

Caracterización y estudio de la prospectiva laboral del sector aeronáutico en Colombia



Angélica María Palacios Martínez, Betty Barrios Salcedo,
Mariela Inés Rodríguez Acosta, Edwin Leandro Ibáñez Orjuela
y Ana María Pineda García



Caracterización y estudio de la prospectiva laboral del sector aeronáutico en Colombia

Angélica María Palacios Martínez
Betty Barrios Salcedo
Mariela Inés Rodríguez Acosta
Edwin Leandro Ibáñez Orjuela
Ana María Pineda García

Catalogación en la publicación – Universidad Católica de Oriente

Caracterización y estudio de la prospectiva laboral del sector aeronáutico en Colombia/ Angélica María Palacios Martínez... (y otros 4). -- Rionegro (Antioquia): Fondo Editorial Universidad Católica de Oriente, 2025.

104 páginas: imágenes, tablas, gráficos, 24 cm.

ISBN 978-628-7767-37-9

eISBN 978-628-7767-38-6

Referencias bibliográficas página 101.

1.Mercado laboral colombiano -- Colombia 2.Industria aeronáutica -- Colombia 3.Economía laboral y demográfica -- Colombia i.Palacios Martínez, Angélica María (autora) ii.Barrios Salcedo, Betty (autora) iii.Pineda García, Ana María (autora) iv.Rodríguez Acosta, Mariela Inés (autora) v.Ibáñez Orjuela, Leandro (autor) xxiii. Universidad Católica de Oriente.

SCDD 338.4762913334

Archivo descargable en formato MARC en: <https://tinyurl.com/uco0080>



Caracterización y estudio de la prospectiva laboral del sector aeronáutico en Colombia

Primera edición: diciembre de 2025

© Angélica María Palacios Martínez

© Betty Barrios Salcedo

© Mariela Inés Rodríguez Acosta

© Edwin Leandro Ibáñez Orjuela

© Ana María Pineda García

© Fondo Editorial Universidad Católica de Oriente

Sector 3, Carrera 46 n.o 40B-50

054040 Rionegro (Antioquia)

fondo.editorial@uco.edu.co

ISBN (Versión impresa): 978-628-7767-37-9

ISBN (Versión digital): 978-628-7767-38-6

DOI: <https://doi.org/10.47286/9786287767386>

Revisión de textos: Christian Alexander Martínez Guerrero

Diseño y diagramación: Ana Milena Gómez Correa

Diseño de portada: Fondo Editorial Universidad Católica de Oriente

Colaboradores: Harold Fabián Zanguña Vargas,
Paola Andrea Quiñones Bocanegra, Jorge Andrés Bedoya Ojeda

Fotografías portada: Tomadas de Pixabay y Freepik



Se permite la reproducción del libro o de sus contenidos, siempre y cuando se dé el debido crédito a los autores y a la Universidad Católica de Oriente.

Editado en Rionegro, Colombia.

Contenido

Introducción	9
Antecedentes.....	11
Aspectos generales del sector aeronáutico	13
Análisis de prospectiva laboral	17
Tendencias del subsector construcción, conservación de aeronaves y partes (CCAYP).....	19
Tendencias desde fuentes secundarias	19
Análisis IMI a partir de fuentes primarias.....	26
Análisis y conclusiones de impacto en las ocupaciones según la materialización de las tendencias	33
Tendencias del subsector servicios a la navegación aérea (SNA)	35
Tendencias desde fuentes secundarias	35
Análisis IMI de tendencias desde fuentes primarias.....	41
Análisis y conclusiones de impacto ocupación según la materialización de tendencias	50
Tendencias del subsector operaciones aeroportuarias (OA).....	51
Tendencias por fuentes secundarias	51
Análisis IMI	62
Análisis y conclusiones de impacto ocupacional según la materialización de las tendencias	78
Tendencias del subsector seguridad de la aviación civil (AVSEC).....	83
Tendencias desde fuentes secundarias	83
Análisis IMI	92
Análisis y conclusiones de impacto ocupación según la materialización de tendencias	97
Conclusiones	99
Referencias	101
Lista de siglas.....	103
Información de autores.....	104

