

FUERZA AEROSPACIAL  
COLOMBIANA



ESCUELA DE  
POSTGRADOS  
DE LA FAC

# I SEMINARIO INTERNACIONAL EN SEGURIDAD OPERACIONAL

“LA SEGURIDAD DEL VUELO:  
ENTRE EL DESEMPEÑO HUMANO Y  
LA CIENCIA DE MATERIALES”

24 DE OCTUBRE DE 2025  
ISSN: 3115-2759 (EN LÍNEA)



MAESTRÍA EN  
**SEGURIDAD  
OPERACIONAL**

ESCUELA DE POSTGRADOS DE LA FAC - EPFAC / SNIES 102978

**Comité Organizador**

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

**Compiladores**

Dra. Erika Juliana Estrada Villa  
Ing. Harold Julián Acosta León

**Revisión de Texto y Estilo**

MY. Francine Pineda Mongui  
Dra. Erika Juliana Estrada Villa  
RI. Carolina Cubillos Mondragon

**Portada y Diseño**

Aldemar Zambrano Torres

**Autores**

Ph.D. Juan David Ocampo  
Ing. Edgar Espejo Mora  
Ing. Mauricio Sierra Cetina  
Ing. Fabio Alejandro Merchán Rincón  
Ing. Harold Julián Acosta León

ISSN: **ISSN: 3115-2759** (En línea) Periodicidad anual

### **Información Técnica**

Publicación Producto de Investigación Grupo de investigación GICMA COL0140489  
Segunda Edición, junio 2025. Periodicidad anual, publicación digital Sitio Web:  
<https://www.epfac.edu.co/es/eventos-academicos/seguridad-operacional>

### **Editor**

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

Bogotá, Colombia ©2025

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

Copyright (c) 2025. Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

# SEMINARIO INTERNACIONAL EN SEGURIDAD OPERACIONAL

## LA SEGURIDAD DE VUELO: ENTRE EL DESEMPEÑO HUMANO Y LA CIENCIA DE MATERIALES

### Introducción

La seguridad de vuelo ha sido históricamente una prioridad central en el ámbito aeronáutico, evolucionando de modelos reactivos, centrados en la investigación posterior a los accidentes, hacia sistemas cada vez más proactivos, predictivos y basados en datos. En este proceso de transformación, dos factores han demostrado ser determinantes en la prevención de incidentes: el desempeño humano y la integridad estructural de los sistemas aeronáuticos. Aunque tradicionalmente se han analizado por separado, ambos elementos forman parte de un ecosistema operacional interdependiente, en el que la interacción entre la conducta humana, el entorno técnico y los sistemas tecnológicos define, en gran medida, los niveles de seguridad alcanzados por una organización aérea.

En este contexto, el Seminario Internacional de Seguridad Operacional, en su versión 2025, se desarrolló bajo la temática “La seguridad del vuelo: entre el desempeño humano y la ciencia de materiales”. Este espacio académico de alto nivel se concibió como un escenario de reflexión interdisciplinaria, orientado a analizar la seguridad de vuelo desde una perspectiva integral que articula los avances en el estudio del comportamiento humano con los desarrollos más recientes en la ciencia de materiales aplicada a la aviación. El propósito fue generar una comprensión sistémica de la seguridad operacional, reconociendo que los factores humanos influyen directamente en el mantenimiento, la operación, la inspección técnica y la gestión del riesgo, del mismo modo en que las propiedades y límites de los materiales aeronáuticos condicionan la confiabilidad estructural y la respuesta ante condiciones extremas.

La integración entre el factor humano y la ciencia de materiales se plantea como un eje innovador que permite fortalecer los sistemas de gestión de seguridad operacional, promoviendo una aviación más resiliente, sostenible y basada en la evidencia. Comprender los procesos de fatiga de materiales, el envejecimiento estructural, la tolerancia al daño y la implementación de materiales inteligentes resulta tan esencial como analizar la influencia de la toma de decisiones, la fatiga cognitiva o la carga de trabajo humano en los entornos de operación aérea. Este enfoque dual reconoce que la seguridad no depende de variables aisladas, sino de la interacción armónica entre personas, procesos y tecnologías.

Bajo esta concepción, el seminario reunió a un grupo de expertos nacionales e internacionales, investigadores y profesionales del sector aeronáutico, quienes, desde sus diferentes ámbitos de experiencia, aportaron visiones complementarias al debate técnico y académico. La jornada fue concebida como una plataforma de transferencia de conocimiento y buenas prácticas, promoviendo la actualización permanente y la colaboración entre la academia, la industria y el Estado en materia de seguridad operacional

El desarrollo del evento se estructuró en dos momentos principales. En la primera parte, se llevaron a cabo las conferencias magistrales, orientadas a la exposición de resultados de investigación, metodologías aplicadas y enfoques técnicos que contribuyen a la prevención de riesgos en el entorno aeronáutico. En la segunda, se realizó el Panel de Expertos “Materiales, datos e inteligencia: pilares del futuro en la seguridad operacional”, concebido como un espacio de discusión interdisciplinaria que articuló la investigación científica con la experiencia operativa y la visión tecnológica del sector.

A través de estos espacios académicos, el seminario buscó generar propuestas, reflexiones y rutas de trabajo colaborativo que contribuyeran al fortalecimiento de la cultura de seguridad operacional en Colombia. Del mismo modo, se promovió el diálogo entre la ciencia de los materiales, la gestión del desempeño humano y las nuevas tecnologías emergentes, reconociendo su potencial para transformar los sistemas de monitoreo, diagnóstico y prevención de fallas en el ámbito aeroespacial.

Este evento, resultado del trabajo conjunto entre la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (EPFAC) y la Escuela de Aviación del Ejército Nacional (ESAVE), se consolidó como un referente académico, al propiciar una conversación científica que trasciende las fronteras institucionales y fomenta la innovación orientada a la seguridad del vuelo. La interacción entre investigadores, docentes, oficiales, ingenieros y estudiantes del posgrado en Seguridad Operacional permitió consolidar una comunidad académica comprometida con la excelencia técnica, la prevención operacional y la gestión del conocimiento.

