontroladores, requieren laboratorios e infraestructura que no están disponibles en el país. Además, no es el objetivo del presente proyecto desarrollar esta infraestructura, ya que eso aumentaría significativamente los costos y el tiempo de ejecución. Los subsistemas identificados con sus componentes principales y función son (Wertz et al., 2011):

a. Carga útil
Función: Encargado de interactuar con el objeto de interés para obtener las medidas.
Principales partes (en caso de ser de observación): Sensor, lentes, estructura.

b. Telemetría, rastreo y comandos TT&C
Función: Establecer y mantener los enlaces de comunicaciones para obtener datos del segmento espacial y enviar comandos de ejecución.

Principales partes: Antenas, receptores y transmisores

c. Sistema de control térmico
Función: Mantener las temperaturas de los sistemas internos en un rango de operación determinado para su funcionamiento.

Principales partes: Calentadores y/o radiadores, Sensores de temperatura.

d. Sistema de Potencia Eléctrica (EPS)
Función: Transforma la energía solar en eléctrica, la almacena, regula, controla y transmite.

Principales partes: Paneles fotovoltaicos, baterías, cables de distribución.

e. Computadora de a bordo
Función: Administración y procesamiento de datos provenientes de los otros subsistemas.

Principales partes: Procesadores y dispositivos de almacenamiento de datos, Software.

f. Guía Navegación y Control (GNC)
Función: Determinar la orientación, posición y acciones de movimiento.

Principales partes: Sensores de desplazamiento y posición angular, Sistema de control.

g. Sistema de locomoción
Función: Inducir o detener el desplazamiento del vehículo.

Principales partes: Motores, amortiguadores, ruedas.

h. Estructura y mecanismos
Función: Almacenar los sistemas, protegerlos del ambiente y desplegar los dispositivos como antenas, carga útil y paneles.

Principales partes: Laminas, vigas y columnas, Uniones, Partes móviles y lubricación.

1.3. Ejemplos de desarrollos y prototipos de rovers para exploración lunar

Para contextualizar el trabajo que ha estado desarrollando el grupo de investigación AstroCo-Robótica, que es una sección del capítulo Astronomía Colombiana (AstroCo) adscrita a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), a continuación se presentan varios prototipos y proyectos en desarrollo llevados a cabo por otros centros de investigación en tecnología aeroespacial.

En la Figura 1 se muestra el rover lunar japonés "YAOKI", que, según DYMON (s.f.), es el más pequeño de su tipo. Presenta características relevantes, como una alta resistencia a impactos de hasta 100G, cabe en la palma de la mano y tiene un peso de 498g. Es importante destacar que, a pesar de las caídas, su

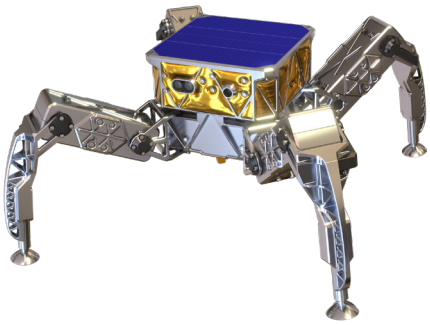
morfología le permite mantenerse en movimiento gracias a que sus ruedas son más grandes que su cuerpo. Este explorador se integrará en las misiones del proyecto Artemis de la NASA como soporte para alguna de las tareas del proyecto de construcción de una base lunar.

Figura 1.
Rover lunar YAOKI

Fuente: DYMON. (s.f.). Lunar Rover "YAOKI". https://dymon.co.jp/en/yaoki/

En la Figura 2 se muestra el rover "ASAGUMO". SPACEBIT (s.f.) es una empresa de carácter privado ubicada en el Reino Unido, fundada en 2014 por el industrial ucraniano Pavlo Tanasyuk, que se dedica a la creación de productos tecnológicos basados en robótica y orientados a las misiones lunares y planetarias. El producto se presenta como el primer "rover" sin ruedas, ya que su estructura se asemeja a un robot que camina. Cuenta con sensores de temperatura, cámara multiespectral, sensores de radiación y sistema LIDAR. Sus dimensiones corresponden casi a las de un cubo: 10 x 10 x 15 cm. Entre los objetivos a desarrollar con este dispositivo se encuentran la determinación de temperaturas y densidad de partículas eléctricas en la superficie, así como pruebas de desempeño del rover.

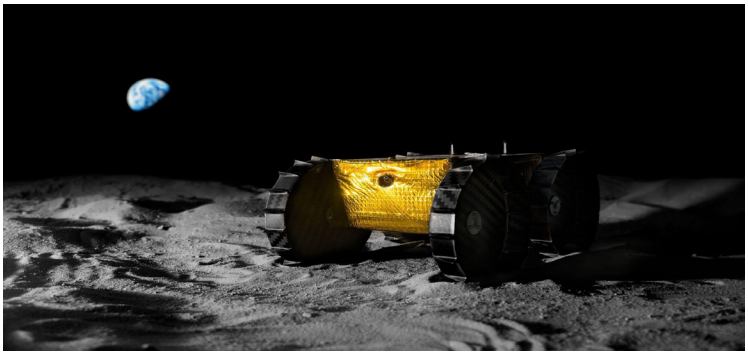
Figura 2.
Rover ASAGUMO



Fuente: SPACEBIT. (s.f.). To the moon. https://spacebit.com/

En la Figura 3 se presenta el rover lunar "IRIS". Desarrollado en la Universidad Carnegie Mellon de Estados Unidos. Pesa 2kg, su chasis se compara en tamaño con el de una caja de zapatos y sus ruedas como las tapas de botella. Fue desarrollado en fibra de carbono con el fin de reducir su peso. Su objetivo es recopilar imágenes científicas para geología, además de realizar pruebas de sistemas de banda ultra ancha (UWB) para localización relativa.

Figura 3.
Rover lunar IRIS



Fuente: IRIS LUNAR ROVER. (s.f.). Tiny rover huge ambitions. https://irislunarrover.space/index.html

El rover lunar presentado en la figura 4, fue desarrollado por la Agencia de exploración aeroespacial de Japón JAXA junto a la compañía TOMY, SONY y la universidad Doshisha (JAXA, 2021). Su objetivo es obtener datos de la superficie lunar que permitirá estudiar el diseño de un rover presurizado y tripulado. Pretende ser ultra compacto y ultraliviano, y su diseño le permitirá cerrarse para avanzar largas trayectorias; permitiendo a su vez que se requiera un menor espacio de transporte hacia la luna.

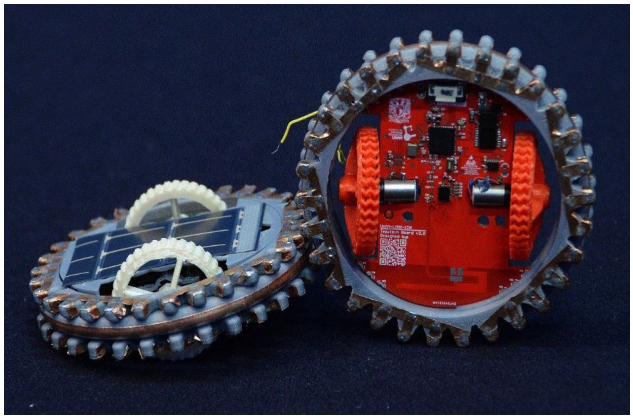
Figura 4.
Rover lunar JAXA

Nota. La imagen de la izquierda representa al robot antes de su transformación. Tomado de JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). (2021, Mayo 27). Data Acquisition on the Lunar Surface with a Transformable Lunar Robot, Assisting Development of the Crewed Pressurized Rover. https://global.jaxa.jp/press/2021/05/20210527-1_e.html

Finalmente, en la Figura 5 se presenta el rover lunar COLMENA, el cual forma parte de los 9 rovers desarrollados por el laboratorio de instrumentación espacial (LINX) de la Universidad Autónoma de México (UNAM) y es respaldado por la Agencia Espacial Mexicana (AEM). Estos rovers serán llevados a la superficie de la Luna por la empresa Astrobotic.

Entre sus objetivos científicos se encuentra la medida de la densidad de polvo de regolito, asociado a la acción de la radiación solar que conduce a la formación de un plasma sobre la superficie lunar. COLMENA fue desarrollado en conjunto con la Secretaría de Relaciones Exteriores, la Agencia Espacial Mexicana y el Estado de Hidalgo. TECREVIEW (2019) indica que la carga útil "incluye nueve robots, así como un módulo de telecomunicaciones, telemetría y lanzamiento, con una masa total de 500 gramos.

Figura 5.
Rover lunar COLMENA



Nota. Tomado de TECREVIEW. (2019, octubre 1). COLMENA, the Mexican mission that will take robots to the moon. https://tecreview.tec.mx/2019/10/01/en/science/colmena-the-mexican-mission-that-will-take-robots-to-the-moon/

En las siguientes secciones se explica la manera en que serán diseñados, ensamblados y validados estos subsistemas, aprovechando las capacidades de las entidades nacionales, la diáspora de científicos colombianos y empresarios innovadores, todos aportando ideas, prototipos y proyectos encaminados a solucionar demandas departamentales y nacionales.

2. METODOLOGÍA

Para esta propuesta, se selecciona la metodología de Ingeniería de Sistemas, en su segunda revisión adaptada por la NASA. Esta elección se debe al éxito que ha tenido en múltiples proyectos aeroespaciales a nivel mundial. Esta metodología permite un desarrollo lógico, sistemático y controlado de las actividades que conducen al cumplimiento de los objetivos.

La metodología de NASA Systems Engineering para el ciclo de vida de un producto y una misión espacial (Hirshorn et al., 2017), presentada en la Figura 6, se divide en tres actividades principales y seis fases. Al mismo tiempo, entre el diseño preliminar y la fabricación y ensamblaje, se utiliza la metodología del proceso en V de Ingeniería de Sistemas para el desarrollo de productos, como se muestra en la Figura 7.

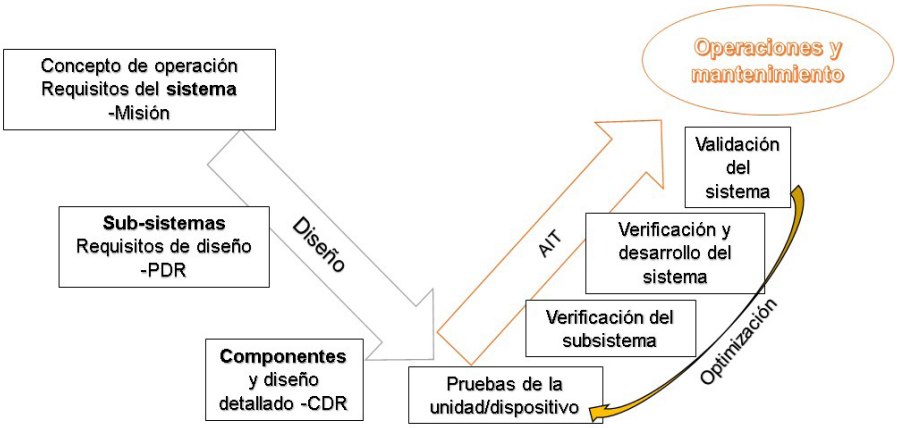
Figura 6.

Diagrama metodológico general del ciclo de vida del proyecto para sistemas espaciales NASA

Nota. Adaptada Systems Engineering Handbook Rev. 2, NASA, p. 8 (Hirshorn et al., 2017).

Figura 7.

Diagrama del proceso en V de la Ingeniería de Sistemas para desarrollo de producto, NASA



Nota. Adaptada Systems Engineering Handbook Rev. 2, NASA (Hirshorn et al., 2017).

A continuación, se presentan las tres actividades principales, junto con sus medios de verificación para la estructuración de la metodología.

Actividad 1: Análisis preliminar de la misión.

- Resultados de la actividad: artículos científicos.

- Medio de verificación: Dos artículos científicos publicados en revistas especializadas internacionales.

Actividad 2: Diseño preliminar, conceptual y detallado del sistema espacial a partir de los requisitos.

- Resultados de la actividad: Elaboración e integración de subsistemas.
- Medio de verificación: Diseño del vehículo, de la carga útil, diagrama del circuito eléctrico y estructura.

Actividad 3: Integración y pruebas.

- Resultados de la actividad: prototipos funcionales y modelo sometido a pruebas de cualificación.

Medio de verificación: Un prototipo del micro vehículo robótico y otro prototipo de la carga útil.

La parte de formulación que relaciona la pre-fase A y fase A da cumplimiento a la actividad 1. Con la elaboración de las fases B y C de la metodología se da cumplimiento a la actividad 2. Para este proyecto solo se va a desarrollar hasta la fase D del ciclo de vida de producto de ingeniería de sistemas de NASA, porque no se tiene planteado el lanzamiento.

En la Figura 6 y la Figura 7 se presentan los diagramas de la metodología general y la metodología de desarrollo de producto entre las fases B y D. Las siglas AIT provienen del inglés de Ensamble, Integración y Pruebas, PDR del documento de revisión del diseño preliminar y CDR de la revisión crítica de diseño.

3. RESULTADOS

Los antecedentes presentados en la introducción validaron la selección de uno de los cráteres Garavito, ubicado en el lado no visible de la Luna, como el objetivo a alcanzar mediante un rover de exploración in situ. Además, se consolidó el conjunto de entidades, que incluye empresas y universidades,

que participaron en todas las fases del proyecto. Se diseñó un esbozo y una estrategia de difusión del proyecto y sus componentes a través de medios, redes y entidades nacionales e internacionales.

La componente financiera asociada a los objetivos de la propuesta fue formulada e involucra la participación de las universidades a través de los semilleros de investigación e innovación, el sector empresarial y personas naturales. Los resultados ya obtenidos permitirán la implementación de la metodología de diseño de sistemas espaciales en el contexto nacional. Esto incluye la selección de componentes comerciales e integración de subsistemas que cumplan con los requisitos para el logro de los objetivos de la misión.

Adicionalmente, se validó el sitio conocido como Campamento Orión, ubicado en el desierto de la Tatacoa, zona de Villa Vieja (Huila), como lugar para la evaluación y puesta a prueba de algunas de las fases del proyecto.

4. DISCUSIÓN

El desarrollo del proyecto aeroespacial colombiano ha sido, desde hace más de 25 años, una iniciativa que no ha encontrado su nicho de desarrollo. Los documentos que dieron lugar a la constitución de la Comisión Colombiana del Espacio, que expresa en su documento de creación:

> *Colombia, a través de la Comisión Colombiana del Espacio – CCE, entidad adscrita a la Vicepresidencia de la República creada por Decreto 2442 de julio 18 de 2006 es el órgano intersectorial de consulta, coordinación, orientación y ejecución de la política nacional para el desarrollo y aplicación de las tecnologías espaciales, y coordina la elaboración de planes, programas y proyectos en este campo a través de sus siete grupos de trabajo: Gestión del conocimiento y la investigación, Navegación satelital, Observación de la Tierra, Astronáutica, astronomía y medicina aeroespacial, Telecomunicaciones Asuntos políticos y legales e Infraestructura colombiana de datos espaciales. Al respecto, se ha venido trabajando en iniciativas tendientes a la creación de una Agencia colombiana de asuntos espaciales, el desarrollo espacial y aeroespacial en Colombia y la adquisición de un satélite o de constelación de estos para observación de la Tierra para sus diferentes aplicaciones (ordenamiento*

territorial, catastro, gestión de riesgo, agricultura de precisión, monitoreo de la biodiversidad y de seguridad y defensa nacional.

La Comisión Colombiana del Espacio (CCE), que claramente en el numeral 4, del artículo 4 del decreto 2442 de 2006 expresa:

"[...] como función de la CCE, coordinar la política para la creación de estímulos a la participación de universidades y otras instituciones de investigación para el desarrollo científico y tecnológico en actividades espaciales*"*, y cuyo primer documento de referencia es la Política de Desarrollo Espacial - CONPES 3983 en el que se reafirma:

> Las estrategias para el desarrollo de la política son: en primer lugar, identificar y sentar las bases para construir una visión de largo plazo del sector espacial en Colombia, mediante la caracterización de las capacidades científicas y tecnológicas del país, la comprensión del mercado de bienes y servicios satelitales, y la implementación de una estrategia de promoción de la educación, conocimiento y curiosidad científica en temas espaciales (p. 3).

Estos procesos fundamentalmente administrativos no han generado liderazgos de Estado, Gobierno y Sociedad que tengan como resultado el desarrollo de prototipos en el entorno de tecnologías aeroespaciales. En esta dirección " el desarrollo de un modelo de cualificación de un rover lunar" presentado en este trabajo apunta en la dirección de culminar una primera fase enmarcada en detro de la propuesta "2030: Objetivo Cráter Garavito" cuyo eje y fundamento se centra en que:

> Es un paso fundamental para el desarrollo científico del país, en el que un grupo de expertos identifica las necesidades de una misión espacial, para el diseño fabricación, integración y pruebas de un módulo de servicios con su carga útil: un explorador lunar, que permita desarrollar un conjunto de experimentos científicos al interior de uno de los cráteres denominados con el apellido del científico colombiano Julio Garavito Armero. (Higuera-G, Mario-A., diciembre 2021)

Los resultados de la primera fase presentada en este artículo del grupo interdisciplinario: AstroCO-Robótica, configuran el punto de partida en

el que la academia como parte del sector público, el sector privado y otras entidades como la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), se unan alrededor del proyecto de llevar un desarrollo móvil robótico a la superficie de la Luna, en particular al cráter Garavito.

5. CONCLUSIONES

La participación de Colombia en los tratados Artemis de los Estados Unidos brinda una oportunidad para el transporte de experimentos, cargas científicas y comerciales a la superficie de la Luna, desarrolladas por instituciones nacionales. Con este proyecto, se propone el diseño y desarrollo de un sistema espacial robótico o micro vehículo robótico de superficie lunar para aprovechar los tratados Artemis y las futuras misiones comerciales a la Luna. El objetivo es adquirir experiencia en el desarrollo de este tipo de sistemas espaciales en el país, fortalecer las capacidades de las instituciones nacionales en tecnología espacial y fomentar la cadena productiva de la economía espacial.

La trayectoria del país en el desarrollo de proyectos de pequeños satélites, junto con las empresas de tecnología que desarrollan robots, permite identificar las capacidades tecnológicas necesarias para el desarrollo de subsistemas espaciales e integración de un sistema espacial como el vehículo robótico (rover). Esto es posible siempre y cuando se utilicen componentes comerciales tipo COTS para reducir los costos y los tiempos de producción.

La metodología de sistemas de la NASA, combinada con los bajos costos de producción y la implementación de tecnología comercial, hacen viable el diseño de un micro vehículo robótico de superficie para operar en la Luna, siempre y cuando cuente con el soporte de transporte y comunicaciones de las naves espaciales comerciales.

La metodología propuesta, junto con las entidades que conforman la alianza para el desarrollo del proyecto, permite que, al implementar de manera lógica y ordenada las actividades, sea posible el diseño, ensamblaje, integración y pruebas de ambiente espacial de un modelo de cualificación. Este modelo estará listo para ser probado en laboratorios que simulan el ambiente espacial, lo que aumentará las capacidades de desarrollo tecnológico espacial en Colombia.

6. REFERENCIAS

AstroCO-ACCEFYN. (2022) Información en línea: https://accefyn.com/microsites/nodos/astroco/

Buckley, Michael. (2021, noviembre 18). Lunar Vertex: Solving Mysteries Swirling around the Moon's Magnetic Regions. https://www.jhuapl.edu/NewsStory/211018b-lunar-vertex

Campamento Orión (2022). Información disponible en: https://orioncamp.com/

CANADA.CA. (2021, junio 4). Canada moves forward with plans to explore the Moon. https://www.canada.ca/en/space-agency/news/2021/05/backgrounder---canada-moves-forward-with-plans-to-explore-the-moon.html

CIUDAD UNIVERSITARIA. (2022, febrero 01). Ponen en marcha el proyecto colmena, la primera misión de México a la luna. Boletín UNAM -DGCS-087. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2022_087.html

CONPES 3983 (2020). Documento CONPES 3983. Política de desarrollo espacial: condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional. Departamento Nacional de Planeación, 13 de enero de 2022.