Lista de tablas

Tabla 1.	Subsectores del sector aeronáutico	14
Tabla 2.	Tendencias en el subsector CCAYP	21
Tabla 3.	Clasificación de las tendencias	32
Tabla 4.	Cargos impactados por las tendencias CCAYP	33
Tabla 5.	Tendencias del subsector SNA.....	36
Tabla 6.	Tendencias del subsector SNA.....	42
Tabla 7.	Clasificación de las tendencias del subsector SNA.....	44
Tabla 8.	Conclusiones impacto según materialización del subsector SNA	50
Tabla 9.	Tendencias subsector operaciones aeroportuarias.....	63
Tabla 10.	Materialización de las tendencias subsector OA	69
Tabla 11.	Cargos impactados por las tendencias subsector OA	78
Tabla 12.	Tendencias subsector AVSEC.....	92
Tabla 13.	Tendencias clasificadas subsector AVSEC	94
Tabla 14.	Materialización de las tendencias AVSEC.....	94

Lista de ilustraciones

Ilustración 1.	Escala de valores instrumento IMI	19
Ilustración 2.	Metodología de validación de las tendencias	19
Ilustración 3.	Cargos de los actores CCAYP	26
Ilustración 4.	Materialización de tendencias específicas del subsector CCAYP	28
Ilustración 5.	Análisis de tendencias IMI	43
Ilustración 6.	Resultados del cruce de variables SNA	44
Ilustración 7.	Clasificación de las tendencias del subsector OA.....	64
Ilustración 8.	Tendencias categorizadas en el subsector OA.....	69
Ilustración 9.	Matriz de clasificación IMI del subsector AVSEC.....	93
Ilustración 10.	Categorización de las tendencias subsector AVSEC.....	95

Introducción

La aviación civil mundial enfrenta un escenario de transformación acelerada, impulsado por la convergencia de innovaciones tecnológicas, exigencias regulatorias y compromisos ambientales que redefinen los procesos operativos y organizacionales. En este contexto, anticipar los cambios en las dinámicas laborales se convierte en un imperativo estratégico para garantizar la sostenibilidad y competitividad del sector. Bajo los lineamientos del *Plan Estratégico Aeronáutico 2030*, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC, 2023), a través del Centro de Estudios Aeronáuticos (CEA), desarrolló un análisis prospectivo orientado a identificar tendencias críticas y su impacto en los perfiles ocupacionales.

El estudio se focalizó en los subsectores de Construcción y Conservación de Aeronaves y Partes, Servicios a la Navegación Aérea, Operaciones Aeroportuarias y Seguridad de la Aviación Civil, integrando metodologías mixtas que combinaron revisión documental, análisis de fuentes secundarias y ejercicios participativos con expertos sectoriales. Este enfoque permitió caracterizar tendencias organizacionales (digitalización de procesos, gestión por competencias, seguridad operacional basada en datos), ambientales (eficiencia energética, reducción de emisiones, economía circular) y tecnológicas (automatización, mantenimiento predictivo, sistemas CNS/ATM (comunicaciones, navegación, vigilancia y gestión del tráfico aéreo), inteligencia artificial aplicada a operaciones y seguridad).

Los resultados incluyen mapas de tendencias, matrices de impacto por subsector y un inventario de cargos estratégicos susceptibles de reconversión funcional en horizontes de corto, mediano y largo plazo. Asimismo, se identifican brechas de capacidades asociadas a competencias digitales, analítica de datos, sostenibilidad y cultura de seguridad. La estructura del documento responde a la lógica del análisis prospectivo, organizada en secciones que abordan la caracterización de tendencias, la identificación de impactos sobre perfiles ocupacionales y la definición de escenarios de transformación laboral.