## Gemelos Digitales & Inteligencia Artificial: El Futuro de la Integridad Estructural en la Industria Aeroespacial y la Seguridad Aérea

### TÍTULO DE LA PONENCIA INGLÉS

Ph.D. Juan David Ocampo



Licenciatura, Universidad EAFIT (Medellín, Colombia)  
Maestría en Artes, Universidad de Texas en San Antonio  
Doctorado, Universidad de Texas en San Antonio

Director del Departamento de Ingeniería Mecánica e Industrial  
ST. Mary's University

Correo electrónico: [jocampo@stmarytx.edu](mailto:jocampo@stmarytx.edu)

Investigador, mentor y educador en el ámbito de la confiabilidad estructural y la seguridad de estructuras aeroespaciales, con un fuerte compromiso por aumentar la diversidad en las áreas STEM. Ha colaborado con empresas como Northrop Grumman y la USAF en proyectos avanzados como el desarrollo de gemelos digitales, y es miembro activo del Consorcio de Tecnologías de Seguridad Nuclear (CONNECT), que promueve la conexión de instituciones minoritarias con proyectos de investigación en energía y seguridad nuclear. Ha recibido importantes subvenciones, incluyendo una de la NSF para mejorar la educación STEM de pregrado para latinos.

Reconocido internacionalmente en el campo de la confiabilidad aeronáutica, ha coautorado numerosos artículos y presentado investigaciones en conferencias globales, como la Conferencia Internacional sobre Fatiga Aeronáutica. Ha sido galardonado con premios, incluyendo uno de la FAA por logros excepcionales en investigación. Su trabajo ha sido respaldado por importantes financiamientos de la FAA, USAF, NNSA y NSF, y ha realizado investigaciones en instituciones como el Consejo Nacional de Investigación de Canadá y Pilatus Aircraft Ltd.

## Resumen de ponencia



La integración de gemelos digitales y tecnologías de inteligencia artificial representa una revolución en la forma en que la industria aeroespacial gestiona la seguridad operacional y la integridad estructural de las aeronaves. Esta transformación tecnológica surge como respuesta a la necesidad de contar con sistemas más inteligentes, precisos y predictivos, capaces de anticipar el comportamiento estructural y de reducir los riesgos asociados al desgaste, la fatiga y las fallas materiales. En la actualidad, el conocimiento técnico y la capacidad de análisis de datos permiten trascender los modelos tradicionales de mantenimiento correctivo o programado, dando paso a un enfoque sustentado en la observación digital continua, la simulación y la toma de decisiones basada en evidencia.

El concepto de gemelo digital se fundamenta en la creación de una réplica virtual dinámica de una aeronave o de alguno de sus sistemas críticos, alimentada en tiempo real por sensores instalados en los componentes estructurales, los cuales registran variables como cargas, vibraciones, deformaciones o temperaturas, que luego son procesadas mediante algoritmos de inteligencia artificial y modelación probabilística. El resultado es una simulación constante del comportamiento del sistema físico bajo condiciones reales de operación, permitiendo identificar alteraciones antes de que se manifiesten como fallas. Este vínculo entre el entorno físico y el entorno digital ofrece una nueva dimensión de control y análisis, donde cada aeronave puede ser monitoreada individualmente con niveles de precisión sin precedentes.

El desarrollo y aplicación de los gemelos digitales han demostrado un impacto significativo en tres aspectos esenciales: la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad operacional. En primer lugar, estas tecnologías permiten detectar señales tempranas de deterioro estructural

y fatiga del material, evitando que los problemas evolucionen hasta convertirse en amenazas críticas. En segundo lugar, contribuyen a la eficiencia logística, al optimizar los calendarios de mantenimiento y reducir los tiempos de inactividad de las aeronaves. Y, finalmente, desde una perspectiva sostenible, promueven un uso más racional de los recursos, extendiendo la vida útil de los componentes y disminuyendo los residuos generados por reemplazos innecesarios.

En la exposición se argumentó que el modelo probabilístico de tolerancia al daño constituye la base teórica sobre la cual se desarrollan los gemelos digitales, lo que permite evaluar la probabilidad de falla de una estructura a partir de las condiciones reales de carga y operación, integrando factores como el comportamiento del material, la frecuencia de vuelo y las condiciones ambientales. Gracias a este tipo de análisis, los ingenieros pueden estimar con mayor exactitud los intervalos de inspección y los puntos críticos donde se requiere intervención. De este modo, la gestión del mantenimiento pasa de ser un proceso rutinario a un sistema inteligente y adaptativo, alineado con los principios de la seguridad operacional moderna.

Cabe destacar que, la aplicación de estas tecnologías ha sido validada en múltiples entornos aeronáuticos, evidenciando resultados positivos en materia de confiabilidad y reducción de costos. Los programas de monitoreo estructural digital implementados por instituciones aeroespaciales internacionales han demostrado que el seguimiento individualizado de aeronaves mediante modelos virtuales reduce los incidentes relacionados con fatiga estructural y optimiza la disponibilidad de flota. Estas experiencias internacionales han confirmado que la transición hacia una aviación basada en datos no solo es viable, sino indispensable para garantizar niveles de seguridad acordes con las exigencias del siglo XXI.

En el contexto latinoamericano, la adopción de gemelos digitales plantea desafíos particulares puesto que, más que una cuestión económica, el principal reto radica en la generación, calidad y trazabilidad de los datos. Los modelos digitales dependen de la precisión de la información obtenida sobre las cargas de vuelo, las propiedades de los materiales y las condiciones de operación. En este sentido, la implementación de proyectos piloto se presenta como una estrategia adecuada para desarrollar gradualmente capacidades técnicas e institucionales. Iniciar con la instrumentación de componentes específicos, por ejemplo, vigas, largueros o alas, permitiría recolectar información real y validar la efectividad de los modelos predictivos.

Es importante resaltar que, el desarrollo de estas capacidades requiere una estrecha colaboración entre academia, industria y fuerzas aéreas, donde la investigación aplicada y la formación especializada cumplan un papel central. La creación de programas académicos y centros de investigación orientados a la ingeniería de confiabilidad estructural, la ciencia de materiales y el análisis de datos resulta fundamental para avanzar en la autonomía tecnológica y científica del país. De igual modo, el uso de plataformas de software abiertas (open source) permite la transferencia de conocimiento y la adaptación de estas herramientas a las necesidades específicas del entorno operativo colombiano.