DEPARTMENT OF INDUSTRY, SCIENCE AND RESOURCES. AUSTRALIAN GOVERNMENT. (2021, octubre 13). Headed to the moon: the Trailblazer program and NASA space act agreement https://www.industry.gov.au/news/headed-to-the-moon-the-trailblazer-program-and-nasa-space-act-agreement

Ding, L. et al. (2022). A 2-year locomotive exploration and scientific investigation of the lunar farside by the Yutu-2 rover. Science robotics. V. 7 (62). https://doi.org/10.1126/scirobotics.abj666

DYMON. (s.f.). Lunar Rover "YAOKI". https://dymon.co.jp/en/yaoki/

Enciso Systems SAS (2022). Información disponible en: https://www.encisosystems.com/

GRUPLAC 7041 (2022). Información disponible en: https://scienti.minciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000000286

Higuera-G, M-A. (2021, 23 de diciembre). 2030: objetivo cráter Garavito. unperiodico.unal.edu.co. Tomado agosto 31, 2022, https://unperiodico.unal.edu.co/pages/detail/2030-objetivo-crater-garavito/

Hirshorn, S. R., Voss, L. D., Bromley, L. K. (2017). NASA systems engineering handbook (No. HQ-E-DAA-TN38707).

ICRA, (2022). Información disponible en: https://www.icra.com.co/?lang=en

IRIS LUNAR ROVER. (s.f.). Tiny rover huge ambitions. https://irislunarrover.space/index.html

Jaffe, L. D. (1967), Lunar surface exploration by Surveyor spacecraft: Introduction, J. Geophys. Res., 72(2), 773– 778, https://doi.org/110.1029/JZ072i002p00773

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). (2021, Mayo 27). Data Acquisition on the Lunar Surface with a Transformable Lunar Robot, Assisting Development of the Crewed Pressurized Rover. https://global.jaxa.jp/press/2021/05/20210527-1_e.html

Joya, R. (2007). Libertad 1, primer satélite colombiano en el espacio. Revista Innovación y Ciencia, 14, 16-23.

Krasilnikov, S.S., Basilevsky, A.T., Ivanov, M.A. et al. (2021) Geological and Geomorphological Characteristics of High-Priority Landing Sites for the Luna-Glob Mission. Sol Syst Res 55, 83–96. https://doi.org/10.1134/S0038094621010056

León-Lozada, F. (2018, 3 de diciembre). La Fuerza Aérea de Colombia lanzó Facsat-1. Latam Satelital. http://latamsatelital.com/la-fuerza-aerea-colombia-lanzo-facsat-1/

Li, C., Liu, J., Ren, X. et al. The Chang'e 3 Mission Overview. Space Sci Rev 190, 85–101 (2015). https://doi.org/10.1007/s11214-014-0134-7

Ley 2107 (2021). Por medio de la cual se aprueba el «tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la luna y otros cuerpos celestes» suscrito el 27 de enero de 1967 en Washington, Londres y Moscú. El Congreso de Colombia.

Matijevic J., Shirley, D. (1997) The mission and operation of the mars pathfinder microrover. Control Engineering Practice, V. 5(6), pp. 827-835, https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)00067-1.

Minciencias (2019). Propuestas de la Misión Internacional de Sabios 2019. Disponible en: https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/propuesta-sabios-txt_y_portada-alta.pdf

NASA (2017) CubeSat Launch Initiative. Cubesat 101: basic concepts and processes for first-time CubeSat developers. no. October, N96.

Nishida, S. & Wakabayashi, S. (2012). Lunar surface exploration using mobile robots. Open Engineering, 2(2), 156-163. https://doi.org/10.2478/s13531-011-0072-z

OAN (2022). Información disponible en: http://ciencias.bogota.unal.edu.co/departamentos/observatorio-astronomico-nacional/el-observatorio/

Potter, S. (2022) Colombia firma los Acuerdos Artemis. NASA. https://www.nasa.gov/feature/colombia-firma-los-acuerdos-artemis.

Serrano, Carlos. Qué son los Acuerdos Artemisa con los que EE.UU. planea la minería en la Luna (y por qué causan tensión con Rusia). 2020. BBC. https://www.bbc.com/mundo/noticias-52780950.

Siddiqi, A. 2018. Beyond Earth: A Chronicle of Deep Space Exploration, 1958-2016. NASA History Program Office.

Shirley, D., Matijevic, J. Mars Pathfinder Microrover. Auton Robot 2, 283–289 (1995). https://doi.org/10.1007/BF00710795

SPACEBIT. (s.f.). To the moon. https://spacebit.com/

The Artemis Accords (2020). Principles for cooperation in the civil exploration and use of the Moon, Mars, comets, and asteroids for peaceful purposes. https://www.nasa.gov/specials/artemis-accords/index.html

The Rover Team. (1997). The Pathfinder Microrover, J. Geophys. Res., 102(E2), 3989– 4001, https://doi.org/10.1029/96JE01922

Universidad Nacional de Colombia. (2021, diciembre 15). El observatorio [video]. http://ciencias.bogota.unal.edu.co/departamentos/observatorio-astronomico-nacional/el-observatorio/

Wertz, J. R., Everett, D. F., & Puschell, J. J. (2011). Space mission engineering: the new SMAD. Microcosm Press.

CAPÍTULO

13

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INFORMÁTICO PARA LA GESTIÓN DE DOCUMENTOS QUE SOPORTAN LA TRAZABILIDAD DE PELIGROS ASOCIADOS AL DESARROLLO Y FABRICACIÓN DE PRODUCTOS AERONÁUTICOS

MY. Carlos Arturo Hernández Ramírez
carlos.hernandezr@fac.mil.co
Sección de Ingeniería en el Grupo Técnico del Comando Aéreo de Transporte Militar (CATAM). Fuerza Aeroespacial Colombiana

Resumen

"System Safety Assessment (SSA)" es una metodología empleada en diferentes industrias en la que se utilizan diversas técnicas y métodos. Su objetivo es identificar, evaluar y mitigar los riesgos inherentes al ciclo de vida de un sistema, ya sea un elemento individual o un conjunto más complejo. El propósito fundamental de esta metodología es garantizar la seguridad del producto, permitiendo su correcta operación mientras se limita la probabilidad de fallas al mínimo aceptable de acuerdo con la autoridad competente.

Dado que la gestión de los riesgos evaluados debe llevarse a cabo de manera integral a lo largo del ciclo de vida del producto mediante la herramienta Hazard Tracking System (HTS), y en busca del desarrollo de la industria aeronáutica nacional, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema informático para gestionar la trazabilidad de los peligros asociados al desarrollo y fabricación de productos aeronáuticos, siguiendo la metodología de SSA.

Como uno de los pasos fundamentales para lograr este objetivo, este documento tiene la finalidad de presentar el desarrollo del proyecto, así como la metodología SSA, con el fin de que el lector comprenda la importancia de implementarla en el desarrollo de proyectos orientados a la fabricación de componentes aeronáuticos.

Palabras clave: Evaluación de peligros, Riesgo, System Safety Assessment.

Abstract. The System Safety Assessment (SSA) is a methodology used in different industries, in which various techniques and methods are used, within it is sought to identify, evaluate and mitigate risks intrinsic to the life cycle of a system, which can be a single element or a more complex setting, and which seeks to grant it a safety condition that allows its correct operation while limiting the probability of failure to the minimum acceptable by the pertinent authority.

Since the management of the evaluated risks must be carried out across the life cycle using a Hazard Tracking System (HTS) tool, and seeking the development of the national aeronautical industry, the ongoing project's objective is to design and implement a software for the management of

documents that supports the traceability of hazards associated with the development and manufacture of aeronautical products, framed under the SSA methodology.

As one of the steps to achieve this objective, this document has the purpose of presenting the project development as well as the SSA methodology and generating in the reader a notion of the importance of its implementation into the development of his/her projects aimed at manufacturing aeronautical components.

Keywords: Risk assessment, Risk, System Safety Assessment

1. INTRODUCCIÓN

Evaluación de seguridad del sistema (System Safety Assessment - SSA) es una metodología ampliamente empleada en diversas industrias. Su propósito es identificar, evaluar y mitigar los riesgos presentes a lo largo del ciclo de vida de un elemento o sistema, desde la fase de diseño inicial hasta su eliminación una vez que ha completado su vida útil. Esta metodología involucra una serie de técnicas y herramientas utilizadas por ingenieros de sistemas y partes interesadas en el proceso de evaluación del sistema. Su objetivo es reducir el riesgo inherente a accidentes o situaciones no deseadas, y se basa en una amplia gama de disciplinas y áreas de conocimiento relacionadas con el producto en cuestión.

La implementación temprana del SSA en el proceso de fabricación de componentes aeronáuticos es crucial. Esta metodología no solo se centra en la identificación y prevención de características o condiciones de riesgo, sino que también proporciona las herramientas necesarias para demostrar el cumplimiento de los requisitos de seguridad. Estos requisitos son establecidos por regulaciones como el Título 14, Parte 21, Subparte B, § 21.50 (i) de la Federal Aviation Authority (FAA) o el Título 14, Parte 25, Subparte F, § 25.1309, relacionados con la seguridad de los componentes, sistemas e instalaciones aeronáuticas que buscan certificarse. Normativas similares se encuentran en organismos aeronáuticos diferentes a la FAA, como la normativa CS 25.1309 de la European Aviation Safety Agency (EASA).

Es importante destacar que el SSA es un proceso que abarca todo el ciclo de vida del producto y, por lo tanto, su uso continuo, especialmente durante la fase de servicio del componente, junto con la gestión efectiva de los datos de confiabilidad, permite evaluar la eficacia de las medidas de mitigación implementadas para reducir la probabilidad de fallos asociados a los riesgos identificados. Esta información es esencial como referencia para la reducción de riesgos en el desarrollo de productos similares. La gestión de esta información se realiza a través del Hazard Tracking System (HTS) del sistema evaluado, cuyas características se describen en la normativa aplicable mencionada en este documento.

Dadas las ventajas de implementar el SSA en un sistema de producción de componentes mecánicos y la necesidad de cumplir con los requisitos de certificación de nuevos productos aeronáuticos, se presenta el proyecto "Diseño e implementación de un sistema informático para la gestión de documentos que respaldan la trazabilidad de los peligros asociados al desarrollo y fabricación de productos aeronáuticos" en el marco de la convocatoria 1017-2020 realizada por MINCIENCIAS. Esta convocatoria se enfoca en presentar propuestas para la ejecución de proyectos de I+D+I destinados a fortalecer los grupos de I+D+I de la FAC y sus programas estratégicos de CTEI - 2019. Es importante mencionar que, aunque existen herramientas similares en el mercado internacional, ninguna de las soluciones de software encontradas satisface plenamente las necesidades del mercado colombiano, lo que puede resultar en costos adicionales y la adquisición de herramientas sobredimensionadas para la industria local.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se planeó en etapas que cubrirían el proceso de adquisición de información, análisis de datos recolectados y desarrollo de la herramienta en forma de aplicativo HTS.

Las actividades propuestas y como han sido ejecutadas se presenta a continuación:

Actividad 1: Revisión y contextualización de normatividad nacional e internacional. Estado actual de la manufactura e ingeniería nacional.

La primera actividad tenía como objetivo establecer el estado del arte en relación con la fabricación de componentes aeronáuticos y la prestación de servicios aeronáuticos conforme a las normativas nacionales e internacionales vigentes.

Durante los primeros meses del proyecto, el personal involucrado participó en capacitaciones proporcionadas por la Oficina de Certificación Aeronáutica de la Defensa (SECAD-FAC). Esta entidad tiene la misión de "Normalizar, Calificar y Certificar Productos Aeronáuticos para el fomento y desarrollo de la industria aeronáutica a través de la integración de capacidades de la Fuerza Aérea Colombiana y la Aeronáutica Civil". Las capacitaciones ofrecidas permitieron al equipo identificar la normativa aplicable al SSA, comprender la estructura de su metodología, y familiarizarse con los métodos y técnicas de análisis asociados.

Además de la formación brindada por SECAD-FAC, la capacitación del personal involucrado en el proyecto se complementó mediante el acceso a recursos proporcionados por bases de datos disponibles tanto en la Escuela de Posgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (EPFAC) como en las bases de datos contratadas durante el desarrollo del proyecto.

Actividad 2: Identificación de entradas de proceso asociadas con System Safety / Structural Integrity.

Mediante esta actividad, el objetivo era caracterizar los requisitos para el diseño del modelo de procesos destinado al desarrollo de productos aeronáuticos seguros, de acuerdo con las metodologías de System Safety (seguridad asociada a los sistemas instalados en la aeronave para su operación) y Structural Integrity (seguridad relacionada con la propia aeronave).

Las entradas al proceso de SSA se identificaron a partir de la normativa aplicable a esta metodología. Además, se consultó a un equipo de expertos y a empresas con experiencia en el desarrollo de productos aeronáuticos para obtener información sobre los tipos de datos y los procesos relacionados con el seguimiento de riesgos en sus respectivos sectores. Para llevar a cabo estas tareas, resultó esencial contar con el asesoramiento de personal con experiencia en la realización de análisis de SSA y expertos en su implementación en diversas industrias.

Actividad 3: Sondeo de Competencias de proveedores nacionales.

Para esta actividad, se creó una herramienta de medición en forma de encuesta con la finalidad de caracterizar las competencias, los sectores de manufactura y el grado de implementación de las metodologías de seguimiento de riesgo en las empresas que accedieron a participar en el estudio.

La implementación de esta herramienta de medición permitió identificar el nivel de madurez en la implementación de los siguientes aspectos en las empresas:

- Implementación de Systems Engineering.
- Implementación de modelos basados en System Engineering.
- Implementación de modelos de maduración en diseño de productos.
- Métodos específicos de diseño de cadenas de manufactura asociadas con productos sensibles para la seguridad.
- Dominio de métodos analíticos de identificación de peligros y evaluación de riesgos.
- Dominio de métodos de análisis cuantitativo de confiabilidad.
- Dominio de métodos de planeación de pruebas.
- Disponibilidad de capacidades o servicios de pruebas.
- Presencia de Sistemas de calidad con un módulo de mejora continua funcional.
- Prácticas de trazabilidad de materiales, equipos y componentes.
- Procesos internos o tercerizados de aseguramiento de habilidades administrativas, técnicas y de ingeniería del personal dentro del sus equipos de trabajo.
- Disponibilidad de certificaciones previas aeronáuticas.
- Disponibilidad de certificaciones previas no aeronáuticas pero relevantes para manufactura aeronáutica.
- Parque industrial de manufactura y sectores desempeño.
- Dotación de software y herramientas analíticas para diseño eléctrico, mecánico y afines.

- Capacidad de modelamiento y simulación de sistemas electromecánicos.

Las tareas asociadas a esta actividad abarcaron la generación de un compendio de empresas pertenecientes a la industria colombiana que poseen la capacidad instalada suficiente para ingresar en el sector de fabricación de componentes aeronáuticos. Para llevar a cabo esta labor, resultó fundamental identificar las empresas que mantienen algún tipo de relación con la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) y, a partir de esta identificación, caracterizar el nivel de madurez en lo que respecta a la identificación y seguimiento de riesgos asociados a sus procesos de producción.

Actividad 4: Análisis de brechas de capacidades y competencias proveedores nacionales de manufactura.

Gracias al desarrollo de las actividades previas, se logró recopilar datos suficientes para llevar a cabo un análisis de la información recopilada. Esto permitió identificar el nivel de implementación de las metodologías de SSA en comparación con los requisitos de las autoridades aeronáuticas locales e internacionales en los procesos de certificación de nuevos productos aeronáuticos.

La información recopilada posibilitó la realización de un análisis de brechas. Este análisis no solo identificó las necesidades de desarrollo de los fabricantes nacionales en el ámbito de la seguridad, sino que también proporcionó datos sobre la secuencia de tareas necesarias para la integración del SSA en cualquier sistema productivo colombiano. Estas tareas sirvieron de base para la formulación de un modelo de procesos que se desarrollará en la actividad 5.

Actividad 5: Formulación de Modelo de procesos de desarrollo de productos aeronáuticos.

Una vez que se han identificado y priorizado las necesidades generales de los fabricantes nacionales en relación con el desarrollo de productos aeronáuticos seguros, se procede a la estructuración de un modelo de trabajo basado en procesos. Este modelo tiene como objetivo facilitar la implementación de la metodología SSA en el proceso productivo de cualquier empresa dedicada a la fabricación de productos aeronáuticos.

El modelo debe ser lo suficientemente genérico para permitir su implementación en diversos sectores de manufactura e incluir tareas y actividades que permitan evaluar aspectos como los siguientes: Los bloques de trabajo (macroprocesos) en los que se puede segmentar el desarrollo de un producto aeronáutico.

- Los participantes más importantes en la cadena de fabricación de productos seguros.
- Las interacciones entre todos los participantes del "ecosistema" de manufactura aeronáutica. En este punto se trata de identificar entregables específicos como "Producto Aeronáutico" o "Diseño aprobado" o "Certificación de producto" de manera que el proceso quede adecuadamente definido y de manera que sea posible establecer que tipos específicos de información se manejan a lo largo de todo el ciclo de trabajo.

Actividad 6: Consolidación de Requerimientos I.T del HTS.

A partir de la identificación de entradas al proceso de identificación, evaluación y mitigación de riesgos se formuló de forma detallada la consolidación de requerimientos de IT del aplicativo de seguimiento de riesgos (Hazard Tracking System – HTS).

Los requerimientos recopilados permitieron dar una visión general del producto que se busca obtener, y marca el punto de inicio necesario para que un equipo de desarrolladores pueda empezar la planeación del plan de trabajo por el cual se generará el software requerido.

Actividad 7: Desarrollo aplicativo Web HTS Versión 1.0

Mediante el pliego de requerimientos obtenido en la actividad anterior, fue posible la escogencia de un equipo de desarrolladores que se encargaría de la construcción del aplicativo web.

Una vez seleccionada la empresa encargada del desarrollo del aplicativo web HTS, se planteó un plan de trabajo que permitiría realizar avances periódicos hasta obtener el producto esperado con las funciones necesarias para generar

el seguimiento de riesgos identificados durante los procesos de diseño y desarrollo de nuevos productos aeronáuticos.

Ya que el aplicativo desarrollado será una herramienta hecha a medida, no se puede descartar la posibilidad de llegar a duplicar herramientas o prestación de software con los que ya cuenta la FAC. Por lo anterior, fue necesario caracterizar las herramientas contratadas actualmente por la FAC, con el fin de integrar el aplicativo HTS a las capacidades instaladas sin generar redundancias en procesos y procedimientos.

Actividad 8: Despliegue a usuarios iniciales.

Como paso final, la versión finalizada del Software del HTS será "hosteada" en un servicio de hosteo de aplicaciones. Preliminarmente se han estimado las características y los costos de Amazon Web Services (AWS) pero de ser necesario, este proveedor podrá ser modificado posteriormente.

Con el aplicativo desplegado se procederá a la socialización de la capacitación en el proceso y en el aplicativo que permitirá que todas las empresas puedan dotarse de las capacidades para integrarse al programa de desarrollo de componentes aeronáuticos seguros.

Métodos para aplicar. Los métodos relevantes para aplicar a lo largo de todo el proyecto son:

- Entrevistas estructuradas, para la recolección de capacidades y competencias de fabricantes nacionales.
- IDEF0, para la caracterización y presentación de los procesos a partir de la información normativa y del levantamiento de capacidades de los fabricantes nacionales.
- Virtualización de capacitación, para la divulgación de los resultados del proyecto, de las definiciones de procesos creadas y para la capacitación en las herramientas informáticas desarrolladas.