Antecedentes

Caracterizar las transformaciones del sector aeronáutico, teniendo en cuenta los múltiples subsectores y las ocupaciones derivadas de cada uno de ellos, es una tarea fundamental, y más aún cuando nos encontramos inmersos en una fase de transformación sin precedentes, marcada por la confluencia de innovaciones tecnológicas disruptivas, una regulación cada vez más exigente y el compromiso ineludible con la sostenibilidad ambiental. Esta dinámica impone una exigencia estratégica a toda la industria: la anticipación de los cambios en las dinámicas laborales. Impulsado por esta visión y alineado con los principios del *Plan Estratégico Aeronáutico 2030*, el CEA de la UAEAC desarrolló este análisis prospectivo con el fin primordial de anticipar y analizar las tendencias organizacionales, tecnológicas y ambientales del sector aeronáutico civil en Colombia para proyectar su impacto en los perfiles ocupacionales y en la gestión estratégica del talento humano. Este esfuerzo es crucial, ya que la disponibilidad de un talento humano suficiente, calificado y alineado es el motor clave del desarrollo económico y la competitividad regional.

El alcance del estudio se focalizó en cuatro subsectores críticos: construcción y conservación de aeronaves y partes, servicios a la navegación aérea, operaciones aeroportuarias, y seguridad de la aviación civil. Para lograr una caracterización profunda de los desafíos futuros, se adoptó una metodología mixta que combinó una exhaustiva revisión documental y un análisis de fuentes secundarias con ejercicios participativos de expertos, incluyendo el análisis IMI (impacto, madurez, incidencia) en cada subsector. Esta aproximación permitió desglosar tendencias específicas como la digitalización de procesos, la gestión por competencias basada en datos, el mantenimiento predictivo, la adopción de sistemas CNS/ATM y la integración de la inteligencia artificial en la seguridad y las operaciones.

El objetivo de reconocer y medir la transformación inminente se fundamenta en la necesidad de evitar lo que en el ámbito laboral se denominan brechas de capital humano. Estas brechas surgen cuando las organizaciones no pueden encontrar personal con las competencias adecuadas en el mercado, y esto genera obstáculos significativos para la productividad y competitividad. En el sector aeronáutico, dadas su alta especialización y criticidad en la seguridad operacional, la identificación y cierre de estas fallas es vital.

En consecuencia, el propósito central del presente estudio no es solo mapear el presente, sino analizar en detalle las tendencias (organizacionales, tecnológicas y verdes) de cada subsector para reconocer su impacto e incidencia directa en la gestión del talento humano. Se buscó también definir los mapas de tendencias y las matrices de impacto sobre los perfiles ocupacionales estratégicos para sentar las bases informativas que permitan una gestión proactiva de las brechas de capacidades identificadas. Esto incluye un enfoque específico en la reconversión funcional de cargos clave en áreas como seguridad operacional, gestión aeroportuaria e inspección técnica. Además, se disponen de mapas de tendencias detallados y matrices de impacto específicas para cada subsector, proporcionando un inventario claro de los cargos estratégicos que serán susceptibles de reconversión funcional en horizontes de corto, mediano y largo plazo. Las principales brechas de capacidades identificadas se concentran en las competencias digitales avanzadas, la analítica de datos aplicada a la operación y la gestión de la sostenibilidad.

La estructura final del documento se organiza en torno a la lógica del análisis prospectivo, abordando la caracterización de las tendencias, la cuantificación de sus impactos en los perfiles y, finalmente, la definición de escenarios de transformación laboral, proveyendo al sector una herramienta esencial para la planeación estratégica de su recurso humano.