La interacción entre la ciencia de materiales y la inteligencia artificial redefine la comprensión de la integridad estructural en la aviación moderna ya que, el estudio de la

microestructura de los materiales, los mecanismos de fatiga y los límites de resistencia puede ahora combinarse con modelos digitales capaces de predecir el momento exacto en que una estructura requerirá intervención. Esta integración de la física de materiales con la analítica de datos convierte la ingeniería aeronáutica en una disciplina más precisa, proactiva y sostenible.

En conclusión, la implementación de gemelos digitales en la aviación representa un paso decisivo hacia una seguridad operacional predictiva e inteligente. Estas tecnologías no sustituyen la experiencia humana, sino que la potencian al proporcionar herramientas de análisis que permiten anticipar riesgos, optimizar procesos y fundamentar decisiones en datos verificables. La aviación del futuro dependerá entonces de la capacidad de los sistemas para aprender, adaptarse y responder a la información generada por sus propias operaciones. En ese escenario, la sinergia entre materiales, datos e inteligencia definirá los nuevos estándares de integridad estructural, confiabilidad y sostenibilidad, consolidando un modelo de gestión en el que la ciencia y la tecnología trabajan juntas al servicio de la seguridad del vuelo.

## Metodología de análisis de fallas aplicada a componentes aeronáuticos

Ing. Edgar Espejo Mora



### Perfil profesional

Ingeniero Mecánico Universidad Nacional de Colombia  
Magister Ingeniería en Materiales y Procesos Universidad Nacional de Colombia

Profesor Asociado  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Universidad Nacional de Colombia

[eespejom@unal.edu.co](mailto:eespejom@unal.edu.co)

Ingeniero mecánico de la Universidad Nacional de Colombia, con una sólida formación en materiales, procesos de manufactura y análisis de fallas. A lo largo de su carrera, ha cursado diversos estudios de posgrado, incluyendo una Maestría en Materiales y Procesos de Manufactura, una Maestría en Ciencias con énfasis en Estadística, y una Especialización en Métodos Estadísticos Básicos, con un enfoque particular en el análisis de datos de laboratorio y reconocimiento de imágenes de piezas fracturadas. Además, ha complementado su formación con varios diplomados y cursos en áreas como control de corrosión, metrología, gestión de laboratorios bajo norma ISO 17025, y Machine Learning.

Cuenta con una amplia experiencia en análisis de fallas, metalografía y procesos de manufactura. Desde 2000, ha sido docente en la Universidad Nacional de Colombia, donde coordina proyectos de consultoría en colaboración con empresas del sector automotriz, aeronáutico y petrolero. Ha liderado más de 560 trabajos relacionados con la identificación de materiales, ensayos mecánicos y análisis de fallas.

## Resumen de ponencia



El análisis de fallas constituye una de las herramientas más precisas y reveladoras dentro del ámbito de la ingeniería aeronáutica, pues a través de su aplicación sistemática es posible transformar los incidentes técnicos en conocimiento que fortalece la seguridad operacional y la confiabilidad estructural de las aeronaves. En este campo, la comprensión de una falla va mucho más allá de la simple ruptura o deterioro visible de un componente, ya que implica examinar de manera integral los factores materiales, humanos, ambientales y procedimentales que interactúan en el origen del evento. Cada falla es, en realidad, la manifestación final de una cadena de causas acumuladas en el tiempo y, por lo tanto, su estudio requiere una mirada técnica profunda, interdisciplinaria y metódica que permita descifrar esa secuencia de hechos que la produjeron.

En la aviación, el concepto de falla no puede definirse de manera unívoca, pues lo que para un técnico puede representar un daño crítico, para un ingeniero puede ser una desviación dentro de los márgenes tolerables del diseño, y para un director de operaciones, una contingencia prevista dentro del plan de mantenimiento. La definición depende del contexto y de los parámetros con los que se mida el desempeño del sistema, de ahí la necesidad de establecer criterios institucionales claros que permitan identificar cuándo un componente ha dejado de cumplir sus condiciones de funcionalidad, seguridad y eficiencia. Solo bajo una comprensión compartida de lo que se considera una falla es posible garantizar que el análisis posterior tenga validez técnica y relevancia operativa.

En este sentido, el proceso metodológico de análisis de fallas se inicia con la recolección rigurosa y ordenada de la evidencia, etapa en la que el control y la disciplina son determinantes. Cada marca, cada residuo o alteración superficial, cada deformación, constituye una huella que contiene información sobre las condiciones físicas que antecedieron al evento. Preservar las piezas bajo condiciones ambientales adecuadas, registrar fotográficamente las superficies y mantener la cadena de custodia son acciones esenciales para conservar la fidelidad de los indicios. Sin evidencia confiable, cualquier

interpretación posterior corre el riesgo de basarse en conjeturas, debilitando la posibilidad de obtener conclusiones precisas.

El análisis de fallas no se limita a la descripción de los daños; implica reconstruir la historia del componente y comprender cómo una secuencia de causas se encadenó hasta alcanzar la pérdida de funcionalidad. En este sentido, la metodología requiere equipos de trabajo multidisciplinarios en los que converjan ingenieros, técnicos, personal de mantenimiento, investigadores y especialistas en factores humanos. Esta interacción de saberes permite abordar las fallas desde múltiples dimensiones: la técnica, la organizacional y la humana, reconociendo que la seguridad operacional no depende únicamente del material o del diseño, sino también de las prácticas, las decisiones y las condiciones bajo las cuales se ejecuta cada tarea.

Uno de los elementos conceptuales más importantes dentro de la metodología consiste en diferenciar la fuente de la falla de su causa raíz. La fuente se refiere al hecho inmediato que desencadena el daño, como un proceso de lubricación incorrecto o un montaje defectuoso; la causa raíz, en cambio, está en un nivel más profundo y se asocia con fallas estructurales del sistema, tales como deficiencias en los procedimientos, en el diseño o en la capacitación del personal. Mientras la fuente responde a un síntoma visible, la causa raíz remite a un problema invisible pero fundamental, cuya corrección previene la repetición del evento. Esta distinción, aunque sutil, define el éxito del análisis, pues evita que las soluciones se queden en lo superficial y permite orientar las acciones hacia el corazón del problema.

La observación y clasificación de las fallas también forman parte esencial del proceso. Estas pueden ser catastróficas cuando comprometen la integridad total del equipo, o no catastróficas cuando afectan parcialmente la operación; súbitas cuando se presentan sin advertencia previa, o progresivas cuando su evolución puede ser detectada mediante monitoreo; latentes cuando permanecen ocultas, o manifiestas cuando ya presentan síntomas observables. El objetivo de una organización aeronáutica madura es reducir al mínimo las fallas súbitas y promover sistemas que permitan anticipar las progresivas, de modo que las acciones correctivas se conviertan en oportunidades de aprendizaje y no en respuestas de emergencia.