3. MARCO TEÓRICO

Conceptos clave:

Accidente - Suceso eventual o acción que resulta en daño involuntario a personal, equipos, infraestructura o ambiente.

Hazard Tracking System (HTS) - Las características básicas de un HTS se encuentran descritas en la normativa MIL-STD-882E Task 106 pag. 38. En esta sección se plantea al HTS como el mecanismo para lograr y mantener un ciclo cerrado en la información concerniente a los riesgos evaluados. Un HTS tiene la función de administrar todos los documentos y análisis; y trazar el estado de los riesgos identificados y evaluados con las herramientas enmarcadas en el SSA.

Ingeniería del sistema (SE) - Es el campo de la ingeniería que ejecuta procesos interdisciplinarios orientados al diseño, creación y operación de sistemas.

Severidad - Nivel cuantitativo, semicuantitativo o cualitativo que describe los resultados de un peligro. Su evaluación se realiza en función del tipo de consecuencias generadas, ya sea muerte; perdida de equipo o propiedad; lesión; discapacidad; daño al entorno; o perdida monetaria.

Nivel de riesgo aceptable - Estado o condición de control de riesgo mínimo del sistema que la autoridad en seguridad está dispuesta a aceptar.

Nivel de riesgo requerido - Estado o condición de control de nivel de riesgo del sistema, que debe ser demostrado mediante los medios aceptables de cumplimiento pertinentes.

Peligro - Condición real o potencial que puede conducir a un evento o serie de eventos no planeados (por ejemplo, un Accidente) con consecuencias como muerte, perdida de equipo o propiedad, lesión, discapacidad o daño al entorno.

Probabilidad - Medida que describe el grado de ocurrencia, o la frecuencia con la que puede llegar a ocurrir un suceso. Aplica a eventos cuyo momento de ocurrencia preciso no puede ser establecido de manera determinística por tratarse de un fenómeno aleatorio. (Fuerza Aérea Colombiana, 2018).

Riesgo - Es la evaluación de frecuencia de ocurrencia (Probabilidad) y del nivel de peligro asociado (Severidad). La asignación del nivel de riesgo de un peligro requiere su clasificación frente a una matriz de riesgo, en función de su probabilidad de ocurrencia y su valoración de severidad.

Seguridad - Para entender en que campo debe aplicarse el SSA, primero debe explicarse el concepto de seguridad, cuya definición la describe como el estado en que se está libre de aquellas condiciones que pueden causar la muerte, lesiones, enfermedades ocupacionales, daño o pérdida de equipo o propiedad, o daño al medio ambiente. En cualquier aplicación dada, el alcance específico de la seguridad debe estar claramente definido por las partes interesadas en términos de las entidades a las que se aplica y las consecuencias contra las cuales se evalúa. Por ejemplo, para los sistemas no reutilizables y / o no recuperables, el daño o la pérdida del equipo puede ser significativo solo en la medida en que se traduzca en una degradación o pérdida de los objetivos de la misión. (NASA, 2011). Se debe hacer una distinción entre los términos Safety y Security empleados en la bibliografía internacional, ya que en español normalmente se manejan de forma indistinta bajo el concepto de Seguridad, pero en el contexto de evaluación de seguridad del sistema, Safety se refiere a las condiciones de desarrollo, mientras que Security hace referencia a la seguridad operacional.

Sistema- La organización o agrupación de hardware, software, materiales, infraestructura, personal, información y/o servicios que se interrelacionan para cumplir una función con resultados específicos dentro de un entorno determinado.

System Safety / Seguridad del Sistema - Es una disciplina de ingeniería que busca identificar y eliminar peligros cuando esto sea posible, o calcular el riesgo para peligros que no pueden ser eliminados, para luego reducir estos riesgos a valores que se consideren aceptables de acuerdo con los requerimientos específicos del producto aeronáutico. La Seguridad del Sistema toma cuerpo en su proceso asociado que indica la manera como se hace la aplicación concurrente de métodos de identificación de peligros y análisis de riesgos y la aplicación de conocimiento especializado de ingeniería que permita identificar peligros y poner en control riesgos a través de la actualización de las definiciones y acciones de ingeniería que dan forma al producto aeronáutico hasta lograr obtener el nivel de seguridad requerido. (Fuerza Aérea Colombiana, 2018)

Objetivos del SSA

La FAA por medio de su System Safety Handbook (FAA, 2000) describe los siguientes como los objetivos de la metodología SSA:

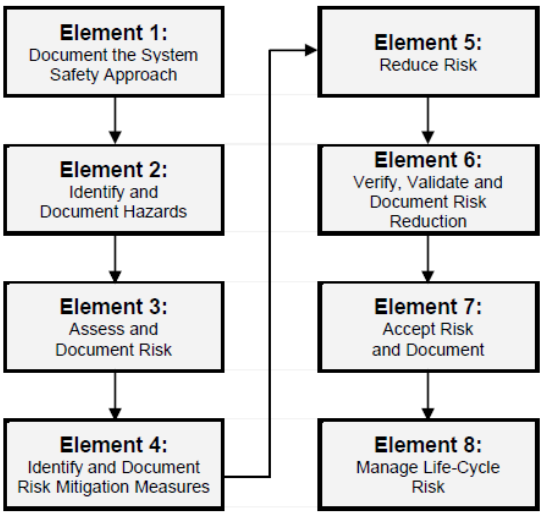
- Cumplir los requerimientos de la misión, dentro de una manera oportuna y rentable.
- Identificar los peligros asociados con el sistema y sus subsistemas, así como su rastreo, evaluación y eliminación, o reducción del riesgo asociado a un nivel aceptable para la administración de la Autoridad pertinente (FAA) durante todo el ciclo de vida de un sistema.
- Aplicar el orden de precedencia del diseño de seguridad y la administración de la Autoridad pertinente (FAA) para aceptar un riesgo residual.
- Realizar análisis y evaluaciones de seguridad de riesgo, en apoyo de los esfuerzos de gestión en seguridad de la Autoridad pertinente (FAA) y que están de acuerdo con las mejores prácticas de ingeniería de seguridad.
- Considerar los datos históricos de seguridad, incluidas las lecciones aprendidas de otros sistemas. y se utilizarlos en evaluaciones y análisis de seguridad.
- Buscar un riesgo mínimo al aceptar y utilizar nuevas tecnologías, materiales o diseños: y nuevas técnicas de producción, prueba y operación en el NAS.
- Minimizar las acciones de modernización necesarias para mejorar la seguridad, mediante la inclusión oportuna de características de seguridad durante la investigación, el desarrollo de tecnología y la adquisición de un sistema.
- Ejecutar los cambios en los requisitos de diseño, configuración o misión que se logran en una manera que mantenga un nivel de riesgo aceptable para la administración de la Autoridad pertinente (FAA).
- Tener presente el principio del ciclo de vida la seguridad del sistema hasta su finalización, que incluye el desmantelamiento del sistema.
- Administrar los datos de seguridad significativos que se documentan como “lecciones aprendidas” y se envían a los datos bancos o como cambios propuestos a los manuales y especificaciones de diseño aplicables.

4. MARCO LEGAL Y DOCUMENTOS DE REFERENCIA

Algunos de los documentos que nos presentan la estructura y métodos para la planeación y ejecución de un SSA son:

MIL-STD 882E Department of Defense Standard Practice - System Safety – Documento aprobado por el Departamento de Defensa de Norteamérica (DoD por sus siglas en inglés). Se presenta como una práctica estándar fundamental en la Ingeniería de Sistemas, que expone el método general de identificación, evaluación y mitigación de peligros. Según esta normativa, el proceso de SSA requiere 8 pasos, los cuales no solo inician el siguiente nivel del proceso, sino que también alimentan el HTS, asegurando así que los riesgos asociados al sistema estén en constante evaluación y se haga un seguimiento a las medidas de mitigación propuestas (ver Figura 1).

Figura 1.
Los 8 elementos del proceso System Safety, de acuerdo con MIL-STD 882E. Sección 4.3



Fuente: Elaboración propia

El proceso comienza en el Elemento 1: Documentación del enfoque de SSA. Donde se plantea el enfoque y las características principales del proceso de evaluación de seguridad del sistema.

El Elemento 2 Identificación, Evaluación y Análisis de Peligros, involucra el uso de herramientas de identificación y evaluación preliminar de peligros, tal como PHL y PHA (Sección Métodos y Técnicas).

Como parte del proceso, en el Elemento 3, se debe realizar la evaluación de los peligros identificados en los pasos anteriores, con el fin de asignarles un valor de riesgo. Para esta tarea la norma ofrece una guía en cuanto a las categorías de severidad y probabilidad (ver Tabla 1 y Tabla 2).

Una vez se ha evaluado tanto la severidad y la probabilidad de cada peligro, es posible asignar un nivel de riesgo conforme a la Matriz de evaluación de riesgo descrita en la misma normativa (ver Tabla 3).

Mediante el Elemento 4, 5 y 6, se generan las medidas de mitigación que se consideran apropiadas para el nivel de riesgo asociado a cada peligro, se estructura el modelo de control de riesgos y se realiza la validación en la reducción de los riesgos. Este proceso es iterativo hasta alcanzar el nivel de riesgo requerido.

Debido a que el nivel de riesgo nunca puede llegar a ser completamente eliminado, en el Elemento 7 es posible documentar y aceptar el nivel de riesgo remanente en el sistema.

Finalmente, en el Elemento 8 se debe estructurar un plan de gestión de riesgo del ciclo de vida.

La documentación y respaldo de todo análisis generado durante el ciclo del SSA, debe ser registrado en el HTS del sistema.

Tabla 1.

Categorías de severidad (DoD, MIL-STD-882E,2012) Sección 4.3.3. a

SEVERITY CATEGORIES		
Description	**Severity Category**	**Mishap Result Criteria**
Catastrophic	1	Could result in one or more of the following: death, permanent total disability, irreversible significant environmental impact, or monetary loss equal to or exceeding $10M.
Critical	2	Could result in one or more of the following: permanent partial disability,injuries or occupational illness that may result in hospitalization of at least three personnel, reversible significant environmental impact, or monetary loss equal to or exceeding $1M but less than $10M.
Marginal	3	Could result in one or more of the following: injury or occupational illness resulting in one or more lost work day(s), reversible moderate environmental impact, or monetary loss equal to or exceeding $100K but less than $1M.
Negligible	4	Could result in one or more of the following: injury or occupational illness not resulting in a lost work day, minimal environmental impact, or monetary loss less than $100K.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.

Niveles de probabilidad (DoD, MIL-STD-882E,2012) Sección 4.3.3. b

PROBABILITY LEVELS			
Description	**Level**	**Specific Individual Item**	**Fleet or Inventory**
Frequent	A	Likely to occur often in the life of an item.	Continuously experienced.
Probable	B	Will occur several times in the life of an item.	Will occur frequently.
Occasional	C	Likely to occur sometime in the life of an item.	Will occur several times.
Remote	D	Unlikely, but possible to occur in the life of an item.	Unlikely, but can reasonably be expected to occur.
Improbable	E	So unlikely, it can be assumed occurrence may not be experienced in the life of an item.	Unlikely to occur, but possible.
Eliminated	F	Incapable of occurence. This level is used when potential hazards are identified and later eliminated.	Incapable of occurence. This level is used when potential hazards are identified and later eliminated.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.

Matriz de evaluación de riesgo. (DoD, MIL-STD-882E,2012) Sección 4.3.3. c

RISK ASSESSMENT MATRIX				
SEVERITY / PROBABILITY	Catastrophic (1)	Critical (2)	Marginal (3)	Negligible (4)
Frequent (A)	High	High	Serious	Medium
Probable (B)	High	High	Serious	Medium
Occasional (C)	High	Serious	Medium	Low
Remote (D)	Serious	Medium	Medium	Low
Improbable (E)	Medium	Medium	Medium	Low
Eliminated (F)	Eliminated			

Fuente: Elaboración propia

SAE ARP 4761 Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment – Este documento presenta los lineamientos para desarrollar análisis enmarcados en el SSA con características aceptables en la industria aeronáutica, así como la forma de emplear técnicas de análisis cuantitativos y cualitativos tales como: Fault Tree Analysis (FTA); Failure Mode and Effects Analysis (FMEA); Failure Modes and Effects Summary (FMES); Common Cause Analysis (CCA), que puede comprender: Zonal Safety Analysis (ZSA), Particular Risks Analysis (PRA), o Common Mode Analysis (CMA). Ver Métodos y técnicas.

SAE ARP 4754 Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems – Este documento analiza el desarrollo de sistemas de aeronaves teniendo en cuenta el entorno operativo y las funciones generales del sistema. Esto incluye la validación de los requisitos y la verificación de la implementación del diseño para la certificación y el aseguramiento del producto. Proporciona prácticas para demostrar el cumplimiento de las regulaciones y sirve para ayudar a una empresa a desarrollar y cumplir sus propios estándares internos teniendo en cuenta las pautas incluidas en esta normativa (SAE International, 2010).

Adicional a los documentos anteriormente mencionados, en la Tabla 4 se listan algunos de los textos que pueden ser empleados para conducir apropiadamente un SSA.

Tabla 4.
Documentos de referencia del proceso de evaluación de seguridad del sistema SSA (Fuerza Aérea Colombiana, 2018)

MIL-STD 882E	Department of Defense Standard Practice – System Safety
DoDI 5000.02	Operation of the Defense Acquisition System
DoDI 6055.07	Mishap Notification, Investigation, Reporting and Record Keeping
SAE ARP 4754	Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems
SAE ARP 4761	Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment
NASA FTA	Fault Tree Handbook with Aerospace Applications
H SystSäk E	Swedish Armed Forces Handbook on System Safety
SS DHB- S-001	NASA Dryden Handbook Code S - System Safety Handbook
FAA Seguridad del Sistema HDBK	FAA - System Safety Handbook

Fuente: Elaboración propia

5. MÉTODOS Y TÉCNICAS

A continuación, se listan los métodos y técnicas que abarca el SSA para generar evidencia aceptable. Sin embargo, no es el propósito de este texto explicar la forma de ejecución de estos, por lo que se recomienda al lector a revisar las referencias citadas para el entendimiento y ejecución de cada uno.

Métodos de análisis

- Preliminary Hazard List (PHL) – Lista preliminar de peligros.
- Preliminary Hazard Analysis (PHA) – Análisis preliminar de peligros
- Functional Hazard Assessment (FHA) – Análisis Funcional de peligros.
- Preliminary System Safety Assessment (PSSA) – Análisis preliminar de seguridad del Sistema.
- System Safety Assessment (SSA) – Análisis de seguridad del sistema.

Técnicas de análisis

- Fault Tree Analysis (FTA) – Análisis de Árbol de Fallas.
- Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) – Análisis de Modos y Efectos de Fallas.
- Dependence Diagramas – Diagramas de Dependencia.
- Markov Analysis (MA) – Análisis de Markov.
- Failure Modes and Effects Summary (FMES) – Resumen de Modos y Efectos de Fallas.
- Common Cause Analysis (CCA) – Análisis de Causa Común, que puede estar compuesto por:
    - Zonal Safety Analysis (ZSA) – Análisis Zonal de Seguridad.
    - Particular Risks Analysis (PRA) – Análisis Particular de Riesgos.
    - Common Mode Analysis (CMA) – Análisis de Modo Común.

Papel del SSA en la Fuerza Aérea Colombiana (FAC)

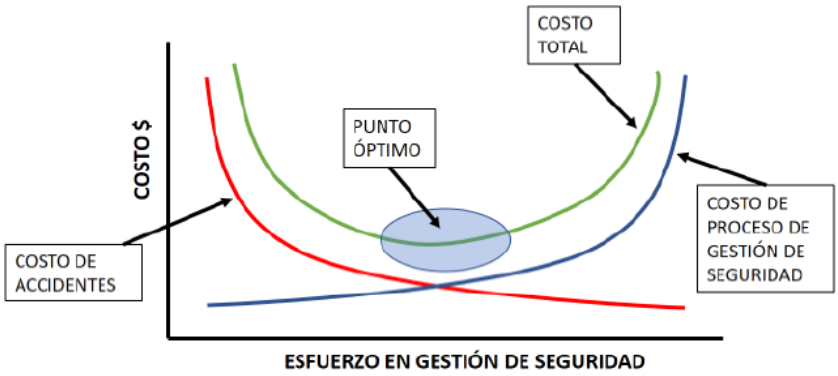
Actualmente el SSA juega un papel importante en la certificación de componentes aeronáuticos, esto se ve reflejado en los procedimientos descritos por la FAC como Autoridad aeronáutica de la Aviación de Estado (AAAE) (Fuerza Aérea Colombiana, CAAE, 2018) y procedimientos desarrollados por la Oficina de Certificación Aeronáutica de la Defensa (SECAD) (Fuerza Aérea Colombiana, 2019).

El efecto de la implementación del SSA en el proceso productivo de nuevos componentes, e incluso en la operación de piezas estandarizadas, se ve reflejado en la reducción de costos asociados a la ocurrencia de accidentes. Si bien el tiempo necesario y los gastos asociados al desarrollo y obtención de

datos de confiabilidad útiles para ser usados en análisis y planes de mitigación de riesgo son altos, eventualmente se puede llegar a un punto de equilibrio de costos operativos, donde la baja presencia de fallas representa un ahorro que equipara la inversión en la implementación de estrategias que permiten seguir mejorando la confiabilidad (ver Figura 2).

Figura 2.

Evaluación de requerimientos de Costo Vs Esfuerzo de Gestión de Seguridad (Fuerza Aérea Colombiana, 2018)



Fuente: Elaboración propia

Propuesta de un software HTS para la industria de manufactura

Dada la importancia del SSA en el desarrollo de nuevos productos y reconociendo el rol de la administración de la información generada mediante los análisis de SSA realizados por las empresas manufactureras que desean incorporarse o ya hacen parte del mercado aeronáutico, por medio del proyecto (FAC-MINCIENCIAS) *"Diseño e implementación de un sistema informático para la gestión de documentos que soportan la trazabilidad de peligros asociados al desarrollo y fabricación de productos aeronáuticos",* se busca desarrollar una herramienta de software que equipare en funcionabilidad a las ofrecidas en el mercado extranjero. De este modo, se incentiva la producción de software a nivel nacional, al tiempo que se ofrece un instrumento que facilitará la implementación del SSA en industrias que a la fecha no han trabajado en esta metodología, pero que pueden adaptar sus procesos para ser un actor relevante en la industria aeronáutica local.

Adicionalmente, con el desarrollo de esta herramienta se conseguirá avanzar en la estandarización de la información asociada a los análisis de seguridad realizados por las empresas que fabriquen productos aeronáuticos.

6. RESULTADOS

En la siguiente sección se describe de forma general los resultados de las actividades descritas en la sección Metodología.

Actividad 1: Revisión y contextualización de normatividad nacional e internacional. Estado actual de la manufactura e ingeniería nacional.

Se identificaron proveedores de software dedicado a HTS, lo que permitió reconocer cuáles son las características generales del software ofrecido en el mercado. Es importante destacar que ninguno de los desarrolladores de software dedicado a HTS es local, siendo los vendedores más destacables empresas radicadas en Canadá, USA e Israel.

Gracias a la participación en capacitaciones ofrecidas por el SECAD y la asesoría de expertos en SSA, fue posible la identificación de los estándares MIL-STD-882E (System Safety), SAE-ARP 4761 (Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment) y SAE-ARP-4754A (Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems), como las normativas que definen las características principales de un HTS y la base teórica requerida para el proyecto.

En cuanto al estado de la manufactura colombiana, se realizó una revisión a la documentación disponible sobre la industria colombiana que tiene algún tipo de relación con el ámbito aeronáutico, lo cual permite identificar un grupo de empresas enfocadas en la fabricación de componentes aeronáuticos y/o con capacidades básicas que les permitirían eventualmente participar en la fabricación con fines en la aviación local o internacional.