Aspectos generales del sector aeronáutico

El sector aeronáutico en Colombia se encuentra en una fase de consolidación estratégica orientada hacia el año 2030, impulsada por la recuperación del tráfico aéreo pospandemia y el posicionamiento del país como un *hub* regional. De acuerdo con el Plan Estratégico Aeronáutico 2030, la industria ha adoptado una hoja de ruta que prioriza no solo la infraestructura física, sino el “desarrollo del talento humano en el sector” como un objetivo estratégico transversal (UAEAC, 2023). Las proyecciones para el cierre de 2025 sugieren un entorno de crecimiento moderado pero sostenido, donde la seguridad operacional y la gestión eficiente del espacio aéreo demandan perfiles con altas capacidades de resiliencia y adaptación al cambio normativo, superando la visión tradicional operativa para integrar competencias de gestión estratégica (Revista InterXtra Aviación, 2025). Esta prospectiva indica que la estabilidad laboral del sector dependerá de la capacidad de adaptación del talento humano a nuevos modelos de sostenibilidad y digitalización.

En este contexto, documentos técnicos como el *Plan de Navegación Aérea para Colombia* (Aerocivil, 2020a) y los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC) sobre servicios meteorológicos y de información aeronáutica (Aerocivil, 2020b; Aerocivil, 2020c) establecen lineamientos para la modernización de los sistemas CNS/ATM y la digitalización de procesos críticos. Asimismo, la implementación de tecnologías como ADS-B (Aerocivil, 2022d) y la actualización de los servicios de tránsito aéreo y comunicaciones (Aerocivil, 2021b; Aerocivil, 2021c; Aerocivil, 2023) reflejan la necesidad de perfiles con competencias en interoperabilidad, análisis de datos y gestión de información aeronáutica. Estas tendencias, alineadas con estándares internacionales (Autoridades de Aviación Civil de la Región SAM, 2015; 2017), consolidan la importancia de la formación especializada y la certificación de competencias para garantizar la eficiencia y seguridad operacional en el marco de la Industria 4.0.

La tabla 1 presenta los subsectores aeronáuticos, así como una breves descripción de ellos.

Tabla 1. Subsectores del sector aeronáutico

Subsector	Descripción
<p>Autoridad aeronáutica -Regulación, inspección y certificación UAEAC</p>	<p>La autoridad aeronáutica en el estado colombiano (UAEAC) cuenta con la gobernabilidad para ejercer sus responsabilidades como institución de reglamentación, certificación, vigilancia y sanción, así como autoridad de investigación de accidentes, otorgada por la legislación colombiana para cumplir sus deberes de acuerdo con lo dispuesto en la Constitución Política, que establece “para proteger a todas las personas residentes en Colombia, en su vida, honra, bienes, creencias y demás derechos y libertades, y para asegurar el cumplimiento de los deberes sociales del Estado y de los particulares”.</p>
<p>Explotadores de servicios aéreos</p>	<p>Conforme a los RAC, parte 119, el explotador (de aeronave) es una persona natural o jurídica que opera una aeronave a título de propiedad, o en virtud de un contrato de utilización (diferente del fletamento), mediante el cual se le ha transferido legítimamente dicha calidad, figurando en uno u otro caso en el correspondiente registro aeronáutico. Se trata de una persona, organismo o empresa que se dedica o propone dedicarse a la explotación de aeronaves. De acuerdo con la ley y los reglamentos, el explotador tiene a su cargo el control técnico y operacional sobre la aeronave y su tripulación, incluyendo la conservación de su aeronavegabilidad y la dirección de sus operaciones, y es el responsable por tales operaciones y por los daños y perjuicios que llegaren a derivarse de las mismas.</p> <p>Este subsector clasifica las actividades aéreas civiles de la siguiente manera:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Operación de transporte aéreo comercial (regular, no regular y especial) 2. Operación de la aviación general (aviación deportiva, experimental, privada de Estado, instrucción de vuelo, sistema de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS).
<p>Construcción y conservación de aeronaves y partes (CCAYP)</p>	<p>Este subsector comprende dos campos relacionados con la industria aeronáutica: el primero corresponde a la fabricación de aeronaves, componentes y partes, mientras que, el segundo, al mantenimiento aeronáutico (predictivo, correctivo, proactivo). Los dos hacen parte de la cadena de valor mundial. que según la Asociación Colombiana de Productores Aeroespaciales (2018) se divide de la siguiente manera:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Aeronaves y sus partes. 2. Motores de aeronaves y sus partes. 3. Sistemas eléctrico-electrónicos y aviónica. 4. Mantenimiento, reparación y supervisión (MRO), simuladores y entrenamiento. 5. Espacial, misiles, armamento y otros.