Si duda, el conocimiento profundo de los materiales juega un papel determinante dentro del análisis de fallas. Los modos de daño más frecuentes como desgaste, deformación, fractura y corrosión no ocurren de manera aislada, sino que suelen presentarse combinados y encadenados. En un escenario típico, un error de mantenimiento o un diseño inapropiado puede generar un desgaste prematuro, este provocar un punto de concentración de esfuerzos y finalmente producir una fractura catastrófica. Comprender esta secuencia permite establecer programas de mantenimiento predictivo, seleccionar materiales con mejores propiedades y ajustar las condiciones de operación para prolongar la vida útil de los componentes.

El valor del análisis de fallas trasciende lo técnico para insertarse en el terreno de la gestión del conocimiento. Cada evento, independientemente de su magnitud, constituye una fuente de información que debe ser documentada, estudiada y utilizada para mejorar los procedimientos y fortalecer la cultura de seguridad. El propósito del análisis no es asignar

culpas, sino generar aprendizaje, transformar la experiencia operativa en conocimiento científico y utilizar ese conocimiento para prevenir futuros incidentes. Cuando las organizaciones logran integrar este enfoque, la seguridad operacional deja de ser una meta abstracta para convertirse en una práctica diaria sustentada en la observación, la evidencia y la reflexión técnica.

En conclusión y en el marco del Seminario Internacional de Seguridad Operacional, es importante reafirmar que el análisis de fallas es una herramienta que articula el conocimiento de los materiales con la comprensión del factor humano, convirtiéndose en un elemento esencial para el desarrollo de una aviación más segura y eficiente. Analizar una falla es leer la historia de un componente, interpretar sus señales, reconocer sus límites y aprender de su comportamiento. Es, en esencia, un ejercicio de responsabilidad técnica y ética que transforma la ciencia en prevención y la prevención en cultura de seguridad.

## Materiales Aeronáuticos: Selección, Procesamiento y Servicio

Ing. Mauricio Sierra Cetina



Ingeniero Mecánico Universidad Antonio Nariño  
Magister Ingeniería en Materiales y Procesos Universidad Nacional de Colombia

Director Programa de Ingeniería Mecánica  
Universidad Libre de Colombia

[mauricio.sierra@unilibre.edu.co](mailto:mauricio.sierra@unilibre.edu.co)

Ingeniero Mecánico por la Universidad Antonio Nariño (U.A.N.) y una Maestría en Ingeniería en Materiales y Procesos de la Universidad Nacional (U.N.). Su trayectoria incluye una destacada experiencia en el diseño, desarrollo y transformación de aleaciones metálicas, además de desempeñarse como asesor independiente para empresas del sector industrial y metalmecánico, brindando soluciones técnicas especializadas. Como docente, ha impartido clases en diversas instituciones académicas de renombre, entre ellas la Universidad de La Sabana, la Universidad Distrital, la Universidad Incca, la Universidad de América y la Universidad Nacional. Ha sido docente invitado en la Especialización en Diseño de Maquinaria y Equipo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) en Duitama, así como en la Maestría en Ingeniería de la Universidad Libre. Actualmente, ejerce el cargo de director del programa de Ingeniería Mecánica en la Universidad Libre, donde continúa contribuyendo al ámbito académico y profesional.

## Resumen de ponencia



La comprensión de los materiales aeronáuticos es uno de los fundamentos sobre los que descansa la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad del vuelo. En el ámbito de la ingeniería aeronáutica, el estudio, la selección y el procesamiento de los materiales representan un ejercicio de equilibrio entre la ciencia, la tecnología y la responsabilidad técnica, donde cada elección estructural repercute directamente en el desempeño y la confiabilidad de una aeronave. Por ello, esta ponencia aborda el papel que desempeñan los materiales dentro del ciclo de diseño, fabricación y operación, y la forma en que su adecuada selección constituye una garantía de integridad y seguridad en el entorno aeroespacial.

Toda discusión sobre materiales debe partir de la ciencia que los sustenta. En relación con esto, la ciencia de los materiales establece la relación esencial entre estructura, propiedades, procesamiento y aplicación, conformando un ciclo continuo en el que cada variable influye en las demás. Las propiedades físicas, químicas y mecánicas de un material, como la conductividad térmica, la resistencia, la ductilidad, la tenacidad o la dureza, son el reflejo de su estructura interna y del tratamiento que ha recibido durante su fabricación. El procesamiento, a su vez, determina la manera en que esa estructura se organiza, y en consecuencia, define su desempeño final. En la aviación, donde los márgenes de error son mínimos y las condiciones de servicio extremas, comprender esa interdependencia se convierte en un imperativo técnico y ético.

Es importante mencionar que, el desarrollo tecnológico ha transformado la forma en que se caracterizan los materiales y se evalúan sus propiedades. En el pasado, la identificación de la composición química requería extraer muestras y someterlas a ensayos destructivos en laboratorio; hoy, la disponibilidad de equipos portátiles permite realizar análisis in situ con espectrómetros de mano, durómetros y sistemas ópticos avanzados, reduciendo tiempos y preservando la integridad de las piezas. Estos avances han facilitado sin duda la toma de decisiones técnicas inmediatas en entornos de mantenimiento y fabricación, fortaleciendo la

trazabilidad y la confiabilidad de los procesos. Sin embargo, disponer de instrumentos modernos no reemplaza la necesidad de criterio ingenieril; la tecnología amplía las capacidades, pero la responsabilidad sigue recayendo en la interpretación científica del ingeniero.

El proceso de selección de materiales surge habitualmente de la necesidad de resolver un problema técnico, ya sea un rediseño, una reparación o el desarrollo de un nuevo componente. En este punto convergen el conocimiento del comportamiento de los materiales, la comprensión de las condiciones de servicio y la evaluación de los recursos disponibles. Las bases de datos actuales contienen decenas de miles de aleaciones y compuestos, lo que plantea el desafío de filtrar y elegir aquellos que ofrezcan el mejor compromiso entre resistencia, peso, costo y durabilidad. En la práctica, gran parte de la industria aún se apoya en el diseño por analogía, es decir, en la fabricación de piezas similares a otras que han demostrado buen desempeño, un método tradicional pero limitado, que restringe la innovación y perpetúa dependencias tecnológicas.