La información recolectada permitió delimitar los sectores de interés en el mercado local. Entre las fuentes de información estudiadas, se destaca el compilado de datos de empresas enfocadas al sector aeronáutico contenido en sitio web Aerospace & Defense Industrial Cooperation EPICOS, cuya

información permitió identificar un gran número de empresas que ya cuentan con experiencia en el mercado de productos aeronáuticos, esta información puede ser verificada en el sitio web de EPICOS.

Actividad 2: Identificación de entradas de proceso asociadas con System Safety / Structural Integrity.

En función de la normativa identificada en la Actividad 1, fue posible definir las variables de ingreso mínimas con las que debe contar cualquier solución de software que dé cumplimiento a la MIL-STD-882E (System Safety).- Task 106 Hazard Tracking System del mismo documento. Los datos solicitados por el aplicativo tendrán la posibilidad de incluir información útil para el aseguramiento de Structural Integrity, lo cual podrá afectar la forma de reporte obtenido para los casos que así lo requieran.

La identificación de las entradas al aplicativo HTS, brindó las bases para las tareas de la Actividad 6, en la cual se creó un modelo de entidad relación y definieron los parámetros de arquitectura del software a desarrollar, con este trabajo (entre otras tareas) se realizó la Consolidación de Requerimientos I.T del HTS.

Actividad 3: Sondeo de Competencias de proveedores nacionales.

Una vez se identificó un grupo significativo de empresas en la Actividad 1, se evidenció un volumen alto en el número de empresas con capacidades aplicables a la fabricación de elementos para aviación, y fue posible establecer cuáles serían los sectores de interés en la manufactura de componentes en la industria local. Por lo anterior se decidió enforcar el estudio en áreas en las que se producen componentes físicos por medio de técnicas convencionales, sectores que se presentan en la estructura de la herramienta de medición tipo Encuesta que se diseñó para el desarrollo de esta tarea.

Actividad 4: Análisis de brechas de capacidades y competencias proveedores nacionales de manufactura.

La información colectada mediante las tareas desarrollas en la Actividad 3, ha sido recopilada y organizada para su respectiva evaluación con respecto a los datos y normativas que se identificaron en las Actividades 1 y 2. Los resultados obtenidos durante esta actividad permitieron identificar el nivel de

compromiso con respecto a la gestión de seguridad durante la fabricación de componentes en las empresas encuestadas.

La información resultante de esta actividad fue empleada como base del desarrollo de la Actividad 5 (Formulación de Modelo de procesos de desarrollo de productos aeronáuticos).

Actividad 5: Formulación de Modelo de procesos de desarrollo de productos aeronáuticos.

Actualmente se adelanta el desarrollo del modelo de procesos, enfocado al sistema de gestión de riesgos por medio de la metodología SSA. Este modelo se construye siendo el eje del proyecto del grado de un estudiante de maestría de seguridad operacional de la EPFAC vinculado al proyecto.

Los parámetros descritos por el modelo que se desarrolla serán presentados mediante el entregable Cartilla o Folleto.

Se realizaron visitas a empresas seleccionadas con el fin de recolectar información directamente desde el usuario objetivo del modelo, con lo que se buscar identificar las mejores estrategias para la implementación del modelo de gestión de riesgo o adaptación de los modelos implementados actualmente en industrias constituidas con años de trayectoria en el sector manufacturero colombiano.

Actividad 6: Consolidación de Requerimientos I.T del HTS.

Una vez completada la fase de planeación, análisis y diseño para el aplicativo, la cual incluye el levantamiento de requerimientos, modelo conceptual y modelo entidad relación de datos, la definición de alcances del software, lenguajes de programación, gestor de bases de datos. En proceso mockups del aplicativo, los items mencionados anteriormente son base para el iniciar el desarrollo del aplicativo, y pilares en los que se basó el pliego de peticiones mediante por el que fueron planteadas las actividades y entregables que generaría el equipo de programadores.

Acorde a los requerimientos establecidos y estudio de entradas y salidas del software se realizó la redacción del pliego de peticiones el cual fue entregado a las empresas interesadas para generar su propuesta en cronograma y costos.

Actividad 7: Desarrollo aplicativo Web HTS Versión 1.0

Una vez seleccionadas empresas para adelantar un proceso de selección, se compartió el pliego de peticiones en el que se describe los objetivos y metas en el desarrollo del aplicativo obtenido en la actividad anterior. Basándose en el documento entregado, las empresas interesadas en continuar con el proceso enviaron su propuesta describiendo el cronograma y presupuesto necesario para llevar a cabo el desarrollo de la herramienta HTS:

Al evaluar las propuestas entregadas, se seleccionó a la empresa WILCOSOFT, ya que se ajusta a los parámetros de cronograma y presupuesto del proyecto, así como experiencia en desarrollos similares.

Los programadores contratados cuentan con 6 meses y dividieron el trabajo en 2 etapas. 6 meses calendario es un tiempo apropiado para el desarrollo del aplicativo contemplando.

Actualmente se adelantan las tareas de desarrollo del software. Se espera lograr la entrega de la herramienta funcional al finalizar el mes de octubre. Lo cual daría paso a las pruebas funcionales con usuarios seleccionados para posterior despliegue del aplicativo.

Se realizó la exploración de ofertas en el mercado local buscando un proveedor que permita realizar el desarrollo requerido.

Actividad 8: Despliegue a usuarios iniciales.

A la fecha de redacción de este documento aún está pendiente al inicio de actividad conforme a calendario.

7. DISCUSIÓN

Caracterización de un sistema HTS en el mercado

Mediante el análisis de la bibliografía concerniente a System Safety Assessment, es posible afirmar que es una herramienta ampliamente usada en diferentes industrias y cuenta con adaptaciones en cada área del conocimiento en las que se implemente. También es posible identificar diferentes tipos de entradas que puede tener un software de seguimiento de riesgos, aunque el enfoque puede ser diferente en cada sector, se considera importante caracterizar elementos que sean comunes y buscar su implementación en la herramienta desarrollada, lo cual permitirá una adaptación más sencilla de cualquier empresa al momento de implementar SSA en su proceso de desarrollo de nuevos productos.

Si bien se ha identificado un referente en cuanto a la normativa militar, en torno a la cual se planteó construir el modelo de gestión de riesgos y sistema Hazard Tracking System, la identificación de entradas al sistema de HTS ha permitido delimitar los datos que serán ingresados, evaluados y controlados en el aplicativo que se desarrollará. Es importante tener en cuenta que las conclusiones obtenidas durante esta actividad deben estar alineadas no solo con la normativa aplicable, sino con procedimientos empleados en herramientas computacionales similares. A su vez permitió la identificación parcial de características generales de los requisitos IT, lo cual permite que el personal especializado en programación de software del proyecto adelante la identificación de datos y variables que debe comprender el software HTS.

Por medio de la participación en el ciclo de conferencias Orientações para o desenvolvimento de aeronaves civis e sistemas, segundo a ARP 4754A (Directrices para el desarrollo de aeronaves y sistemas civiles según ARP 4754A), y mediante la tutoría de personal capacitado en el desarrollo de sistemas para System Safety Asessment, se identificaron diferentes tipos de entradas y datos que son manejados durante el diseño y análisis de sistemas aeronáuticos. Los datos y documentos que son estructurados a conformidad de la SAE-ARP 4754A, pueden ser considerados como documentos de respaldo o adjuntos a los documentos cargados al aplicativo HTS, pues si bien la normativa explica cómo se deben elaborar los sistemas que representan

aeronaves y componentes, no se abordan directamente la identificación y evaluación de riesgos. Según la norma SAE ARP 4754A, la información de riesgos es generada a partir de los análisis hechos con las técnicas y métodos descritos en la normativa SAE-ARP 4761.

El proceso descrito por normativa la SAE-ARP 4754A, hace referencia no solo al diseño de los sistemas que representan a una aeronave o a un componente, sino que presenta una hoja de ruta para la estructuración de información necesaria para la certificación de estos elementos conforme a los requerimientos de la industria civil. De la información presentada fue posible identificar que el proceso de certificación civil descrito es similar al empleado en aeronaves militares, y que el nivel de interrelación entre este proceso de certificación y la metodología de System Safety Assessment es mayor, pues la norma sugiere más control a partir del Plan de Safety Assessment y los resultados obtenidos durante todo el ciclo de vida del producto, especialmente en la toma de decisiones durante el proceso de diseño y desarrollo.

Caracterización de software HTS

Mediante la revisión de un software reconocido y dedicado exclusivamente al System Safety Assessment como lo es Safety Commander, fue posible identificar y confirmar las características principales con las que debe contar un aplicativo HTS, así como las salidas y que tipos de reportes debe generar para brindar al equipo de ingeniería del sistema las herramientas suficientes para la toma de decisiones. Conforme a lo expresado por algunos proveedores de software de SSA (durante la presentación de sus productos), no son comunes las empresas que ofrecen una solución dirigida exclusivamente a Hazard Tracking System, lo anterior puede deberse a que muchas empresas suelen desarrollar sus propias herramientas, y solo recurren a la subcontratación cuando se requiere un servicio específico que debe ser configurado a los parámetros de su operación. Adicionalmente, se identificaron ciertas características de un HTS enmarcado en la MIL STD 882E, como que su función principal es la de administrar la información que es recolectada a partir de los análisis y diferentes técnicas descritas en el SSA. La inclusión de módulos especializados en otras técnicas es optativa y por lo tanto incluyen un esfuerzo y costo adicional en el desarrollo de este tipo de aplicativos.

Las características comunes de los softwares revisados incluyen:

- Capacidad de instalar aplicativo en PC o emplearlo desde cualquier browser.
- Administración de los riesgos y peligros en términos de información, alertas y carga de documentos adjuntos como PDFs, imágenes o reportes de texto plano.

Generación de reportes configurables a las necesidades del cliente.

Estas características son bastante generales, pero hay que tener en cuenta que los clientes potenciales necesitarán diferentes medios de acceso a sus aplicativos. En el caso de la herramienta desarrollada por nuestro equipo de trabajo, será posible delimitar cuáles serán los dispositivos y navegadores más utilizados en la región y que son permitidos en la institución.

El desarrollo de un modelo Entidad-Relación fue una herramienta que permitió comenzar a definir las variables que intervendrán en el aplicativo, así como el planteamiento de interrogantes que serán el cimiento de la arquitectura del software. Además, entre las actividades realizadas durante el mes de mayo de 2021, fue posible establecer un acercamiento con el personal de la Jefatura de Tecnologías de Información y Comunicaciones (JETIC), donde se recibieron recomendaciones y lineamientos básicos que deben ser considerados durante el desarrollo de una nueva herramienta computacional.

Es importante mencionar que la caracterización adelantada de las herramientas encontradas en el mercado, cuyo objetivo es el seguimiento y mitigación de riesgos, permite identificar qué funciones son realmente necesarias y cuáles son redundantes en los procesos adelantados por la FAC. Lo anterior corresponde a que, al realizar una evaluación de tareas ofrecidas por diferentes softwares, se logró señalar que muchas ya son ejecutadas por otras herramientas implementadas actualmente en la institución.

El trabajo realizado durante la elaboración del modelo de entidad relación, delimitó de forma precisa las entradas, variables y roles del software. Una de las ventajas de realizar este modelo fue la identificación oportuna de características que son redundantes en los softwares vistos hasta la fecha, ya que actualmente la FAC emplea herramientas que abarcan algunas de las funciones que estos softwares ofrecen. Es importante mencionar que, para el

caso de la información tratada por el aplicativo del proyecto en curso, detectar este tipo de redundancias en las herramientas usadas, se traduce en un ahorro en las capacidades de almacenamiento de información. Por lo anterior, se explora la posibilidad de crear PLUG-INS a los softwares con los que ya trabaja la FAC.

Gracias a la caracterización de los softwares encontrados en el mercado fue posible determinar cuál puede ser empleado como base de los parámetros necesarios en un software enfocado en el SSA para sistemas aeronáuticos. El fin de esta actividad corresponde al desarrollo del Objetivo específico 3 del proyecto, sirviendo como referencia en cuanto a la estructura y prestaciones del aplicativo que se diseña, de las cuales se cuenta con un concepto general esbozado a partir de la información pública de otras opciones disponibles en el mercado. Si bien algunos de los proveedores de software consultados permiten que los clientes potenciales tengan acceso a demos, y así poder tener una vista de primera mano de las características básicas de las herramientas que han desarrollado, esta opción limita en cierta medida el nivel de acceso del usuario y no permite conocer la verdadera capacidad de una herramienta. Con este fin, y conforme a los rubros estipulados en el planteamiento del proyecto, se adelantó la adquisición del software seleccionado, que es IRIS-CelerisSystems. Esta herramienta es un paquete de software que cuenta con un componente integrado llamado Hazard Tracking Module, diseñado en concordancia a la MIL-STD-882E, norma rectora en el SSA para sistemas militares, y que a su vez presenta características similares a la normativa que rige el SSA en sistemas civiles.

En referencia a la opción de compra de un software extranjero para dar solución a la necesidad de administrar los documentos e información en torno al análisis de riesgos en el desarrollo de nuevos productos aeronáuticos en la FAC, se debe decir que va en contravía de dar solución a la pérdida de autonomía en las herramientas de control de información altamente confidencial del Estado Colombiano al confiar sus datos a terceros ajenos a la nación, además, en muchos casos dificulta la migración de datos entre plataformas y generalmente incluye sobrecostos a la hora de buscar adaptaciones de servicios, o redundancias del software frente a las necesidades actuales del cliente. Mediante el esfuerzo que se realiza al desarrollar una herramienta durante el proyecto en curso, que será completamente diseñada y producida

por colombianos y administrada directamente por la FAC, se busca incentivar el desarrollo de software local, regido por estándares oportunos y criterios de calidad obtenidos de proveedores con experiencia en el campo. Lo anterior le permitirá al aplicativo, no solo ser una herramienta de base para el trabajo de los programadores que se formen localmente y/o en la institución, sino que les permitirá la mejora continua en una herramienta de la cual se contará con todos los derechos de edición y mejora.

En cuanto al desarrollo del aplicativo, se puede mencionar que, fundamentado en la experiencia de la empresa y conforme a la propuesta entregada, se dividió el trabajo en dos etapas en las que se entregarán avances periódicos hasta lograr el despliegue y puesta a punto del aplicativo. A la fecha, se ha culminado la primera fase del trabajo a realizar y con esto se dan por terminadas las primeras actividades de esta labor, lo que incluye las tareas de revisión y estructuración de estrategias de trabajo, y estructuración de las bases de datos que alberguen la información contenida en el aplicativo.

Como parte de los resultados que no fueron contemplados en el planteamiento del proyecto, fue posible vincular a 2 estudiantes de pregrado en Ingeniería Informática, cuyas tareas incluyen apoyar las tareas que se desarrollan actualmente en el proyecto. Sin embargo, su participación puede proyectarse a etapas posteriores del desarrollo del aplicativo. Una propuesta viable a los trabajos desarrollados por los estudiantes incluye el planteamiento y desarrollo de herramientas de SSA que están fuera del alcance del proyecto en curso, esto incluye *plugins*, aplicativos compatibles, complementos o actualizaciones dado que el código terminado permitirá su edición por la FAC. Por lo anterior, es posible proyectar tareas de mantenimiento o puesta a punto del aplicativo y códigos generados, que representarán ahorros a la FAC cuando se busque realizar tareas de actualización o creación de herramientas adicionales.

Mediante el trabajo que realizan los pasantes vinculados al proyecto, se busca no solo ampliar su formación y experiencia en relación con la programación web, sino que se familiarizarán con el lenguaje empleado en el aplicativo. Lo anterior permitirá a la FAC contar con profesionales que tienen experiencia en el desarrollo del aplicativo y que podrán generar mejoras y mantenimiento sobre la herramienta. Entre las posibles ventajas se podrían listar reducción de costos de mantenimiento, desaceleración en la

obsolescencia de una herramienta informática creada y operada por la FAC, y asegurar la transferencia de conocimiento entre profesionales afines dentro de la institución.

Como parte de los acuerdos que se realizaron en la contratación de la empresa de desarrollo, se concordó vincular a los estudiantes de ingeniería informática de EMAVI que cumplen funciones de pasantes en el proyecto. Si bien las tareas que cumplirán se deben ajustar al conjunto de habilidades adquiridas hasta el momento en su formación de pregrado, se busca que ellos participen activamente durante todo el desarrollo y así puedan conocer de forma práctica las tareas asociadas al desarrollo de herramientas web.

La revisión de las capacidades de proveedores locales en cuanto al desarrollo de software permitió identificar que la consolidación de funciones que involucran una interfaz gráfica con herramientas de generación de datos de ingreso involucra un esfuerzo en tiempo y recursos superior al planteado en el presente proyecto, razón por la cual se decide plantearlo como objetivos de desarrollo de etapas posteriores.

Caracterización de la industria colombiana

El desarrollo de una encuesta de caracterización de capacidades técnicas de la industria colombiana permitió identificar que este sector comprende diferentes aproximaciones a la evaluación y verificación de parámetros de seguridad en sus procesos, los cuales son específicos para cada campo de experticia. Muchas de las metodologías aplicadas tienen principios similares; por esta razón, con la orientación adecuada, sus productos pueden llegar a ser empleados en la industria aeronáutica. Se debe resaltar nuevamente la evidente diferencia en la cultura y controles empleados durante todo el ciclo de vida del producto entre la industria convencional y la aeronáutica.

El contacto realizado con las empresas del sector de manufactura permitió identificar de forma parcial que varias de las empresas consultadas expresaron que no cuentan con un equipo de trabajo dedicado exclusivamente a la evaluación de riesgos en el desarrollo de un nuevo producto, siendo esta función relegada a la identificación de riesgos operativos, salud ocupacional, o a equipos cuya labor es reactiva, como los controles de calidad posteriores a la producción.

Dado que actualmente se han implementado diferentes metodologías y normativas para la identificación, evaluación y mitigación de riesgos presentes en las industrias manufactureras colombianas, es necesario que el desarrollo en software generado por el proyecto cuente con la flexibilidad necesaria para organizar y dar seguimiento a los diversos tipos de informes que se ingresen en las primeras pruebas del software, así como brindar las herramientas suficientes para regularizar los informes de riesgos de las empresas que quieran incursionar en el mercado de fabricación de partes aeronáuticas.

Diseño de modelo de gestión de riesgos en procesos de producción aeronáuticos

Durante el desarrollo del modelo de gestión se identificó la norma ISO 31000:2018 - "Administración/Gestión de Riesgos – Lineamientos Guía" como eje en el desarrollo de un modelo eficaz en cuanto al manejo de riesgos en cualquier proceso industrial. En esta norma se describen parámetros generales que un modelo de gestión de riesgo debe cumplir y plantea una base para el diseño que será planteado en el proyecto.

Como parte de la optimización del modelo planteado hasta el momento, se realizaron visitas presenciales a las empresas seleccionadas dentro del grupo de muestra de la encuesta de caracterización de capacidades (realizada en actividades iniciales del proyecto). Las entrevistas con el personal de cada empresa permitirán la integración del modelo planteado a los procesos de la industria local y, a su vez, identificar cuáles son sus alcances y oportunidades de mejora en la gestión de riesgo y acordar con ellos las mejores estrategias de acercamiento a un modelo que pueden o no haber implementado anteriormente.

8. CONCLUSIONES

La industria colombiana cuenta con capacidades aplicables al sector aeronáutico, pero deben ser encaminadas apropiadamente para cumplir con los estándares requeridos de seguridad y calidad. Si bien existen varios campos encargados de evaluar y verificar la mitigación de riesgos en la seguridad de diferentes ámbitos de la industria, la metodología enmarcada en el System Safety Assessment (SSA) permite dar seguimiento a los riesgos durante todo

el ciclo de vida de un componente aeronáutico. Al aplicar la metodología adecuada en la gestión de la seguridad, un fabricante puede reducir el riesgo asociado a un producto a lo largo de su ciclo de vida, garantizando un producto más seguro y ahorrando en el desarrollo de nuevos componentes. No obstante, la mayoría de las empresas dedicadas a la manufactura en Colombia hasta la fecha no han integrado ninguna metodología de identificación de riesgos asociados a los procesos de desarrollo y fabricación de productos.