Subsector	Descripción
Servicios aeroportuarios especializados de apoyo terrestre a la operación de aeronaves	<p>Conforme a la caracterización del sector de aviación civil (2020) que referencia a los documentos 9137 y 9734 de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), los servicios aeroportuarios comprenden: servicio de salvamento y extinción de incendios (SEI), control y reducción de peligro por fauna silvestre, limitación de obstáculos, planes de emergencia, traslado de aeronaves inutilizadas, gestión área de movimiento (<i>follow-me</i>, prevención FOD, operaciones de vehículos..), dirección en plataforma, servicios de aeronave en tierra (combustible, <i>handling</i>, mantenimiento menores aeronave..), supervisión terminal, servicio médico, gestión ambiental (aire, suelo, agua, basuras..), seguridad de la aviación civil (AVSEC), facilitación (FAL), ayudas visuales, sistemas eléctricos, pista/plataforma/calles de rodaje, edificaciones.</p>
Servicios a la navegación aérea (SNA)	<p>El CEA (2020) menciona que los servicios a la navegación aérea se prestan a las aeronaves para que vuelen de manera eficiente y segura de un destino a otro. Se busca prevenir colisiones entre aeronaves, velar por la maniobrabilidad que debe tener una aeronave para evitar obstáculos en las fases críticas del vuelo (despegue y aterrizaje), mantener flujo aéreo ordenado, sostener una comunicación clara y precisa entre las aeronaves y los controladores aéreos, tener control de la aeronave tanto en tierra como en aire respecto a los estándares de navegación, envío de los informes meteorológicos METAR (reporte meteorológico de aeródromo) a las aeronaves y la gestión de todo el tráfico aéreo considerando la separación vertical y horizontal entre aeronaves.</p> <p>Por otra parte, los documentos 9161 y 9734 de la OACI establecen que los servicios a la navegación aérea son los siguientes: gestión del tránsito aéreo (ATM), gestión de la información aeronáutica (AIM), servicio meteorología aeronáutica (MET), servicio de búsqueda y salvamento (SAR) y la infraestructura para los sistemas de comunicaciones, navegación, vigilancia, automatización, meteorológicos y de energía (CNS) que soportan la operación.</p>

Fuente: elaboración propia, a partir de la caracterización del sector y la normatividad OACI.

Análisis de prospectiva laboral

La constante evolución tecnológica y los cambios ambientales presentan retos significativos y oportunidades para el sector aeronáutico que impactan tanto sus operaciones como la demanda de nuevas habilidades y perfiles profesionales. En este escenario, el ejercicio de prospectiva se constituye en una herramienta estratégica indispensable para anticipar el futuro laboral y tecnológico del sector, apoyándose en metodologías robustas como Delphi y en marcos de formación basada en competencias (CBTA) recomendados por OACI (Beiderbeck et al., 2021; OACI, 2018a; OACI, 2018b).