El verdadero reto consiste en avanzar hacia modelos de selección basados en criterios científicos, apoyados en herramientas computacionales y en el uso de software especializado que permita correlacionar variables y simular el comportamiento de los materiales en condiciones reales de operación. Por ejemplo, en la industria aeronáutica, esto significa asumir que no existe un material perfecto y que todo componente posee defectos o imperfecciones que deben ser gestionados. La tarea del ingeniero no es eliminar totalmente esos defectos, sino entender su naturaleza, controlar su crecimiento y garantizar que no comprometan la seguridad estructural. Este enfoque se relaciona directamente con los modelos predictivos de confiabilidad estructural, que buscan anticipar el comportamiento del material a lo largo de su vida útil y evitar que una imperfección se transforme en una falla catastrófica.

Los procesos de fabricación representan otra dimensión clave dentro del ciclo de vida de los materiales. En las aeronaves modernas, los fuselajes y gran parte de la estructura se fabrican principalmente en aleaciones de aluminio laminado, aunque también se emplean componentes forjados, extruidos o en menor medida fundidos, dependiendo del tipo de esfuerzo y la función de cada pieza. En los últimos años, los materiales compuestos han adquirido un papel protagónico, pues combinan propiedades de diferentes materiales para obtener estructuras más livianas y resistentes. Los compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de carbono o de vidrio, o incluso con cerámicos como el carburo de silicio o la alúmina, han permitido reducir el peso de las aeronaves sin sacrificar su rigidez. Hoy, cerca de la mitad de la estructura de una aeronave puede estar compuesta por materiales de este tipo, lo que demuestra la transición hacia sistemas híbridos donde la ingeniería busca maximizar la eficiencia energética y la resistencia al deterioro ambiental.

A pesar del prestigio del acero por su resistencia y versatilidad, su papel en la aviación ha disminuido debido a su densidad y a las dificultades para controlar fenómenos como la corrosión y la fatiga. En contraste, los compuestos y las aleaciones ligeras ofrecen ventajas que redefinen el equilibrio entre desempeño y peso, abriendo nuevas posibilidades de diseño. Junto a estos avances, la manufactura aditiva o impresión 3D de metales ha emergido como una tecnología disruptiva que permite construir piezas complejas con geometrías imposibles

de obtener mediante procesos convencionales. Sin embargo, sus altos costos y los requisitos de certificación limitan todavía su adopción masiva en el sector aeronáutico, aunque su potencial para la personalización y el ahorro de material la convierte en un campo de investigación esencial para el futuro cercano.

No cabe duda de que, el desafío de la ingeniería aeronáutica no radica solo en dominar tecnologías o procesos de fabricación, sino en consolidar una base científica y tecnológica que permita al país alcanzar autonomía en el desarrollo de materiales y componentes de alto desempeño. Este propósito demanda madurez técnica, cultura investigativa y articulación efectiva entre academia, industria y Estado como estrategia de soberanía tecnológica. Colombia posee talento humano e infraestructura capaces de generar conocimiento de frontera, pero la innovación solo prospera cuando la investigación responde a las necesidades reales del sector y la colaboración reemplaza la fragmentación institucional. La seguridad del vuelo depende de esa integración entre desempeño humano, integridad estructural y ciencia de los materiales, orientada a crear conocimiento útil y sostenible.

## Ciencia de materiales aplicada a la gestión de riesgos en la Seguridad Operacional

Ing. Fabio Alejandro Merchán Rincón



Ingeniero Aeronáutico – Universidad de San Buenaventura  
Especialista en Aviónica – Universidad de San Buenaventura  
Magíster en Materiales y Procesos de Manufactura – Universidad Nacional de Colombia

Director del Programa de Ingeniería Aeronáutica  
Universidad de San Buenaventura – Bogotá

[ing.dpraeronautica@usbbog.edu.co](mailto:ing.dpraeronautica@usbbog.edu.co)

Ingeniero aeronáutico, especialista en aviónica y magíster en materiales y procesos de manufactura, con una destacada trayectoria en ciencia de materiales, análisis estructural y certificación aeronáutica. Su labor profesional y académica se ha orientado al desarrollo de soluciones técnicas que fortalecen la seguridad operacional y la confiabilidad estructural de las aeronaves. Ha liderado proyectos de investigación relacionados con el desarrollo de bancos de ensayo estructural bajo normativas FAR 23, el modelamiento de componentes aeronáuticos y la implementación de sistemas de monitoreo de salud estructural. Su experiencia incluye el diseño y la fabricación de elementos para certificación, la caracterización mecánica de materiales y la aplicación de tecnologías de manufactura avanzada. Durante su trayectoria ha sido Profesor Asociado y Coordinador de la Maestría en Ingeniería Aeroespacial, y actualmente dirige el Programa de Ingeniería Aeronáutica de la Universidad de San Buenaventura, Bogotá. Es Investigador Asociado reconocido por MinCiencias y miembro del grupo de investigación AeroTECH, desde donde lidera líneas en estructuras, materiales y procesos aeronáuticos. Ha participado como ponente en congresos nacionales e internacionales y es autor de publicaciones científicas sobre análisis de fallas, tolerancia al daño y ensayos estructurales. Su compromiso académico promueve una aviación nacional más segura, innovadora y sostenible.

## Resumen de ponencia



La ciencia de materiales constituye uno de los pilares más determinantes en la gestión de riesgos dentro de la aviación, ya que en ella se articula el conocimiento científico sobre la estructura y el comportamiento de la materia con la necesidad técnica de garantizar la seguridad operacional en entornos altamente exigentes. En la aviación, cada componente estructural está sometido a condiciones variables de carga, vibración, temperatura y ambiente que, si no son comprendidas a fondo, pueden comprometer la integridad de la aeronave y la seguridad del vuelo. Comprender cómo un material responde ante estas sollicitaciones no es un ejercicio teórico, sino una práctica esencial que permite anticipar la falla antes de que ocurra, corregir debilidades en el diseño o en el mantenimiento y establecer protocolos preventivos que reduzcan los riesgos asociados al deterioro de los componentes. Desde esta perspectiva, la ciencia de materiales deja de ser una disciplina experimental confinada al laboratorio para convertirse en una herramienta estratégica de análisis, diagnóstico y prevención que sostiene los cimientos de la seguridad aérea.