El desarrollo de documentación y evidencia recomendado por la normativa SAE ARP 4754 para la certificación de aeronaves civiles es similar a la utilizada en aeronaves militares, tanto en su estructura como en los tipos de documentos generados. Esto identificó la necesidad de que la aplicación desarrollada sea capaz de gestionar este tipo de información de manera oportuna y distinguir entre ambos casos. Además, la caracterización adecuada de las herramientas disponibles en el mercado permitió reconocer las características más relevantes de un software dedicado al seguimiento y mitigación de riesgos, y posteriormente adaptarlas a las necesidades de la industria local. Se puede afirmar que la tarea principal de una aplicación de Sistema de Seguimiento de Peligros (SSA) y otras herramientas SSA es la gestión de documentos que facilita la correcta interpretación de los datos por parte de los equipos de análisis en el proceso de toma de decisiones para el diseño y desarrollo. La caracterización adecuada de las aplicaciones en el mercado permite detectar funciones redundantes, lo que resulta en ahorros de tiempo y recursos en el producto final.

El desarrollo de una herramienta de software que esté al alcance de las industrias locales permitirá la estandarización de procesos y la gestión de la información relacionada con el desarrollo de nuevos productos aeronáuticos. Dado que el alcance del software desarrollado se limita a la gestión de documentación asociada al control de riesgos en la producción aeronáutica, es fundamental asegurar el desarrollo de fases posteriores en las que se puedan crear extensiones compatibles que sean útiles para el control de riesgos a través de la metodología SSA. Cabe destacar que la participación de personal asociado con la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) que tiene un perfil estrechamente relacionado con el desarrollo de software generará mayores beneficios de la herramienta obtenida. Estas personas, al estar familiarizadas con el proceso de desarrollo de la aplicación, encontrarán más fácil participar en las actualizaciones y mejoras del software, lo que representará un ahorro directo en el mantenimiento y las actualizaciones del software.

Un modelo de gestión de riesgos efectivo debe contar con las características requeridas según las normas locales aplicables o sus equivalentes, y también debe adaptarse a las condiciones de los usuarios para garantizar su efectividad en el área donde se utilizará. El desarrollo del modelo no debe limitarse únicamente a la información teórica disponible, sino que idealmente debe optimizarse en función de la experiencia y el conocimiento del usuario al que va dirigido.

El desarrollo de un nuevo producto exige un plan de ejecución que sea flexible e incluya tiempos para eventualidades o la evaluación de nuevas estrategias que permitan la realización del objetivo y el cumplimiento de las exigencias en calidad requeridas. Presupuestos o cronogramas demasiado ajustados pueden llegar a limitar la implementación de mejoras en las estrategias y practices.

6. REFERENCIAS

DOD (2010). JOINT SOFTWARE SYSTEMS DAFETY ENGINEERING HANDBOOK.

DoD (2012). MIL-STD-882E System Safety. Department of Defense Standard Practice.

EPICOS (s.f.). EPICOS AEROSPACE & DEFENSE INDUSTRIAL COOPERATION. www.epicos.com

Ericson C. (2005). Hazard Analysis Techniques for System Safety.

FAA (2000). System Safety Handbook, Chapter 1-2.

Fuerza Aérea Colombiana (2018). Manual del Proceso Seguridad del Sistema <System Safety> Orientado a Componentes Mecánicos Aeronáuticos.

Fuerza Aérea Colombiana (2018). Circular de Asesoramiento de la Aviación de Estado (CAAE) Proceso general de certificación de productos aeronáuticos y reconocimiento de organizaciones para la aviación de estado.

Fuerza Aérea Colombiana (2019). Procedimiento aprobaciones de diseño de producto aeronáutico. GA-JELOG-PR-037 - V.02

ICAO (2009). Safety Management Manual (SSMM).

ICAO (2013). Anexo 19 al convenio sobre Aviación Civil Internacional – Gestión de la seguridad operacional.

ISO (2018). ISO 31000 – Gestión de riesgo.

Kritzinger D. (2006). Aircraft System Safety: Assessments for Initial Airworthiness Certification. Elsevier-Woodhead

Kritzinger D. (2017). Aircraft System Safety: Military and civil applications. Elsevier-Woodhead

Lewis C. (1999). THE SYSTEM SAFETY HANDBOOK.

NASA (2002). Fault Handbook with Aerospace Applications.

NASA (2011). NASA System Safety Handbook. Volume 1

NASA (2014). NASA System Safety Handbook. Volume 2

Oficina de Certificación Aeronáutica de la Defensa SECAD. www.secad.fac.mil.co

SAE International (1996). SAE ARP 4761 Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment. SAE International.

SAE International (2010). SAE ARP 4754 Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. SAE International.

SAE International (2010). SAE ARP 4754A Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems

Safie F. (2015). Introduction to Risk Assessment Concepts, Tools, and Techniques.

Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (2017). RAC 219 Gestión de seguridad operacional.

CAPÍTULO

14

CASO DE ESTUDIO: "MODELOS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES PARA TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES"

MY. Paola Andrea Zárate Luna[*]
paola.zarate@fac.mil.co

TC. Sonia Ruth Rincón[*]
sonia.rincon@fac.mil.co

[*] *Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE)*
Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez".
Fuerza Aeroespacial Colombiana

Jesús Alfonso López
Universidad Autónoma de Occidente

Resumen

La inteligencia artificial y el aprendizaje profundo han logrado establecerse como una de las tecnologías emergentes con mayor presencia en las tendencias de desarrollo de software de proyectos innovadores, aplicables a diferentes sectores económicos. El ámbito espacial no ha sido ajeno a esta tendencia, representando una de las áreas sensibles que requieren el manejo y la administración de grandes volúmenes de información captada por varios sensores instalados en los satélites que se encuentran actualmente en órbita. Las imágenes satelitales se convierten en este escenario en un agente propenso a ser tratado con algoritmos de redes neuronales, especialmente convolucionales, lo que hace que estas redes jueguen un papel decisivo para apoyar la toma de decisiones estratégicas.

Diferentes autores relacionan buenos resultados con la aplicación de algoritmos de aprendizaje profundo para la creación de partituras, paisajes e incluso la reconstrucción de píxeles en imágenes. Esto conlleva a una investigación acerca de estas técnicas para ser implementadas en imágenes satelitales, lo que permite mejorar su resolución, aplicar filtros y realces, o incluso corregir píxeles que hayan sido alterados por una mala configuración o apuntamiento del sensor al momento de tomar la fotografía.

Abstract. Artificial intelligence and deep learning have managed to establish themselves as one emerging technologies with the greatest presence in software development trends for innovative projects, applicable to different economic sectors. The space field has not been immune to this trend, representing one of the sensitive areas that require the handling and administration of large volumes of information, captured by various sensors installed on satellites that are currently in orbit. In this scenario, satellite images become an agent prone to being treated with especially convolutional neural network algorithms, making these networks play a decisive role in supporting strategic decision-making.

Different authors associate good results with the application of deep learning algorithms for the creation of scores, landscapes, and even the reconstruction of pixels in images, which entails an investigation of these techniques to be implemented in satellite images that allow improving their resolution, applying filters and enhancements or even correct pixels that have been altered by a poor configuration or aiming of the sensorat the time of taking the picture.

Palabras Clave: Redes neuronales artificiales, aprendizaje profundo, redes convolucionales, inteligenciaartificial, imágenes satelitales.

Keywords: Artificial Neural Network, Deep learning, convolutional networks, artificial intelligence, satelliteimages.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de proyectos de investigación formativa y aplicada, orientados a campos pertenecientes a la inteligencia artificial, se encuentra cada vez más cerca de alcanzar procesos innovadores realizados a partir de creaciones como resultado de la imaginación de una máquina. Esto se debe a los avances obtenidos, principalmente, del entrenamiento de redes neuronales artificiales (RNA) durante los últimos 50 años y al impulso generado con desarrollos basados en el aprendizaje profundo. Las RNA son una de las técnicas de inteligencia artificial desarrolladas bajo el campo del aprendizaje profundo, que buscan simular el comportamiento del cerebro humano y, en especial, de la neurona y su proceso cognitivo. En otras palabras, su objetivo se enfoca en emular procesos de inteligencia biológica, logrando resolver una amplia gama de tareas, como el reconocimiento de patrones, voz, imágenes, señales, entre otros.

Paralelamente a este desarrollo y evidenciando la posibilidad de utilizar el auge de las redes neuronales artificiales en el procesamiento de imágenes para observación de la Tierra, surge un nuevo campo que abre un portafolio de aplicaciones para proyectos en diferentes sectores de producción, enmarcados en la necesidad de incursionar y, por qué no, llegar a ejercer un liderazgo en el campo aéreo y espacial a nivel nacional e incluso en el mundo. El tratamiento de imágenes satelitales a través de técnicas de inteligencia artificial es un campo de poco desarrollo en el país y en la mayor parte del mundo. Requiere especial atención para su aprovechamiento, ya que debido a los altos costos de inversión que generan los proyectos satelitales y la poca experiencia en el área, este terreno del conocimiento se ha visto rezagado en comparación con otros países como Estados Unidos y Rusia, pioneros en tecnologías de inteligencia artificial e imágenes espaciales, siendo países que han aportado grandes avances tecnológicos e innovación.

2. BREVE RESEÑA HISTÓRICA

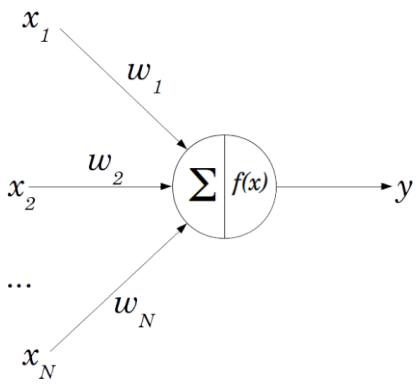
Varios eventos cronológicos empiezan aproximadamente en el año 1943 con McCulloch y Pitts, cuando desarrollaron una neurona simple basada en funciones lógicas "a or b" y "a and b". Seis años más tarde, en 1949, Donald Hebb presentó en su libro "La organización de la conducta" el concepto de aprendizaje no supervisado, incorporando la Ley de Hebb, que se basa en las conexiones de las neuronas y la sinapsis preexistente entre ellas.

Posteriormente, en la historia de la inteligencia artificial, Frank Rosenblatt introdujo un hito diferencial con su modelo llamado Perceptrón, como se muestra en la Figura 1. Su estructura era capaz de manipular datos con una sola capa de procesamiento, generando la salida de la red a partir de datos binarios de entrada.

Dos años más tarde, otro modelo de inteligencia artificial adquirió relevancia en la historia de la temática, que fue la red Adaline. A diferencia del Perceptrón, la red Adaline utilizaba una regla de aprendizaje llamada el gradiente descendente.

Figura1.

Neurona Perceptrón



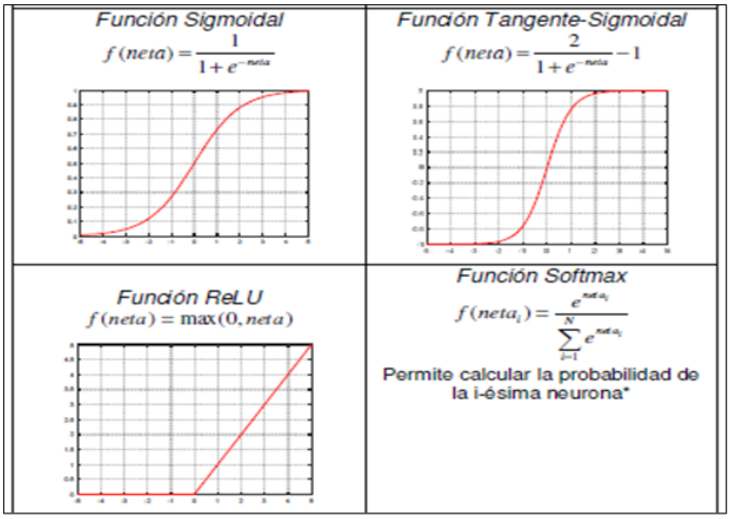
Fuente: https://www.lucidarme.me/simplest-perceptron-update-rules-demonstration/

Después de estos avances iniciales, alrededor de la década de 1970, los científicos Minsky y Papert presentaron un trabajo descriptivo acerca de las limitaciones del Perceptrón y el modelo de redes neuronales artificiales de una sola capa. Esto provocó un desinterés generalizado entre los investigadores del área, lo que resultó en un período sin nuevas propuestas de desarrollo, conocido como "el primer invierno" de las RNA.

Sin embargo, gracias a la perseverancia de algunos investigadores, en la década de 1980 se retomaron los esfuerzos para reiniciar proyectos en el campo. Se comenzaron a incorporar nuevos conceptos, como el aprendizaje automático, que permitía que los datos de entrada pudieran ser valores continuos en lugar de binarios (1 o 0). Se añadieron neuronas "bias" y funciones de activación, como se aprecia en la Figura 2. Entre las funciones de activación más utilizadas se encuentran la Sigmoide, ReLu y Softmax, lo que permitió ajustar gradualmente los pesos de las conexiones y obtener las salidas deseadas.

Figura 2.

Adaptación Funciones de Activación



Fuente: [1]

Poco después, bajo el liderazgo de Paul Werbos, se logró el desarrollo de una red neuronal de múltiples capas y entrenada de manera supervisada. Esta red permitía calcular el error obtenido en la salida y propagarlo hacia las capas anteriores para realizar ajustes. Esta técnica se denominó *Backpropagation* y

se introdujo en 1986. Paul Werbos también propuso una solución práctica al presentar un Perceptrón con una capa oculta que tenía conexiones con todas las neuronas de la capa anterior y la siguiente, llamando a este enfoque MLP, que significa "Multi Layer Perceptron" en inglés.

El segundo período de estancamiento en el campo de las RNA ocurrió alrededor de la década de 1990. En ese momento, era difícil entrenar redes con muchas capas ocultas, lo que resultó en la incapacidad de resolver problemas complejos. Sin embargo, para abordar este problema, surgió el concepto de aprendizaje profundo (DL, por sus siglas en inglés) a finales de esa década. Esto revivió positivamente la investigación en el campo, y se lograron avances significativos gracias a empresas como Google, Facebook, Microsoft, NVIDIA y otras.

En la cúspide de los algoritmos de inteligencia artificial, las técnicas de Deep Learning y las redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) son las que presentan los mayores desafíos en la actualidad. Las CNN son un tipo especializado de red neuronal utilizado en visión por computadora, diseñado para aprender automáticamente las características de un elemento con el objetivo de identificarlo. Estas arquitecturas implementan técnicas de extracción de características para clasificar imágenes, y son particularmente relevantes en la clasificación de imágenes satelitales, donde presentan retos tecnológicos significativos.

Las imágenes satelitales tienen aplicaciones en diversos campos, como teledetección, visión por computadora, ciencias ambientales y meteorología. Estas imágenes permiten la observación de la situación en la Tierra para el monitoreo ambiental, la mejora del transporte y la respuesta a desastres. Sin embargo, las imágenes satelitales pueden ser obstruidas por la atmósfera, especialmente cuando hay nubes, lo que dificulta el seguimiento. El uso de redes neuronales convolucionales ha demostrado ser una solución efectiva para automatizar tareas de procesamiento de imágenes satelitales, incluso en condiciones desafiantes.

3. REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

Esta revisión tiene como objetivo demostrar cómo las técnicas de redes neuronales artificiales, en particular las redes convolucionales y generativas, pueden convertirse en una solución de inteligencia artificial para corregir

errores geométricos, radiométricos y atmosféricos en imágenes satelitales. Estas técnicas han experimentado avances significativos en los últimos años, y esta revisión se basa en la recopilación ordenada de varios artículos de interés y revisiones presentados en conferencias y eventos internacionales. Además, se analizan aspectos cuantitativos y cualitativos relacionados con el tema mencionado anteriormente.

La literatura existente demuestra que el aprendizaje profundo ha logrado un rendimiento sobresaliente en la clasificación de imágenes de sensores remotos, como los utilizados en el caso de estudio.

A. Necesidad de la revisión bibliográfica

El método de revisión sistemática de literatura utilizado para el presente escrito se basa en la metodología y trabajo propuesto por Bárbara Kitchenham, que buscainterpretar toda la información pertinente y relevante que resuelva interrogantes en una investigación. Este método se encuentra fundamentado en tres etapas o fases:

- Planificación de la búsqueda en la que se presentan los cuestionamientos:
- Identificación de la necesidad de revisión y definición de un protocolo de revisión.
- Desarrollo de la búsqueda donde se ejecutan las búsquedas y se ordena los estudios encontrados:
- Búsqueda de estudios primarios.
- Selección de estudios primarios.
- Extracción y gestión de los datos.
- Síntesis de datos.
- Presentación del informe de revisión que finalmente aglomera los resultados [4].

B. Preguntas de investigación

Para la selección y clasificación del material bibliográfico encontrado se plantean las siguientes preguntas de investigación:

Pregunta 1.

¿Cuáles son las tendencias de inteligencia artificial y el aprendizaje profundo aplicables al tratamiento de imágenes?

Pregunta 2.

¿Cuáles son los mayores aportes y/oresultados alcanzados en el tratamiento de lasimágenes satelitales?

Pregunta 3.

¿Comparativamente ofrecen mejoresresultados las técnicas tradicionales a las de aprendizaje profundo en el tratamiento de las imágenes?

C. Proceso de búsqueda

Teniendo en cuenta que la propuesta de investigación inicialmente está orientada a la aplicación de algoritmos de aprendizaje profundo en imágenes satelitales, con el fin de lograr entrenar un sistema capaz de aprender a identificar y corregir píxeles incorrectos causados por: alteraciones en el movimiento de los mecanismos del sensor satelital (corrección radiométrica) o alteraciones en el movimiento del satélite causando distorsiones en la imagen global (corrección geométrica) o interferencias de la atmósfera que alteran de forma sistemática los valores de los píxeles (corrección atmosférica) (Alonso, 2018) [5];

Para desarrollar la búsqueda se escogieron tres fuentes de información que permitieron la selección de varios estudios relacionados: IEEE, ScienceDirect y Scopus.

La búsqueda de información se ejecuta a partir de la aplicación de criterios de selección, para la extracción y gestión de los datos y estudios significativos

relacionados con la temática de investigación. Además, se aplican filtros que limitan los resultados de la búsqueda a un intervalo temporal de publicación, en este caso entre los años 2016 al 2019, ya que el área de estudio es un área que ha tenido grandes resultados durante la última década y teniendo en cuenta que uno de los fines primordiales es abordar el desarrollo y los avances de la temática, que puedan llegar a servir como referente para la investigación en curso.

Con los resultados obtenidos en la búsqueda previa se filtran cadenas de palabras con conectores, considerando los títulos, palabras clave y estudios primarios referenciados en la bibliografía. Finalmente, en dichos recursos electrónicos las palabras claves que se definieron, fueron las que a continuación se muestran: Redes neuronales artificiales, aprendizaje profundo, Modelos generativos e imágenes satelitales.

Posteriormente se realizan las búsquedas con las siguientes cadenas de palabras que permitieran afinar la información necesaria, como se describe en la Tabla 1:

Tabla 1.

Bases de datos y cadenas de búsqueda para revisión de literatura

Nombre de la consulta de búsqueda o base de datos	Cadena de Búsqueda
Scopus	Deep and learning and artificial and networks and convolutional or generative and (limit-to(pubstage, "final") and (limit-to (pub year ,2019) or limit-to (pub year , 2018) or limit-to(pub year , 2017)) or limit-to (pub year, 2016)) and (limit-to (doctype, "ar") or limit-to (doctype,"re"))
ScienceDirect	Deep learning and convolutional network ormodel generative and images
IEEE Xplore	(("All Metadata":artificial neural network) AND "All Metadata": convolutional) AND "AllMetadata": images satellite)

Fuente: Elaboración propia

En la generación de los resultados y teniendo en cuenta filtros aplicados como búsquedas de los artículos de los últimos cuatro años se puede evidenciar que, aunque se encuentran varios artículos correlacionados con los criterios de búsqueda, en general un mismo autor ha construido a lo sumo cinco artículos relacionados, esto puede tal vez ser consecuencia del desarrollo novedoso de los modelos convolucionales y generativos.