Caracterizar un material significa anticipar su comportamiento y comprender la manera en que sus propiedades físicas, químicas y mecánicas interactúan con las cargas operacionales. Conocer su resistencia, su ductilidad, su capacidad de absorción de energía o su susceptibilidad a la corrosión equivale a prever las condiciones que podrían conducir a una falla. Esta caracterización, entendida como un proceso de observación, medición y análisis riguroso, trasciende el ámbito académico y se convierte en una práctica cotidiana en la ingeniería aeronáutica, pues en ella se define la diferencia entre la confiabilidad y la incertidumbre estructural. Al evaluar la microestructura, los modos de fractura o la respuesta del material frente a entornos corrosivos, se obtiene una lectura anticipada de su vida útil, lo que permite diseñar estrategias de mantenimiento basadas en la evidencia y no en la suposición. La idea de que “caracterizar es anticipar” resume el principio esencial de esta ciencia: conocer el material hoy es evitar un incidente mañana.

La relación entre la ciencia de materiales y la normativa aeronáutica se hace evidente al analizar los marcos regulatorios que orientan la investigación de accidentes e incidentes, como el RAC 114, que reconoce la influencia directa de los factores de material en la mayoría de los eventos operacionales. Una selección inadecuada, un procesamiento deficiente o una falta de monitoreo estructural pueden ser causas determinantes de un fallo, de modo que la gestión del riesgo debe ser entendida como un proceso que comienza en la elección del material y culmina en su supervisión durante el servicio. La seguridad del vuelo depende, por tanto, tanto del desempeño humano como de la confiabilidad estructural, y esta última solo puede garantizarse mediante un conocimiento profundo de los materiales, de su comportamiento ante cargas repetitivas y de su capacidad para resistir la fatiga.

Las técnicas de caracterización y los métodos de análisis de falla permiten identificar defectos latentes, discontinuidades o zonas de concentración de esfuerzos que anticipan el deterioro antes de que se manifieste. Esta capacidad predictiva transforma la gestión del mantenimiento, que deja de ser correctiva para convertirse en proactiva, pues las decisiones se sustentan en datos objetivos que reflejan el estado real de la estructura. Ensayos mecánicos, estudios fractográficos o mediciones de resistencia a la corrosión son herramientas que aportan información crítica para el control de la calidad y la planificación de intervenciones, contribuyendo así a la reducción de riesgos y al aumento de la vida útil de los componentes. En este proceso, la ciencia de materiales se consolida como un lenguaje común entre el laboratorio, la ingeniería y la operación, en el que cada observación microscópica se traduce en una acción preventiva dentro del sistema aeronáutico.

La selección de materiales, además, está estrechamente ligada a las condiciones ambientales en las que opera cada aeronave. No es lo mismo diseñar un componente para un entorno árido que para una zona costera expuesta a la salinidad y la humedad, factores que aceleran la corrosión y modifican la resistencia del material. Por ello, la elección del material no puede responder a un criterio genérico, sino al conocimiento específico del contexto operativo, de las exigencias mecánicas y de los procesos de fabricación disponibles. Desde la etapa de diseño deben considerarse los mecanismos de degradación posibles y las estrategias de protección necesarias, como recubrimientos, tratamientos térmicos o inspecciones no destructivas, que permitan mantener la integridad estructural. De esta manera, la gestión del riesgo se construye desde el origen mismo del componente y no únicamente cuando este entra en servicio, lo que garantiza una aviación más segura y eficiente.

Entre los procesos de degradación más críticos se encuentra la corrosión, fenómeno que actúa de manera lenta y silenciosa, reduciendo la sección transversal de las piezas y debilitando progresivamente su capacidad de carga. La comparación con una gangrena resulta precisa, ya que, al igual que en el cuerpo humano, el daño avanza de forma imperceptible hasta comprometer la totalidad del sistema si no se detecta y controla a tiempo. Prevenir la corrosión implica seleccionar materiales adecuados, aplicar recubrimientos protectores, controlar los ambientes operativos y establecer programas de inspección continua que permitan intervenir antes de que el daño se vuelva irreversible. En esta labor, la ciencia de materiales se erige como una disciplina médica de la ingeniería, dedicada a preservar la salud estructural de las aeronaves y, con ello, la seguridad de las operaciones aéreas.

La ciencia de materiales aplicada a la seguridad operacional refleja de manera clara la conexión entre el desempeño humano y la integridad estructural, ejes que definen el propósito central del seminario. La comprensión de los materiales, su selección adecuada y el dominio de las técnicas de caracterización representan una forma de anticipar el riesgo y de fortalecer la cultura de prevención que sustenta la aviación moderna. En este sentido, la gestión del conocimiento técnico se convierte en una herramienta de sostenibilidad, pues permite que las decisiones operacionales estén respaldadas por evidencia científica y que los procesos de mantenimiento, certificación y diseño se desarrollen bajo criterios de precisión y confiabilidad.

En conclusión, el vínculo entre la ciencia de materiales y la gestión del riesgo sintetiza el espíritu de este encuentro académico: construir una aviación más segura a partir del conocimiento, la cooperación y la investigación aplicada. Solo a través de la integración entre la academia, la industria y el Estado podrá consolidarse un modelo nacional de seguridad operacional en el que la ciencia de los materiales, los factores humanos y la innovación tecnológica trabajen de forma conjunta. Esa convergencia entre pensamiento técnico y acción humana define la ruta hacia una cultura de prevención madura, en la que cada análisis de falla y cada avance científico se traduzcan en una mejora real de la seguridad aérea y en el fortalecimiento del conocimiento nacional al servicio de la vida y la excelencia operacional.

## Integración de MOSA en el Sistema de Seguridad Operacional como aporte a la prevención



Ingeniero Aeronáutico – Universidad de San Buenaventura  
Magíster en Potencia Térmica con especialidad en Sistemas Propulsivos – Universidad de Cranfield (Reino Unido)

Asesor de Investigación, Ciencia y Tecnología – Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC)  
Escuela de Aviación del Ejército Nacional (ESAVE)  
Director del Grupo de Investigación AeroTECH

Correo electrónico: [harold.acosta@epfac.edu.co](mailto:harold.acosta@epfac.edu.co)

Ingeniero Aeronáutico y Magíster en Potencia Térmica con especialidad en sistemas propulsivos por la Universidad de Cranfield (Reino Unido). Es Investigador Asociado reconocido por MinCiencias, con experiencia en proyectos de investigación, desarrollo e innovación en las áreas de seguridad operacional, propulsión, biocombustibles y transferencia tecnológica. Se desempeña como Asesor de Ciencia y Tecnología, liderando la formulación y ejecución de proyectos de investigación aplicada, la consolidación de líneas de innovación y la articulación entre semilleros y grupos de investigación institucionales. Actualmente dirige el grupo AeroTECH de la Universidad de San Buenaventura, Bogotá, desde donde coordina proyectos orientados a la energía, la propulsión y la sostenibilidad tecnológica aeronáutica. Ha sido autor de publicaciones científicas, capítulos de libro y desarrollos tecnológicos, incluyendo la patente de invención y bancos de pruebas. También ha actuado como par evaluador de MinCiencias y asesor en la creación de programas académicos internacionales. Su labor integra la investigación aplicada, la docencia y la gestión estratégica en seguridad operacional e innovación tecnológica.

## Resumen de ponencia



El estudio de la seguridad operacional en la aviación moderna revela que la tecnología, por avanzada que sea, no puede sustituir la conciencia situacional ni el juicio humano en la toma de decisiones críticas. El análisis de los accidentes del Boeing 737 MAX 8 y MAX 9 evidenció cómo la interacción entre los sistemas automatizados y las limitaciones cognitivas de la tripulación puede desencadenar consecuencias catastróficas cuando la comunicación, el entrenamiento y la comprensión técnica fallan simultáneamente. En octubre de 2019, el accidente ocurrido en Yakarta marcó un punto de inflexión en la reflexión sobre la dependencia tecnológica en la aviación contemporánea. Dos pilotos con amplia experiencia, enfrentados a un sistema automatizado desconocido, el MCAS, lucharon durante minutos contra un software que asumió el control de la aeronave basándose en la lectura errónea de un único sensor. Lo que inició como una desviación leve del ángulo de ataque terminó en una pérdida de control total, reflejando el delicado equilibrio entre la confiabilidad de la máquina y la capacidad humana para interpretar, decidir y reaccionar bajo presión.

El incidente puso en evidencia que la automatización, concebida como un refuerzo de la seguridad, puede convertirse en un riesgo cuando la tripulación no comprende sus lógicas internas o cuando los fabricantes omiten información crítica sobre su funcionamiento. El sistema MCAS fue diseñado para corregir automáticamente el ángulo de ataque y evitar una posible pérdida, pero al depender de un solo sensor sin redundancia, el margen de error se amplió peligrosamente. El software, al interpretar una lectura falsa, asumió que la aeronave estaba en ascenso excesivo e inició descensos automáticos que los pilotos intentaron contrarrestar manualmente, generando una secuencia de compensaciones opuestas que terminó por desestabilizar el avión. Este escenario demostró que, en la era digital, la seguridad aérea no se define únicamente por la capacidad técnica de los sistemas, sino por la claridad con que se comunica su lógica a quienes los operan. La falta de conocimiento del

sistema por parte de los pilotos, unida a la ausencia de entrenamiento específico, reveló la vulnerabilidad de los procedimientos operativos ante la opacidad tecnológica.

Más allá del componente técnico, el accidente permitió examinar los factores humanos como variables determinantes en la gestión del riesgo. La falta de conciencia situacional y la sobrecarga cognitiva bajo condiciones de estrés configuraron una cadena de errores donde la respuesta humana quedó subordinada a la incertidumbre. En situaciones críticas, la mente tiende a reducir su campo de atención y prioriza tareas automáticas sobre el razonamiento estratégico; en este caso, los pilotos concentraron su energía en compensar los descensos, sin detenerse a analizar la causa raíz del comportamiento anómalo del avión.

En este contexto se enmarca el MOSA, una metodología propuesta para identificar comportamientos operativos seguros y no seguros durante las misiones aéreas. Este modelo parte del principio de que la seguridad no se evalúa únicamente por la ausencia de accidentes, sino por la capacidad de las organizaciones para detectar desviaciones antes de que generen consecuencias operativas. El MOSA permite observar en tiempo real los factores humanos asociados a la operación, registrando variables como la gestión del tiempo, la coordinación entre tripulantes, la toma de decisiones, la adherencia a los procedimientos y el manejo de la carga de trabajo. Estos datos son posteriormente analizados de forma sistemática para establecer tendencias y definir acciones preventivas.

La aplicación del MOSA busca transformar la cultura de la seguridad dentro de la FAC, fomentando un enfoque preventivo basado en la evidencia conductual. A diferencia de los modelos tradicionales centrados en la sanción o en la investigación posterior al accidente, el MOSA se orienta hacia la observación proactiva, entendiendo el error como una oportunidad de aprendizaje organizacional y fundamentándose en los principios de la cultura justa promovida por la OACI, donde los reportes voluntarios y las observaciones en vuelo no buscan señalar culpables, sino fortalecer las competencias del personal y retroalimentar los programas de formación.

Dentro del ámbito militar y civil, el MOSA o LOSA se consolida como un instrumento estratégico para la toma de decisiones en seguridad operacional, al permitir establecer indicadores cuantitativos del desempeño humano, comparar comportamientos entre tripulaciones y detectar áreas críticas de entrenamiento. Su implementación requiere observadores debidamente entrenados, capaces de registrar de forma objetiva las conductas y los factores contextuales sin introducir sesgos personales. En ese sentido, una de las principales inquietudes planteadas durante el seminario fue la necesidad de reducir la subjetividad del observador y garantizar la fiabilidad del proceso de observación. Para ello, el modelo propone la estandarización de criterios, la capacitación constante y la validación entre observadores como mecanismos que aseguran la coherencia metodológica y fortalecen la credibilidad de los resultados obtenidos.

El verdadero valor del MOSA radica en su capacidad para vincular el desempeño humano con los indicadores de seguridad operacional, creando una base de datos conductual que complementa los registros técnicos de los sistemas de monitoreo, como el Flight Data Recorder o el Quick Access Recorder. Mientras estos instrumentos recogen información mecánica y cuantificable del vuelo, el MOSA revela la dimensión humana que no se refleja

en los números, como la gestión de la presión, la interpretación de las alarmas, la comunicación entre tripulantes y la toma de decisiones bajo condiciones de estrés. De esta manera, el modelo amplía la comprensión del riesgo y fortalece la integración entre la ciencia de materiales, la ingeniería de sistemas y la psicología aeronáutica, contribuyendo a una visión verdaderamente integral de la seguridad del vuelo.