De forma similar se cuantifican la cantidad de artículos de revisión y de investigaciones asociadas a los filtros aplicados para la consulta obteniendo que Scopus cuenta con el mayor número de recursos, seguido por IEEE Xplore y finalmente Science Direct con la menor cantidad de publicaciones. En la Tabla 2 se presentan de forma resumida el número de artículos encontrados por cada una de las bases de datos o recursos electrónicos consultados.

Tabla 2.
Numero de artículos por fuente

Base de datos	Periodo	Numero de artículos
Scopus	2017-2018-2019	214
ScienceDirect	2017-2018-2019	19
IEEE Xplore	2016-2017-2018-2019	153

Fuente: Elaboración propia

Otro aspecto relevante para la investigación se orienta a identificar los autores más citados y con mayor producción científica en el campo de investigación, por lo que a continuación en la Tabla 3, se pueden visualizar los autoresmás citados en el campo de redes neuronales artificiales, aprendizaje profundo, modelos generativos y convolucionales. Xuelong Li dentro de sus trabajos presenta escritos devarias temáticas dentro de las que se encuentra de forma significativa losorientados al área de imágenes ópticas e inteligencia artificial Por otra parte Yi Li presenta un total de 2612 citas relacionadas específicamente con el campo de la visión por computador y el aprendizaje profundo en los últimos siete años, siendo el 2018 y 2019 los dos años que más altos índices presentó en el campo de estudio.

Tabla 3.

Numero de artículos por autor

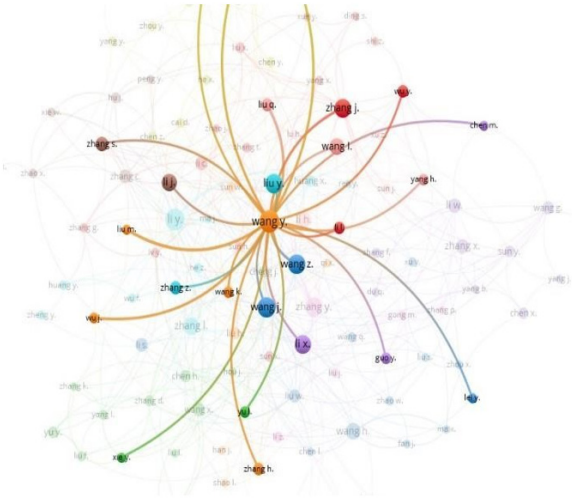
Nombre del Autor	Número de Documentos	Total link strength
Wang X.	22	12
Zhang C.	22	12
Zhang X.	20	11
Li S.	25	10
Li W.	21	10
Zhang Z.	19	10
Li H.	24	9
Nombre del Autor	**Número de Documentos**	**Total link strength**
Li C.	23	8
Liu H.	20	8
Wang H.	24	8
Wang Y.	35	20
Zhang J.	19	16
Liu J.	19	16
Wang Z.	30	14
Chen H.	22	13
Wang X.	22	12
Zhang C.	22	12
Zhang X.	20	11
Li S.	25	10
Li W.	21	10
Zhang Z.	19	10
Li H.	24	9
Li C.	23	8
Liu H.	20	8
Wang H.	24	8

Fuente: Elaboración propia

En la aplicación VosViewer se obtienen los autores agrupados con enlaces entre ellos, representando la dependencia de sus publicaciones que denotan una alta correlación por las temáticas trabajadas por los diferentes autores y en relación con los documentos. En la Figura 4 , se muestra los grupos generados al realizar la técnica de co-autor. De acuerdo a la red de visualización de autores los más citados y con mayor número de artículos publicados alrededor de la temática investigada corresponden a Yi Li, Liu Y., Wang, Zhang J., Wang Z., entre otros.

Figura 3.

Visualización de red de autores



Fuente: VosViewer

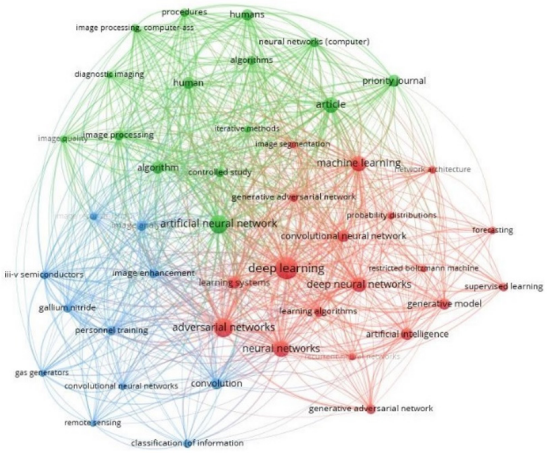
D. Clasificación de la bibliografía encontrada. Inclusión y Exclusión de Criterios

Para la selección de los documentos de alto impacto para la investigación que se está realizando se tuvieron en cuenta los siguientes criterios o filtros de la información:

- Artículos escritos en inglés
- Artículos publicados entre 2016 y 2019
- Artículos publicados (terminados) de tipo artículos de revisión y de congresos o conferenciasinternacionales.
- Artículos que aplican las técnicas de redes convolucionales, modelos generativos en imágenes y en especial de tipo satelital.

Se utiliza la herramienta de análisis de datos bibliográfico VosViewer, manejando un umbral de análisis basado en la co-ocurrencia de palabras, como resultado se obtiene un clúster representado en la Figura 4, que permite establecer el peso quetiene cada descriptor dentro de la red por la dimensión del nodo que lo representa.

Figura 4.
Co-ocurrencia de las palabras y enlaces



Fuente: VosViewer

En cuanto a las zonas evidenciadas como relevantes se encuentran los términos de Deep Learning, Artificial Neural Network y en una medida de intensidad menor las áreas de Adversarial Networks, Generative Model, que ratifican que la temática ha sido poco desarrollada abriendo panoramas

de investigaciones que permitan mayor fuerza y alto impacto como la resolución de la corrección de píxeles incorrectos causados por: alteraciones radiométricas, distorsiones en la imagen global (corrección geométrica) e interferencias inducidas por la atmósfera en el momento de toma de una fotografía satelital.

Con la ayuda de los instrumentos y/o criterios de exclusión se logra afinar la búsqueda seleccionando 30 artículos que se agruparon de acuerdo con su tipo de aplicación o funcionalidad, creándose dos categorías, una enfocada a trabajos realizados con redes neuronales artificiales para el tratamiento de imágenes satelitales específicamente y el otro grupo de artículos corresponde a aquellos estudios desarrollados con otro tipo de aplicaciones que se ponen a disposición para los lectores con una breve descripción de los aspectos a resaltar en cada uno de los artículos.

En las tablas relacionadas en el Anexo 1. Artículos relacionados con redes neuronales artificiales para el tratamiento de imágenes satelitales y Anexo 2. Artículos de redes neuronales artificiales con diferentes fines y aplicación, se muestra de forma resumida el aporte de cada uno de ellos en la presente investigación. (Ver anexos).

4. RESULTADOS

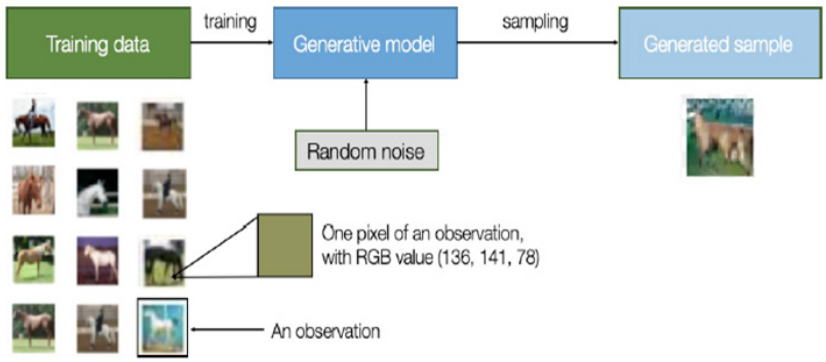
Las tendencias de la bibliografía encontrada muestran diferentes usos de las redes neuronales en múltiples campos de acción.

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la revisión adelantada, algunos de los avances en el campo de las redes neuronales y en especial de aprendizaje profundo se han direccionado a investigaciones con imágenes de diferentes fuentes (radares, sensores, equipos de digitalización, infrarrojo, etc.) y distinto propósito, con frecuencia se encontraron artículos relacionados con el área agrícola, área de construcción y área médica. Por otra parte, los propósitos de los proyectos adelantados en este campo se han dirigido a la detección de objetos y para el reconocimiento facial y de gestos obteniendo gran impacto social con estos últimos.

Es así como, se muestran una cantidad significativa de estudios en visión por computadora, con gran éxito en las tareas de procesamiento de imágenes de complejidad aparentemente ilimitada [6]. Métodos de aprendizaje (y en particular, redes neuronales profundas) pueden capturar datos mucho más complejos y general relaciones entre características, pero a su vez requieren cantidades masivas de datos de entrenamiento, y grandes recursos computacionales para resolver la optimización subyacente, extremadamente alta dimensional y complejo [7].

Paralelamente se hallaron investigaciones adelantadas en relación con modelos generativos. Según David Foster [8], "Un modelo generativo describe cómo se genera un conjunto de datos, en términos de un modelo probabilístico. Al tomar muestras de este modelo, podemos generar nuevos datos." En la Figura 5, se presenta la estructura de este tipo de modelos. En otras palabras, con los modelos generativos, es posible pensar en la construcción de una red que pueda realizar correcciones a las imágenes satelitales a partir del aprendizaje de reglas generales que rigen la apariencia de píxeles correctos en una imagen satelital.

Figura 5.
Proceso del Modelo Generativo



Fuente: [8]

En el caso específico de tratamiento de imágenes satelitales con redes profundas, que es el escenario de interés, la literatura arroja trabajos adelantados con imágenes de baja resolución. Esto aumenta la complejidad de procesos para clasificación y segmentación de objetos, como lo es la cobertura de superficies

y edificaciones. Por ejemplo, se han abordado proyectos utilizando IA para solucionar problemas en la identificación de techos de casas y edificios en la India. Los investigadores, al no tener las posibilidades adquisitivas de imágenes de alta resolución, deben iniciar con procedimientos para mejorar la calidad de las mismas. Luego se aplican técnicas de procesamiento digital con diferentes filtros para agilizar la tarea con etiquetadores que utilizan software especializado y dibujan polígonos con las clases deseadas.

A continuación, en la Figura 6, se muestra el resultado de procesar las imágenes de baja resolución paraconseguir una mejor calidad.

Figura 6.

Imagen original (lado izquierdo) vs imagen procesada a través de filtros de procesamiento digital de imágenes para aumentar la calidad de imagen satelital

Fuente: [9]

Algunos ejemplos similares de investigaciones adelantadas en el mismo sentido se enfocan en una red neuronal artificial desarrollada por el equipo de investigación de Inteligencia Artificial de la compañía Facebook, en la que se logró demostrar que con implementación de técnicas de un modelo de red neuronal denominado Mask R-CNN, se alcanzan a obtener resultados de entrenamiento más precisos para la etapa de clasificación de objetos en una imagen satelital. Como se puede apreciar en la Figura 4, se alcanzó una clasificación efectiva, en comparación con otros modelos que se basan en la estadística y en el procesamiento digitalde imágenes clásico como, por ejemplo: Watershed, Canny Edge Detection, entre otros.

Figura 7.

Salida enmascarada del modelo de segmentación MaskR-CNN para identificación de techos en la India

Fuente [10].

Otro ejemplo significativo con imágenes satelitales es la tarea de clasificación de coberturas de la tierra. Estos métodos de entrenamiento supervisado obtienen mejores resultados cuando se utilizan grandes volúmenes de datos proporcionados por sensores remotos, como las imágenes satelitales [11]. Sin embargo, la capacidad del algoritmo utilizado para discriminar las categorías es fundamental, ya que este tipo de redes neuronales son técnicas de aprendizaje directo para el mapeo no lineal del dominio de baja resolución al dominio de alta resolución dentro de la imagen.

Distintos proyectos con incidencia social se han desarrollado con el mismo modelo de red descrito en el párrafo anterior, que ayudan en la prevención de catástrofes, como los incendios forestales, especialmente en países donde las condiciones medioambientales son relevantes para sus habitantes, como Australia. Se siguió una metodología similar al caso de estudio de la India. La diferencia en esta ocasión radica en la alta resolución de las imágenes proporcionadas por el satélite de alta tecnología WorldView 3, que maneja diversas bandas espectrales:

- Banda pancromática.
- Multiespectral de 4 bandas: 4 coloresVNIR estándar son azul, verde, rojo,near-IR1.

- Banda multiespectral 8: 4 colores VNIR adicionales son costero, amarillo, borde rojo y near-IR2.
- Resolución infrarroja de onda corta:8 bandas SWIR que penetran en la bruma, la niebla, el smog, el polvo y el humo [12].

Debido a la impresionante calidad de las imágenes, no fue necesario hacerle untratamiento previo al etiquetado. En primerainstancia, se realizó una tarea de clasificación de la cobertura boscosa y posteriormente se entrenó el modelo de redes neuronales profundas con Mask R-CNN y Deep U-Net, obteniendo con esta ultima un porcentaje de precisión del 95%.

Figura 8.

Salida enmascarada del modelo de segmentación MaskRCNN para identificación de árboles en Australia

Fuente: [13]

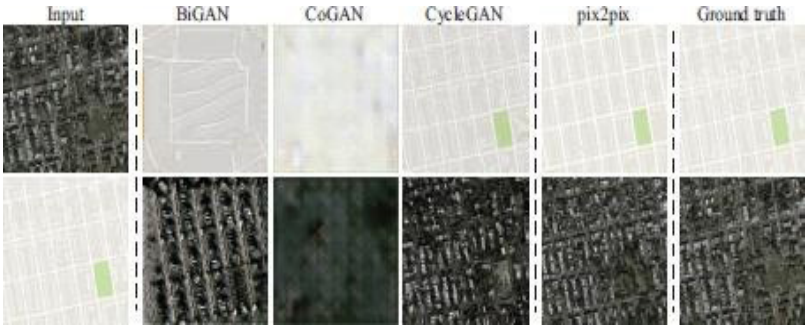
Cabe resaltar que varios de los artículos revisados coinciden en definir el proceso de segmentación de imágenes como un paso clave en las tareas de análisis e interpretación de imágenes [14].

Se encontró también que la reconstrucción de imágenes con técnicas de súper resolución es útil en muchos casos prácticos en los que se pueden obtener múltiples cuadros de la misma escena [15][16], incluyendo no solo imágenes satelitales, sino también otro tipo de imágenes, incluso en aplicaciones de manipulación de vídeos. Google Research desarrolló un algoritmo de segmentación de vídeo que funciona en tiempo real para dispositivos móviles y que podría ser aplicable en imágenes satelitales. Este algoritmo agrupa los píxeles al objeto de primer plano y diferencia los que pertenecen al fondo. Luego, el algoritmo realiza un etiquetado dividiendo la imagen principal en categorías semánticas.

Por otra parte, algunos artículos permiten evidenciar la técnica de visión por computadora, donde una red neuronal se entrena para aprender el mapeo entre una imagen de entrada y una imagen de salida. Utiliza un conjunto de imágenes con características similares, lo que le permite capturar las tipologías especiales de una colección de imágenes y luego aplicar esas características a otra colección de imágenes. Esto convierte una imagen de una representación de una escena dada, x, en otra, y. Por ejemplo, puede convertir una imagen de escala de grises a color o una imagen en etiquetas semánticas.

En la Figura 9, puede apreciarse la comparación de la imagen asociada a los diferentes métodos de mapeo dada una entrada [16][17][18]:

Figura 9.
Diferentes métodos de mapeo aérea con fotos de Google Maps



Fuente: [16]

En el área de la medicina, los modelos generativos han experimentado un crecimiento significativo en la investigación. Estos modelos tienen la capacidad de generar imágenes sintéticas que pueden utilizarse para detectar anomalías, automatizar protocolos para resonancias magnéticas, transferir imágenes radiológicas entre diferentes modalidades, entre otros usos. Un estudio realizado por Burlina et al. (2019) reveló que las imágenes de retina generadas de forma sintética con una clase de Redes Generativas Adversariales (GAN, por sus siglas en inglés) perteneciente a un modelo generativo eran realistas, incluso para expertos en el campo (Burlina et al., 2019) [20].

Para abordar la escasez de datos, una de las técnicas ampliamente utilizadas es la "data augmentation". Se estima que, durante los años 2016 y 2017, se publicaron más de 400 artículos en las principales conferencias y revistas relacionadas con imágenes médicas y modelos neuronales profundos (Litjens et al., 2017) [20].

NVIDIA, como organización líder en tecnologías de inteligencia artificial, ha tenido un impacto significativo en la implementación de modelos generativos en sus redes neuronales artificiales. Han desarrollado técnicas recientes basadas en algoritmos como la "image to image translation", que permiten la transferencia de cambios complejos de apariencia entre clases de imágenes [21]. Un ejemplo destacado de sus desarrollos es "Ganimal", una red altamente exitosa. Además, han diseñado una GAN capaz de generar imágenes de personas famosas imaginarias a partir de fotos reales. Este algoritmo se basa en una propuesta de redes GAN con variaciones estocásticas, generando un conjunto de imágenes de rostros nuevos con alta definición (NVIDIA, 2021) [21].

Es importante destacar que estos avances en modelos generativos han abierto nuevas perspectivas y aplicaciones en campos como la medicina, donde la generación de imágenes sintéticas puede ser una herramienta valiosa para el diagnóstico y la investigación.

Figura 10.
StyleGAN de NVIDIA

Fuente: [22]

De forma similar la revisión de literatura permite observar como las redes neuronales artificiales han permeado positivamentetodos los sectores de la industria, mejorandoy optimizando los procesos tradicionales [23].

Por otra parte, la clasificación de imágenes de detección remota ha sido uno de los temas más activos de investigación en las últimas décadas, y la mayoría de los trabajos existentes se centran en la clasificación por píxeles, que asigna la información de una etiqueta a cada píxel en una imagen multiespectral o hiperespectral [24] la seguridad de la información y técnicas de ocultamiento de la misma como la esteganografía también han tenido grandes evoluciones gracias a algoritmos de detección de imágenes asados en aprendizaje profundo [25].

5. DISCUSIÓN

Se presenta la respuesta a las preguntas de investigación formuladas en el proceso de revisión sistemática.

Pregunta 1.

¿Cuáles son las tendencias de inteligencia artificial y el aprendizaje profundo aplicables al tratamiento de imágenes satelitales?

Se reconocen varias técnicas aplicadas para el tratamiento de imágenes satelitales, resaltando una variedad de trabajos orientados a mejorar la resolución espacial, desde baja hasta alta, a través de técnicas que pueden acelerar los procesos de entrenamiento de imágenes. Esta técnica recibe el nombre de Súper Resolución (SR), ya que permite aumentar el número de píxeles de la imagen para proporcionar detalles espaciales más finos que los capturados por el sensor de adquisición original (Smith, 2020) [26].

La Súper Resolución (SR) es un proceso cuyo objetivo principal es generar una imagen de alta resolución a partir de una imagen en baja resolución [27]. Las imágenes en alta resolución contienen una mayor densidad de píxeles, lo que permite tener más detalles en comparación con una imagen en baja resolución. La necesidad de alta resolución es común en aplicaciones de visión por computadora para tareas de reconocimiento y análisis de imágenes en diversas áreas, como la medicina, vigilancia, ciencia forense y aplicaciones en imágenes satelitales.