Como conclusión, la seguridad aérea es el resultado del equilibrio entre el desempeño humano y el conocimiento técnico. La automatización y la ingeniería aportan precisión y eficiencia, pero no pueden sustituir la disciplina, la comunicación y el criterio profesional de quienes operan las aeronaves. Programas como el MOSA representan un puente entre la observación y la acción preventiva, transformando la experiencia operacional en conocimiento útil y la información en cultura de seguridad. Alcanzar este nivel de madurez implica consolidar una comunidad aeronáutica consciente de que cada vuelo refleja la interacción armónica entre el saber técnico, la ética profesional y la gestión inteligente del riesgo.

### Panel de expertos

El panel de expertos Materiales, datos e inteligencia, pilares del futuro en la seguridad operacional, moderado por el ingeniero Harold Acosta León y conformado por los ingenieros Fabio Alejandro Merchán Rincón, Edgar Espejo Mora y Mauricio Sierra Cetina, representó el cierre reflexivo del evento y un punto de convergencia entre los temas desarrollados durante las jornadas anteriores. Este espacio permitió articular las visiones de la academia, la industria y el Estado en torno a los desafíos que enfrenta el país para consolidar una cultura aeronáutica basada en la autonomía tecnológica, la cooperación institucional y la gestión inteligente del conocimiento.



Los expertos coincidieron en que el verdadero reto de la ingeniería aeronáutica en Colombia no radica únicamente en la disponibilidad de materiales o en la adquisición de equipos de última generación, sino en la creación de un sistema integrado que permita diseñar, fabricar, ensayar y certificar piezas bajo estándares internacionales. La experiencia acumulada en universidades y centros de investigación demuestra que el país cuenta con el conocimiento técnico y humano necesario, pero carece de la infraestructura y la inversión suficientes para sostener procesos de validación continua. Mantener laboratorios acreditados bajo norma ISO/IEC 17025 representa costos significativos que resultan inviables para una sola institución. De ahí la necesidad de establecer clústeres tecnológicos respaldados por el Estado, capaces de unir esfuerzos y compartir recursos en torno a un propósito común: fortalecer la confiabilidad estructural y reducir la dependencia de proveedores externos.

A partir de ejemplos prácticos, los panelistas describieron situaciones en las que la ingeniería inversa se convierte en una herramienta esencial para responder a fallas o fracturas estructurales. En muchos casos, el problema no radica en la obtención del material, sino en la imposibilidad de replicar el proceso original de fabricación. Cuando los procedimientos de extrusión, mecanizado o tratamiento térmico no se encuentran disponibles, surge la necesidad de rediseñar piezas y validar nuevas rutas de producción, lo que requiere de laboratorios certificados y personal especializado en diseño asistido, simulación mediante elementos finitos y manufactura aditiva. Este proceso, más que una solución de emergencia, debe

entenderse como una estrategia de independencia tecnológica y como un paso hacia la consolidación de capacidades nacionales en ingeniería aplicada.

En este contexto, la cooperación entre universidad, industria y Estado fue presentada como un elemento indispensable. Los expertos señalaron que muchas iniciativas académicas e industriales trabajan en paralelo sin conocimiento mutuo, lo que fragmenta esfuerzos y duplica inversiones. La llamada triple hélice no puede limitarse a un discurso de colaboración, sino que debe traducirse en mecanismos reales de transferencia tecnológica, políticas de financiación sostenidas y marcos regulatorios que faciliten la homologación de componentes producidos localmente. La cooperación, más que un ideal, se plantea como un requisito operativo para avanzar hacia una aviación nacional competitiva, con procesos propios de diseño, fabricación y certificación.

El diálogo también abordó el papel de la inteligencia artificial y la transformación digital en la ingeniería aeronáutica contemporánea, destacándose que la IA no debe concebirse como un fin, sino como una herramienta al servicio del razonamiento técnico. Su aplicación puede optimizar el análisis estructural, acelerar simulaciones por elementos finitos y mejorar la gestión del mantenimiento predictivo, siempre que se utilice bajo criterios técnicos claros. Sin embargo, los panelistas advirtieron que el mayor desafío no es tecnológico, sino cultural: aún persiste resistencia en la academia para incorporar herramientas digitales, y muchos programas de ingeniería no incluyen formación en análisis de datos, machine learning o big data. En consecuencia, se requiere un cambio profundo en la enseñanza, que permita formar ingenieros capaces de combinar el rigor experimental con la interpretación inteligente de la información digital.

De esta reflexión emergió la propuesta de implementar un retrofit digital en las aeronaves, es decir, incorporar sensores y sistemas de monitoreo que permitan recolectar datos en tiempo real y construir gemelos digitales que repliquen el comportamiento estructural en operación. Esta estrategia fortalecería la capacidad predictiva del mantenimiento, anticipando fallas y permitiendo una gestión más eficiente del riesgo. Sin datos confiables no hay predicción posible, y sin predicción no puede haber una cultura de seguridad verdaderamente proactiva.

El cierre del panel sintetizó las principales lecciones del encuentro: la necesidad de consolidar una relación de confianza entre las instituciones, de fomentar la colaboración abierta y de asumir la inteligencia artificial con sentido crítico. Se destacó que el conocimiento generado por medios digitales debe ser verificado y contrastado, pues la tecnología, si se alimenta de información imprecisa, reproduce errores con apariencia de verdad. La inteligencia artificial, recordó el moderador, es una herramienta poderosa, pero no sustituye el juicio humano ni el rigor científico que sustenta la ingeniería.

En definitiva, el panel reafirmó que la seguridad operacional del futuro se construye en la integración coherente entre materiales, datos e inteligencia. Esta tríada no representa tres campos separados, sino las dimensiones de un mismo sistema que combina ciencia, tecnología y criterio profesional para garantizar la seguridad del vuelo. Colombia posee el conocimiento y el talento necesarios para avanzar hacia esa soberanía tecnológica, pero requiere confianza institucional, inversión continua y una visión compartida que convierta la investigación en innovación, y la innovación en seguridad.