En otras palabras, la premisa general para el proceso de Súper Resolución es que una imagen en baja resolución es el resultado de una degradación de una imagen en alta resolución, y, por lo tanto, es posible realizar una reconstrucción basada en la imagen de entrada y un modelo. La precisión del modelo empleado es fundamental para la Súper Resolución, y un modelo incorrecto puede incluso degradar aún más la imagen.

Las imágenes satelitales de alta resolución a menudo contienen diferentes clases semánticas. Para abordar esta complejidad, se han propuesto métodos que dividen la imagen en subregiones cada vez más finas y luego extraen histogramas de características locales dentro de cada subregión, incluyendo características simples de bajo nivel, como intensidad y texturas. Para esto, se ha creado un marco general denominado Redes Colaborativas Generativas (GCN, por sus siglas en inglés), en el cual se optimiza el generador (el mapeo de intereses) en el espacio de extracción de características de otra red. Estas dos redes (generador y extractor) colaboran mutuamente, ya que la última "ayuda" a la primera al construir características discriminatorias y relevantes, que no necesariamente son fijas y posiblemente son aprendidas conjuntamente con el generador (Johnson, 2016) [28].

Además del algoritmo de Super Resolución, es importante mencionar otro algoritmo dentro de los modelos generativos que ha tenido una gran aplicación, el algoritmo de aprendizaje no supervisado Auto Encoder (AE). Este consiste en un codificador automático que utiliza el algoritmo de propagación hacia atrás para que el valor objetivo sea igual al valor de entrada. Existen diferentes clases de codificadores automáticos, como el autoencoder con denoising, el autoencoder escaso, el autoencoder variacional y el autoencoder contractivo (Goodfellow et al., 2016) [29].

De forma similar, la tendencia vista en la revisión muestra algunas investigaciones con menor relevancia en torno a las Redes de Creencias Profundas (DBN, por sus siglas en inglés). Este tipo de red fue propuesto por primera vez por el profesor Hinton en 2006 y funciona a partir de los principios de las Máquinas de Boltzmann Restringidas (RBM, por sus siglas en inglés) y una capa de salida (Hinton, 2006) [30]. El proceso de entrenamiento de DBN se puede dividir en dos pasos: el pre-entrenamiento y el ajuste fino por divergencia contrastiva (PCD, por sus siglas en inglés). Específicamente, se encuentran redes híbridas construidas con un componente de redes convolucionales y otro de DBN para la identificación de personas a través de una base de datos de imágenes o videos de personas (Li et al., 2018) [31].

En cuanto a las funciones de activación, también se observan modelos construidos comúnmente a partir de la utilización de la función ReLU (Rectified Linear Unit), ya que esta función ha demostrado un buen rendimiento en numerosos campos de visión por computadora. Adicionalmente, se encuentra una variación de la anterior llamada PReLU (Parametric ReLU), que se define como un tipo de función de activación modificada que mejora o ajusta el modelo de Súper Resolución (SR) con un costo computacional adicional casi nulo y un riesgo reducido de sobreajuste (He et al., 2015) [32].

Se plantea orientar la investigación mediante el desarrollo y la aplicación de algoritmos de aprendizaje profundo con arquitecturas de redes neuronales que permitan que los sistemas adquieran inteligencia artificial y aprendan a construir e incluso reconstruir los píxeles corruptos de las imágenes a través de parámetros pre-entrenados. Estas representaciones visuales obtenidas a través de la carga útil de un satélite (Smith, 2019) [5] pueden presentar

una serie de errores que dificultan la lectura de parámetros relevantes en el desarrollo de una investigación. Por lo tanto, se busca la aplicación de técnicas que contribuyan a maximizar la precisión y calidad de las imágenes obtenidas, disminuyendo los factores de errores que generan píxeles incorrectos, como la corrección radiométrica, alteraciones en el movimiento del satélite y distorsiones en la imagen global (corrección geométrica), e interferencias de la atmósfera que alteran de forma sistemática los valores de los píxeles (corrección atmosférica) (Smith, 2019) [5].

En términos generales otra de las técnicas citada en la literatura revisada, es la de los métodos de clasificación de imágenes basados en redes convolucionales (CNN). Uno de los más representativos se presenta con de la agrupación espacial piramidal (SPP-net) también es significativo en la detección de objetos [33].

Finalmente, y como resultado de algunos avances en redes GAN, estas se presentan como una técnica poderosa para generar imágenes que dan una percepción con alta calidad, fomentando las reconstrucciones de imágenes y aplicables en un futuro cercano a la investigación propuesta en el presente.

El principio básico de esta arquitectura está inspirado en el juego de "Zero-sum" para dos jugadores, en el que el total las ganancias de dos jugadores son cero, y la ganancia de cada jugador o la pérdida de utilidad se equilibra exactamente con la pérdida o ganancia de la utilidad de otro jugador.

Actualmente el uso de las GANs es el método más popular para hacer Super Resolución. La arquitectura de una GAN, que anteriormente se describió, se basa igualmente en el aprendizaje no supervisado, la cual se compone de dos redes neuronales que residen en un solo marco y compiten entre sí, una generadora y otra discriminadora. La red generadora produce algunos datos basados en la distribución de probabilidad y la red discriminadora intenta adivinar si los datos provienen del conjunto de entrada real (imagen HR) o del generador.

Pregunta 2.

¿Cuáles son los mayores aportes o resultados alcanzados en el tratamiento de las imágenes satelitales?

A pesar de que la mayoría de los satélites tecnológicamente avanzados son capaces de discernir información espacial dentro de un metro cuadrado en la superficie de la Tierra, el alto costo de esta tecnología de adquisición, junto con las limitaciones físicas cuando disminuye sustancialmente el tamaño de píxel del sensor, son importantes restricciones que hacen que las técnicas de mejora de la resolución, como Súper Resolución (SR), basadas en algoritmos de redes generativas sean una herramienta excelente para la obtención de imágenes en aplicaciones de teledetección (Smith, 2017) [34]. Uno de los aportes más significativos que surgen de este trabajo es el potencial de los modelos generativos profundos para hacer frente al problema de Súper Resolución no supervisado debido a sus capacidades para introducir nuevos detalles espaciales no presentes en la imagen de baja resolución original (Ledig et al., 2017) [35].

Del mismo modo, técnicas como el "Data Augmentation" han logrado demostrar que las Redes Adversas Generativas (GAN) pueden producir datos artificiales que son casi indistinguibles de los datos reales (Goodfellow et al., 2014) [23]. La aplicabilidad de un concepto de coincidencia basado en el aprendizaje profundo para la generación de puntos de control de la Tierra (GCP) precisos y exactos a partir de imágenes satelitales SAR mediante la unión de estas con imágenes ópticas demuestra que las Redes Adversas Generativas Condicionales (cGAN) están capacitadas para generar parches de imágenes similares a las imágenes SAR a partir de imágenes ópticas (Huang et al., 2017).

Como se enunció al principio de este escrito, Colombia ha logrado poco desarrollo en el campo espacial teniendo en cuenta tres aspectos: inicialmente porque la resolución de las imágenes obtenidas no cumple con los requisitos necesarios para la detección rápida de objetos, ya que es demasiado baja debido a las limitaciones de los sistemas captadores de imágenes (Smith, 2019) [29]. El segundo aspecto se orienta a la necesidad de incrementar la cantidad de profesionales formados en ambas áreas, es decir, tanto en inteligencia artificial y redes neuronales, como en los campos de tecnologías espaciales. Y como una tercera parte, el costo de inversión y retorno de capital al ejecutar proyectos en este ámbito, ya que los satélites son costosos tanto para construir como para operar (Elachi, 1987) [36].

Estos motivos son suficientes para querer incursionar en investigaciones de aprendizaje profundo y redes neuronales artificiales, tecnologías que, después de superar varias barreras y romper escepticismos, logran actualmente generar grandes e innovadoras posibilidades de desarrollo. Un claro ejemplo son los modelos de redes generativas que buscan crear objetos, caras, paisajes, entre otros, convirtiéndose en una opción viable para solucionar la problemática anteriormente enunciada.

Pregunta 3.

¿Comparativamente ofrecen mejores resultados las técnicas tradicionales a las de aprendizaje profundo en el tratamiento de las imágenes satelitales?

El monitoreo detallado de la Tierra hace que la resolución espacial de los sensores ópticos sea una de las limitaciones más importantes que afectan a las imágenes detectadas de forma remota (Rao, 2016) [37]. En general, la resolución espacial es un instrumento que define el tamaño del píxel que cubre la superficie de la Tierra y, por lo tanto, describe la capacidad del sensor para capturar pequeños detalles de la imagen.

La posibilidad de realizar correcciones y mejoras a las imágenes satelitales, transponiendo metadatos útiles como la posición espacial de forma automática, hace que la aplicación de técnicas de aprendizaje profundo sea una alternativa relevante y objeto de estudio para el progreso del sector espacial (Luo et al., 2020) [23]. A través de un modelo generativo y la manipulación de un conjunto de datos con suficientes imágenes, se pueden obtener excelentes resultados para aplicaciones en información de infraestructura, medio ambiente, catastro, cartografía, agricultura, urbanismo, topografía, minería y servicios públicos.

Las investigaciones consultadas muestran datos en los que las técnicas tradicionales para la segmentación y clasificación de objetos [37] requieren mucho tiempo de procesamiento y no logran alcanzar información efectiva al diferenciar objetos compuestos de material similar, haciendo que la discriminación de tales categorías sea una tarea laboriosa usando solo datos ópticos (Rao, 2016) [38]. Por otro lado, esto no sucede con las técnicas

recientes, como las redes neuronales convolucionales (CNN), que tienen más capas ocultas, una estructura de red más compleja y capacidades de expresión y aprendizaje de características más potentes que los métodos tradicionales de aprendizaje automático.

En el caso de la reconstrucción de imágenes, las técnicas tradicionales no permitían obtener múltiples cuadros de la misma escena [37]. Con la Super Resolución (SR), se pueden realizar dichos procedimientos, incluyendo no solo imágenes satelitales, sino también imágenes médicas y aplicaciones de video.

El modelo de red neuronal convolucional entrenado por el algoritmo de aprendizaje profundo ha logrado logros notables en muchas tareas de identificación a gran escala en el campo de la visión por computadora desde su introducción (Krizhevsky et al., 2012) [28].
Por otra parte, es positivo enunciar resultados óptimos obtenidos en tareas de teledetección óptica basados en un modelo generativo de probabilidad dinámica (Wang et al., 2020) [38]. Los resultados experimentales en datos reales muestran que los enfoques propuestos pueden obtener mejores tasas de clasificación a una velocidad mayor que el vecino k más cercano (KNN), las máquinas de vectores de soporte (SVM) y el método tradicional de regresión discriminante jerárquica (HDR). Las comparaciones cualitativas y cuantitativas contra ocho métodos de fusión clásicos y de vanguardia demuestran la efectividad de estrategias de aplicación de modelos generativos vs técnicas convencionales. Nuestro enfoque puede generar imágenes fusionadas con bordes y texturas claras y conserva con éxito una gran cantidad de información en las imágenes originales [39].

Otras iniciativas relacionadas con procesos de teledetección, georreferenciación y geocodificación en las que los métodos convencionales tienden a convertir la información de latitud y longitud de forma poco coherente para áreas desconocidas (Huo et al., 2017) [40]. Sin embargo, desarrollos basados en direccionamiento generativo que comienzan con la extracción de datos a partir de imágenes satelitales mediante el aprendizaje profundo y luego etiquetan de forma exclusiva las regiones, objetos y estructuras utilizando algunos algoritmos basados en gráficos y proximidad demuestran resultados de entrenamiento más favorables.

Preguntas emergentes de investigación

A partir de la revisión sistemática de literatura alrededor de redes neuronales artificiales y su aplicación en el tratamiento de imágenes satelitales, se visualiza como aumenta las posibilidades de generar proyectos que permitan mejorar la calidad de las imágenes satelitales permitiendo el análisis y observación de la tierra en formas que antes no eran posibles [41], es así como surge la pregunta si con la aplicación de las tendencias encontradas se podrá desarrollar un algoritmo capaz de corregir de forma automática los errores de las imágenes y recrear los píxeles defectuosos causados por los mismos errores. Aún más allá se proponen trabajos que se orienten a técnicas predictivas que puedan mejorar la calidad de vida del ser humano y apalanquen el desarrollo de tecnologías en el área espacial.

Teniendo como base la información sobre las GANs, se propone como trabajo a futuro realizar una serie de comparaciones con la implementación de otras arquitecturas y así tener una conclusión sobre la efectividad y conveniencia de aplicar las GAN para la súper resolución de imágenes satelitales [42].

Adicionalmente, se propone realizar una revisión a la bibliografía sobre redes generativas para el tratamiento de imágenes principalmente sobre la eliminación de nubosidad en imágenes satelitales, obteniendo así otro estado del arte que será de base para el desarrollo de un proyecto posterior.

6. CONCLUSIONES

El Deep Learning y sus técnicas de redes convolucionales y redes GAN se proponen como alternativas óptimas para proporcionar mejoras en las interferencias de la imagen, disminuyendo el ruido y la distorsión generada por factores externos al sensor instalado en el satélite (Smith et al., 2020) [43]. Estas técnicas tienen el potencial de reconstruir imágenes con mayor resolución.

La capacidad de manipular imágenes satelitales e incluso reconstruir píxeles defectuosos se convierte en una opción que respalda proyectos innovadores que permitirán el uso óptimo de conjuntos de imágenes adicionales para

tareas como la detección de patrones de minería ilegal, predicciones del clima, seguimiento de actividades volcánicas y predicciones para agricultores.

La elección del enfoque de aprendizaje profundo más adecuado depende del problema a resolver y su aplicabilidad, con el objetivo de lograr resultados óptimos que sean diferenciales y tengan impactos positivos en comparación con los métodos tradicionales.

7. REFERENCIAS

1. J. López Sotelo, *Redes Neuronales Artificiales y Aprendizaje Profundo (Deep Learning)., 1st ed. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2019, pp. 1-26*.
2. M. Pritt y G. Cherm. *Satellite Image Classification with Deep Learning*. *Publicado en 2017 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR),* 2017.
3. C. Yao, X. Luo, Y. Zhao, W. Zeng, and X. Chen, "A Review on Image Classification of Remote Sensing Using Deep Learning", *IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. IEEE, Chengdu, China, 2017.
4. B. Kitchenham, P. Brereton, Z. Li, D. Budgen,and A. Burn, "Repeatability of systematic literature reviews", *Annual Conference on Evaluation & Assessment in SoftwareEngineering (EASE 2011)*. IET, Durham, UK, pp. 101 - 111, 2011.
5. A. Paco. Correcciones a las imágenes satelitales (2018, mayo). [En línea] pp. 79-88. Disponible en https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/ [Accedido: 23- Jul- 2019].
6. C. Douarre, C. Crispim, A. Gelibertc, L. Tougnea, and D. Rousseau, "Novel data augmentation strategies to boost supervised segmentation of plant disease", *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier, 2019.
7. N. Diaz, J. Lopez, and G. Salazar, "Application of Transfer Learning for Object Recognition Using Convolutional Neural Networks", *IEEE 1st Colombian Conference on Applications in Computational Intelligence (ColCACI)*. IEEE, Medellín, 2018.

8. D. Foster, *Generative deep learning*, 1st ed. Estados Unidos: O´Reilly, 2019, pp. 15-118.

9. R. Mitra, J. Singh, and I. Mishra, "Using Image Segmentation to identify Rooftops in low- resolution Satellite images", Medium, 2018. [En línea]. Disponible:https://towardsdatascience.com/using-image- segmentation-to-identify-rooftops-in-low- resolution-satellite-images-c791975d91cc. [Accedido: 23- Jul- 2019].

10. R. Mitra, S. Bahuguna and R. Joshi, "Identifying rooftops on low-resolution images with Masked R-CNN model", Medium, 2019. [En línea]. Disponible: https://towardsdatascience.com/identifying-rooftops-on-low-resolution-images-with-masked- r-cnn-model-6edd79310ec0. [Accedido: 16- Jul-2019].

11. H. khesh y X. Cheng. (2017, Octubre) Satellite super-resolution images depending on deep learning methods: A comparative study. Publicado en IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC).

12. G. University, "WORLDVIEW-3", Gbdxdocs.digitalglobe.com. [En línea]. Available: https://gbdxdocs.digitalglobe.com/docs/worldvie w-3. [Accedido: 23- Jul- 2019].

13. R. Mitra, "Building AI for Good, by the People, for the People", Medium, 2019. [En línea]. Disponible: https://medium.com/omdena/building-ai-for- good-by-the-people-for-the-people- d98ad78b5001. [Accedido: 16-Jul- 2019].

14. W. Hani, R. Feng, L. Wang, and Y. Cheng, "A semi-supervised generative framework with deep learning features for high-resolution remote sensing image scene classification", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Elsevier, China, 2017.

15. C. Ledig, L. Theis, F. Huszar. Photo- Realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network. Publicado en 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Pp. 104-114, 2017.

16. S. Cheol y M. Kyu Park. Super-resolution image reconstruction: a technical overview. (2013) Journals & Magazines IEEE Signal Processing Magazine. Vol. 20 -3. Pp. 21-36, 2013.

17. J. Zhu, T. Park y P. Isola. (2017) Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle- Consistent Adversarial Networks. CVV. [En línea] Disponible en https://junyanz.github.io/CycleGAN/. [Accedido: 16- Jul- 2019].

18. J. Yan, Z Berkeley, R. Zang y B. (2017) Deepak Pathak. Multimodal Image-to-Image Translation. CVV. [En línea] Disponible en https://phillipi.github.io/pix2pix/. [Accedido: 16-Jul- 2019].

19. P.M. Burlina, N. Joshi, K.D. Pacheco, T.Y.A. Liu, N.M. Bressler Assessment of deep generative models for high-resolution synthetic retinal image generation of age-related macular degeneration JAMA Ophthalmol, 137, pp. 258- 264, 2019.

20. X Yi, E Waliaa, P Babyn. (2019) Generative adversarial network in medical imaging: A review. Medical Image Analysis. 101552.

21. Ming-Yu Liu, Xun Huang , Arun Mallya, Tero Karras, Timo Aila, Jaakko Lehtinen, Jan Kautz NVIDIA, (2019) Few-Shot Unsupervised Image-to-Image Translation.

22. Tero Karras, Samuli Laine, Timo Aila, A Style-Based Generator Architecture for Generative Adversarial Networks. arXiv 2018

23. S. Shao, P. Wang, and R. Yan, "Generative adversarial networks for data augmentation in machine fault diagnosis", *Computers in Industry*. ElSevier, Estados Unidos, pp. 85-93, 2019.

24. K. He, J. Sun, S. Ren and X. Zhang, "Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and MachineIntelligence*. 2015.

25. D. Hu, L. Wang, W. Jiang, and S. Zheng, "A Novel Image Steganography Method via Deep Convolutional Generative Adversarial Networks", *IEEE Access*. IEEE, 2018.

26. M. Seddikab, M. Tamaazoustia, and J. Lin, "Generative collaborative networks for single image super-resolution", Neurocomputing. Elsevier, 2019.

27. C. Lanaras, J. Dias, S. Galliani, E. Baltsaavias and K. Schindler, "Super-resolutionof Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. ISPRS Journal, 2018.

28. J. Haut, J. Plaza, R. Fernandez, and M. Paoletti, "A New Deep Generative Network for Unsupervised Remote Sensing Single-Image Super-Resolution", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018.

29. M. Heydari and S. Ghidary, "3D Motion Reconstruction From 2D Motion Data Using Multimodal Conditional Deep Belief Network", *IEEE Access*. IEEE, Estados Unidos, 2019.

30. A. Franco and L. Oliveira, "A coarse-to-fine deep learning for person re-identification", *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE, Lake Placid, NY, USA, 2016.

31. A. Mohammed, H. Tao, and M. Talab, "Review of deep convolution neural network in image classification", *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*. ICRAMET,Jakarta, Indonesia, 2017.

32. Q. Liu, R. Hang, H. Song, and Z. Li, "Learning Multiscale Deep Features for High- Resolution Satellite Image Scene Classification", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING. IEEE, China, pp. 117-126, 2018.

33. J. R. Jensen and K. Lulla, "Introductory digital image processing: A remote sensing perspective," Geocarto Int., Vol. 2, no. 1, p. 65, 2008, DOI: 10.1080/10106048709354084.

34. W. Luo, H. Li, G. Liu, and L. Zeng, "Semantic Annotation of Satellite Images Using Author–Genre–Topic Model", *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*. IEEE, 2014.

35. H. Aan, J. Sveinsson, A. Nielsen, T. Bovith and J. Benediktsson, "Model-based satellite image fusion", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. IEEE, Estados Unidos, pp. 1336- 1346, 2018.

36. G. Lin, Q. Wua, L. Chen, L. Qiu, X. Wang and T. Liu, "Deep unsupervised learning for image super-resolution with generativeadversarial network", *Signal Processing: Image Communication*. Elsevier, China, pp. 88-100, 2018.

37. F. Giraldo, M. González y E. Camargo. (2011, diciembre). Algoritmos de procesamiento de imágenes satelitales con transformada Hough. Revista Visión Electrónica. [En línea] Vol.5-2 pp.26 – 41.

38. C. Ledig, L. Theis, F. Huszar. Photo- Realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network. Publicado en 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Pp. 104-114.

39. X. Xia, W. Guo, and W. Xiaofei, "A remote sensing ship recognition method based on dynamic probability generative model", *Expert Systems with Applications*. pp. 6446-6458, 2015.

40. P. Zarate and J. Lopez, "Systematic Literature Review: Artificial Neural Networks Applied in Satellite Images, 2020 IEEE Colombian Conference on Applications ofComputational Intelligence (IEEE ColCACI2020), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ColCACI50549.2020.9247916.

41. A. Zurbaran, P. Wightman and M. Brovelli, "A MACHINE LEARNING PIPELINE ARTICULATING SATELLITE IMAGERY ANDOPENSTREETMAP FOR ROAD DETECTION", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. FOSS4G, Bucharest, Romania, 2019.

42. J. Xu, X. Shi, S. Qin, K. Lu, H. Wang and J. MaInfrared (2019) LBP-BEGAN: A generative adversarial network architecture for infrared and visible image fusion. Physics & Technology. Joint Conf. Artif. Intell. (pp. 3954-3960).

43. İ Demir, F. Hughes, A. Raj, K.Dhruv, S. Muddala, M., S. Garg, B. Doo, R. Raskar, Generative Street Addresses from Satellite Imagery. *ISPRS International Journal of Geo- Information*. 2018, *7*, 84.

Anexo No. 1 Artículos de Redes Neuronales Artificiales para el tratamiento de Imágenes Satelitales

No. Art	Título	Journal or Conference	Contribución
1	Learning Multiscale Deep Features for High-Resolution Satellite Image Scene Classification	IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.	En este artículo se utilizan imágenes satelitales de alta resolución que son deformadas en múltiples escalas que son empleadas para entrenar una red neuronal convolucional profunda (DCNN) con arquitecturas SPP Net (Spatial Pyramid Pooling) para acelerar el procesamiento de entrenamiento de la red. Esta red está compuesta por cinco capas convolucionales y dos capas completamente conectadas.
2	Deep unsupervised learning for image super-resolution with generative adversarial network	Journal Elsevier	Un enfoque de aprendizaje profundo no supervisado propuesto con técnicas de Súper Resolución dentro de un marco de red adversarial Generativa (GAN), en el que a partir de unas imágenes de baja resolución se logra obtener una de alta resolución. El modelo está compuesto por una red que actúa como generador convolucional con conexiones densas y un discriminador y una función de activación SeLu. Un subpíxel de la capa convolucional se ejecuta en la parte superior del modelo generador para aumentar las entradas y combinar la información de la textura local y de abstracción global.
3	Ultra-Dense GAN for Satellite Imagery Super-Resolution	Journal Neural computing	Este documento propone un modelo generativo adversario con una capa ultradensa (udGAN) con algoritmos de súper resolución para lograr en imágenes capturadas con sensores remotos detalles espaciales más finos que los capturados por los sensores mismos, donde se reforma el diseño del bloque interno residual en una topología de matriz bidimensional. Esta topología puede proporcionar conexiones diagonales adicionales para lograr con menos capas mayor rendimiento.
4	A remote sensing ship recognition method based on dynamic probability generative model	Journal Elsevier	Los autores de este documento presentan una propuesta novedosa para el reconocimiento de buques utilizando datos de teledetección óptica basados en un modelo generativo con probabilidad dinámica. El enfoque propuesto de acuerdo con los resultados y en comparación con los métodos tradicionales ofrece un mayor reconocimiento de objeto, es decir más confiable y oportuno.
5	A semi-supervised generative framework with deep learning features for high-resolution remote sensing image scene classification	ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing	Se propone un marco generativo semi-supervisado (SSGF), combinando características de aprendizaje profundo, una técnica de etiqueta de autoría de los escritores y un método de evaluación discriminatorio para tareas de clasificación y segmentación desarrollando un algoritmo extendido (SSGA-E) y evaluarlo mediante experimentos exclusivos.

6	A new deep generative network for unsupervised remote sensing single-image super-resolution	IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.	Un nuevo modelo de red generadora convolucional no supervisada para mejorar los datos de resolución baja en imágenes utilizadas para teledetección. La red generativa propuesta es capaz de aprender inicialmente las relaciones entre los dominios de bajo resolución y alta resolución a través de varias capas convolucionales, reducción de muestras, normalización de lotes y funciones de activación. Se realiza una comparación entre doce métodos de súper resolución sin supervisión aportando los resultados de cada una.
7	Generative collaborative networks for single image super-resolution	Journal Elsevier	Se presenta un marco general denominado Redes Colaborativas Generativas (GCN), que consiste en optimizar el generador (el mapeo de interés) en una red de extracción de características. Las dos redes (generador y extractor) son colaborativas en el sentido de que la última "ayuda" a la primera, al construir características discriminatorias y relevantes (no necesariamente fijas y posiblemente aprendidas mutuamente con el generador) y con función de pérdida perceptual (combinación de una pérdida de confrontación y una pérdida de VGG). Se evalúa el marco GCN en el contexto de Single Image Super-Resolution (SISR), demostrando que da como resultado un método que adaptado a dominios de súper resolución más eficiente del dominio utilizado para ImageNet.
8	Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network	Journal Elsevier	Basados en un modelo de aprendizaje profundo, se emplea una red neuronal convolucional (CNN) de última generación para realizar un muestreo ascendente de extremo a extremo, entrenando con datos (imágenes) del proyecto Satelital Sentinel 2 con una resolución más baja.
9	Model-based satellite image fusion	IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.	Es presentado un método de pixel por vecindario con regularización para realizar una fusión de imágenes de baja resolución espacial con alta resolución espectral.
10	An overview of background modeling for detection of targets and anomalies in hyperspectral remotely sensed imagery	IEEE Journal	A través del diseño de algoritmos de detección hiperespectral que son más sensibles y de confianza, se describe una variedad de estrategias de modelado de fondo: gaussiana y no gaussiana, global y local, generativo y discriminativo, paramétrico y no paramétrico, espectral y espacial-espectral, buscando en las imágenes pequeños objetos o materiales que tienen una firma espectral específica (detección de objetivo) o que son espectralmente diferentes (detección de anomalías) útiles en el monitoreo ambiental.

Continuación Anexo No. 1 Artículos de Redes Neuronales Artificiales para el tratamiento de Imágenes Satelitales

11	Semantic annotation of satellite images using author-genre-topic model	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	Un modelo generativo jerárquico, denominado modelo autor-clase-tema (AGTM), para realizar anotaciones de imágenes satelitales. La precisión de la anotación de imágenes satelitales se mejora cuando se introduce la información de las escenas en las imágenes de entrenamiento. Al representar las imágenes con varias palabras visuales, las etiquetas de clases y escenas de las imágenes corresponden a los autores y los tipos de los documentos, respectivamente.
12	A Review on Image Classification of Remote Sensing Using Deep Learning	IEEE International Conference on Computer and Communications	Este artículo de revisión muestra como las técnicas de aprendizaje profundo serán el método de clasificación de imágenes dominante para tareas de teledetección.
13	Exploring the potential of conditional adversarial networks for optical and SAR Image Matching	IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 11(6), pp. 1811-1820	Se investiga la aplicabilidad de un concepto de coincidencia basado en el aprendizaje profundo para la generación de puntos de control de tierra precisos y exactos a partir de imágenes satelitales SAR y de imágenes ópticas. Con este fin, aplican un modelo de redes adversas generativas condicionales (cGAN) capacitadas para generar parches de imágenes similares a SAR a partir de imágenes ópticas. Los resultados revelan la necesidad de nuevas mejoras del modelo propuesto especialmente, la necesidad de una red generadora, que genere de manera más confiable y precisa las estructuras geométricas de las imágenes ópticas.
14	IMG2DSM: Height Simulation from Single Imagery Using Conditional Generative Adversarial Net	IEEE Geoscience and Remote Sensing 15(5), pp. 794-798	La técnica utilizada es a través de redes adversas generativas condicionales cuya arquitectura se basa en una red codificador-decodificador con conexiones de salto (generador) y estructuras de penalización a escala de parches de imagen (discriminador) para simular el modelo de superficie digital (DSM) a partir de una sola imagen óptica. La capacidad del enfoque se evalúa tanto visualmente (en términos de interpretación fotográfica) como cuantitativa (en términos de errores de reconstrucción y precisión de clasificación) en conjuntos de datos de resolución espacial.
15	Generative street addresses from satellite imagery	ISPRS International Journal of Geo-Information	Desarrollo de un algoritmo generativo automático para crear direcciones de calles a partir de imágenes satelitales, mediante el aprendizaje y el etiquetado de carreteras, regiones y celdas de direcciones. Actualmente, el 75% de las carreteras del mundo carecen de sistemas adecuados de direccionamiento de calles. Proponemos un diseño de dirección generativo que mapea el globo de acuerdo con las calles. El algoritmo comienza con la extracción de carreteras a partir de imágenes satelitales mediante el aprendizaje profundo. Luego, etiqueta de forma exclusiva las regiones, carreteras y estructuras utilizando algunos algoritmos basados en gráficos y proximidad.

16	DeepGlobe 2018: A Challenge to Parse the Earth through Satellite Images	IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops	A través del desafío Deepglobe 2018 se propone mejorar y evaluar los enfoques de comprensión de imágenes satelitales de vanguardia, permitiendo una investigación interdisciplinaria más colaborativa en el área, que lleve a nuevos desarrollos interesantes en la intersección de la visión por computadora, el aprendizaje automático, la teledetección y las geociencias.
17	A machine learning pipeline articulating satellite imagery and openstreetmap for road detection	International Conference of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences	Este trabajo se enfoca en unir la percepción remota y la visión por computadora al proporcionar una tubería basada en código abierto para generar conjuntos de datos de capacitación de aprendizaje automático para detección de carreteras en un área de interés. La investigación demuestra una metodología en la que los datos de OSM pueden utilizarse como entrada para los algoritmos de ML.

Anexo No. 2 Artículos de Redes Neuronales Artificiales para otras aplicaciones

No. Art	Título	Journal or Conference	Contribución
1	A Novel Image Steganography Method via Deep Convolutional Generative Adversarial Networks	IEEE Access	Los autores proponen un novedoso método de análisis automático de esteganografía sin necesidad de modificar los datos de imagen portadora, este SWE [1] basado en redes profundas con modelos generativos y convolucionales, logrando encriptar mensajes secretos en imágenes más grandes gracias a las bondades de las redes neuronales, limitante que se tenía en las imágenes generadas por algunas aplicaciones como por ejemplo las tipo stego.
2	3D Motion Reconstruction From 2D Motion Data Using Multimodal Conditional Deep Belief Network	IEEE Access	Se hace la propuesta de un modelo de red generativa en el que a partir de imágenes de movimiento humano en 2D, se generan imágenes en 3D a través de arquitecturas de aprendizaje profundo con modelos generativos multimodales un poco más complejas llamadas Multimodal Conditional Deep Belief Network (MCDBN). Este podría ser un área de aplicaciones relevante ya que incluye imitación de aprendizaje humano y generación de personajes.
3	Unsupervised representation learning with deep convolutional Generative adversarial networks	Conference ICLR	Se hace una propuesta que permita cerrar la brecha entre las redes neurnales convolucionales supervisadas y no supervisadas. Se aplica una clase de CNNs llamada generativa convolucional profunda de redes adversarias (DCGAN), que tienen ciertas restricciones arquitectónicas, y Demostrar que son un fuerte candidato para el aprendizaje no supervisado. Establecen una clase de arquitecturas GAN convolucionales profundas (DCGAN) con las siguientes diferencias: Discriminadores capacitados para las tareas de clasificación de imágenes, que muestran un rendimiento competitivo con otros algoritmos no supervisados. Filtros aprendidos por las GAN que aprenden a dibujar objetos específicos.

4	A Generative Auditory Model Embedded Neural Network for Speech Processing	IEEE International Conference	Construyen un modelo de red neural generativa para un modelo auditivo integrado con el fin de procesar las señales del habla. El modelo auditivo generativo consta de dos etapas, la etapa de estimación del espectro en el eje de frecuencia logarítmica por la cóclea y la etapa de análisis espectral-temporal en el dominio de modulación por la corteza auditiva. Los resultados del experimento muestran que el modelo auditivo de red generativa incorporado es aún más robusto contra el ruido, descompone la onda del habla.
5	Generative adversarial networks and convolutional neural networks based weather classification model for day ahead short-term photovoltaic power forecasting	ElServier	Proponen un modelo de clasificación meteorológica basado en redes neuronales convolucionales y redes adversarias. El estudio demuestra que las redes generativas adversarias pueden generar nuevas muestras con alta calidad que capturan las características intrínsecas de datos originales en comparación con métodos tradicionales como el algoritmo de vecinos.
6	A generative neural network model for the quality prediction of work in progress products	ElServier	Este artículo propone un modelo de red neuronal generativo para predecir automáticamente calidad del producto en proceso de elaboración, teniendo en cuenta que uno de los desafíos clave en los procesos de fabricación es mejorar la precisión del control de calidad y poder realizar predicciones. A través de las técnicas de auto codificación se entrena utilizando datos de proceso de fabricación sin procesar para extraer información con grabaciones de línea de producción.
7	Improving novelty detection with generative adversarial networks on hand gesture data	ElServier	En este estudio implementan un método novedoso para resolver el problema de clasificación de gestos ya que estos son difíciles de detectar con un umbral de clasificación simple. La solución propuesta tiene dos componentes: (1) el uso de un modelo generador (GAN) para aumentar el conjunto de datos , (2) el uso de vectores objetivos estocásticos para disminuir el puntaje de predicción promedio, lo que facilita el ajuste del umbral.
8	Generative adversarial networks for data augmentation in machine fault diagnosis	ElServier	Desarrollan un marco clasificador auxiliar basado en GAN (ACGAN) para que aprenda señales de un sensor mecánico y genere datos en bruto unidimensionales casi reales. El modelo arquitectónico propuesto está compuesto por dos partes, un generador y un discriminador, y ambas se construyen apilando capas de convolución dimensionales para aprender las características locales de la entrada original.

9	A coarse-to-fine deep learning for person re- identification	IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)	Este artículo propone una nueva arquitectura de aprendizaje profundo para reidentificación de personas. La red propuesta se basa en un enfoque de aprendizaje grueso a fino, intentando adquirir un conocimiento genérico a específico a lo largo de un proceso de aprendizaje de transferencia. El núcleo del método se basa en una red híbrida compuesta de una red neuronal convolucional y una red de creencias profundas.
10	Novel data augmentation strategies to boost supervised segmentation of plant disease	ElServier	Se aborda la tarea de segmentación con material agrícola, específicamente la costra de la manzana en imágenes de plantas de manzana mediante el uso de redes neuronales convolucionales. Como resultado se observa que los datos simulados por una GAN podrían proporcionar un aumento importante en el rendimiento de la segmentación, hasta un aumento del 17% en la puntuación F1 (una medida que tiene en cuenta la precisión y el recuerdo), en comparación con la segmentación con pesos inicializados en un dataset como ImageNet.
11	Semantic Segmentation of Complex Road Environments from Aerial Images Using Convolutional Neural Networks	IEEE 1st Colombian Conference on Applications in Computational Intelligence (ColCACI)	Implementación de una red neuronal convolucional para segmentar carreteras a través de un variedad de tipos en una variedad de entornos desde imágenes aéreas al comparar directamente la imagen con una verdad fundamental correspondiente. Los resultados actuales son favorables para carreteras complejas pero el El detector necesita más trabajo para entornos donde las carreteras pueden ocupa la mayor parte de la imagen.
12	Application of Transfer Learning for Object Recognition Using Convolutional Neural Networks	IEEE International Conference on Big Data (Big Data)	Se utiliza una red neuronal pre-entrenada, con Inception-V3 que se usa como un extractor de características en las imágenes, por otro lado, se entrena un clasificador Softmax, que contiene las clases para el reconocimiento de objetivos del Laboratorio de la Universidad UAO.
13	Review of deep convolution neural network in image classification	International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications	Introduce el surgimiento y desarrollo del aprendizaje profundo y red neuronal de convolución, y resume el modelo básico estructura, extracción de características de convolución y operación de agrupamiento de red neuronal de convolución.

1 Tomado página oficial SpaceX https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/ (acceso: 07.09.22)

Diagramación y diseño:
Chako Hernández
Correo: contactochako@gmail.com
Cel: +57 312 440 5897
https://www.behance.net/chako

Este libro fue diagramado utilizando fuentes tipográficas
Georgia en sus respectivas variaciones a 10 puntos para el contenido
y para títulos a 20 pts.
Impreso en el mes de diciembre de 2023.
100 ejemplares

EF Business Outsourcing SAS
Carrera 10 D 23 26 Sur
Bogotá, Cundinamarca
Colombia
Cel: (+57) 310 774 012

Esta cuarta edición de la Colección: Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial explora profundamente el vibrante ámbito de la gestión tecnológica y la innovación en la industria aeroespacial. A través de sus páginas, el libro, una obra colectiva, analiza detalladamente la evolución constante y el considerable impacto de la gestión tecnológica en el ámbito aeroespacial. Se enfoca tanto en el panorama global como en el desarrollo específico en Colombia. Este volumen reúne contribuciones de varias instituciones académicas y empresas, incluyendo la Fuerza Aeroespacial Colombiana y la Corporación de la Industria Aeronáutica Colombiana. Estas colaboraciones formaron parte de la Semana Universitaria EMAVI bajo el tema "Gestión Tecnológica e Innovación en el Campo Aeroespacial", destacando investigaciones en el desarrollo de nuevas tecnologías, diseño y producción de aeronaves, además de su integración con aspectos de seguridad.

Esta obra ofrece un análisis exhaustivo de una variedad de temas cruciales para el futuro de la aviación y la exploración espacial. Entre ellos, se incluyen estudios sobre el desarrollo de algoritmos para el procesamiento de datos obtenidos de sistemas avanzados en aeronaves y análisis sobre la promoción y educación espacial en Latinoamérica. Además de profundizar en aspectos técnicos y científicos, esta publicación resalta la relevancia del desarrollo humano y las habilidades personales en la vanguardia de la innovación tecnológica. Constituye una lectura esencial para profesionales, académicos y estudiantes interesados en comprender y contribuir al progreso de la industria aeroespacial, especialmente en su creciente desarrollo en Colombia.

FUERZA AEROESPACIAL COLOMBIANA

ASÍ SE VA A LAS ESTRELLAS

ESCUELA MILITAR DE AVIACIÓN

LA CIENCIA MI RUTA MI META EL ESPACIO

ISBN: 978-628-96090-0-4