Un análisis detallado de tendencias tecnológicas, organizacionales y ambientales permite identificar innovaciones emergentes —como la automatización, la inteligencia artificial, los gemelos digitales y las prácticas sostenibles— que transformarán procesos, seguridad y eficiencia en la aviación (Ahmed, 2025; Amthiou et al., 2023; Fang, 2024). Revisiones recientes muestran la adopción acelerada de la inteligencia artificial en operaciones y factores humanos, así como la expansión de gemelos digitales e internet de las cosas para mantenimiento predictivo; en paralelo, la literatura sobre sostenibilidad enfatiza la optimización operacional en tierra y vuelo para reducir emisiones y mejorar la resiliencia de los sistemas aeroportuarios y de navegación aérea (Calvet, 2024; S&P Global, 2025; World Economic Forum, 2025). Asimismo, informes sectoriales de la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) y de la Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques (SITA) evidencian que la agenda de descarbonización y la adopción de SAF exigen nuevas competencias en analítica, interoperabilidad y gobernanza tecnológica para sostener el crecimiento previsto del tráfico aéreo y mantener la seguridad operacional (IATA, 2024; SITA, 2024).

De esta manera, el ejercicio de prospectiva no solo guía el desarrollo del sector en un mundo en constante cambio, sino que también fortalece su capacidad de resiliencia y adaptación, garantizando una fuerza laboral alineada con las demandas y oportunidades del futuro. Metodológicamente, la prospectiva apoya la anticipación estratégica mediante fases de identificación de tendencias, construcción de escenarios, validación experta y traducción en decisiones curriculares y de política pública. Al respecto, algunas guías actuales recomiendan el uso de Delphi iterativo, análisis de disenso, escenarios y CBTA para cerrar brechas de desempeño (Beiderbeck et al., 2021; Ziakkas et al., 2023; OACI, 2025).

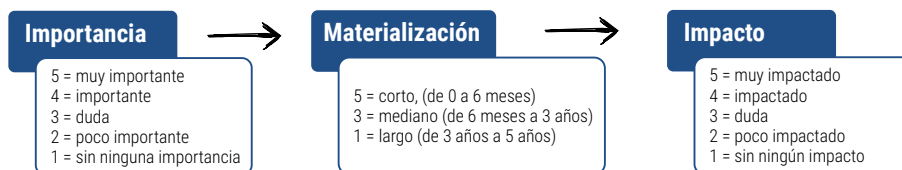
En este contexto, se establecieron cuatro fases para realizar el análisis de prospectiva laboral en el sector aeronáutico, tomando como base el estudio de tendencias en los ámbitos tecnológicos y organizacionales. La primera consiste en identificar las tendencias relevantes para cada subsector objeto de estudio: aquí, se consideran tanto megatendencias como tendencias específicas, analizadas a partir de fuentes secundarias y estudios prospectivos del sector, junto con evidencia técnicoeconómica sobre digitalización, eficiencia y sostenibilidad (IATA, 2024; SITA, 2024). Además, se analiza el futuro de la demanda laboral, con especial enfoque en competencias y habilidades necesarias para responder eficazmente, en línea con propuestas de actualización de marcos de competencia ante la irrupción de inteligencia artificial y nuevas tecnologías (OACI, 2025; European Union Aviation Safety Agency [EASA], 2023).

En la segunda fase se reconocen las organizaciones, instituciones y entidades de cada subsector, así como personas con rol, conocimiento y experiencia pertinentes para participar en ejercicios de prospectiva (paneles Delphi y validaciones CBTA). La literatura metodológica recomienda criterios de selección multicriterio y anonimato controlado, y sugiere incorporar especialistas en operación, mantenimiento, seguridad, factores humanos, meteorología y comunicaciones, garantizando heterogeneidad y calidad del juicio experto (Beiderbeck et al., 2021).

En la tercera fase se llevó a cabo un encuentro con los actores clave mediante un ejercicio de grupo focal, con el objetivo de analizar la prospectiva laboral en el sector aeronáutico. Durante esta actividad, se utilizó el instrumento de valoración IMI, diseñado para evaluar tres variables de las tendencias: a) importancia, b) materialización e c) impacto suministrado por el Ministerio de Trabajo. Para cada una de estas variables, se definió una escala de valores que se ilustra en la ilustración 1.

La cuarta fase se centró en el análisis de tendencias, considerando su importancia, su impacto en el capital humano y su grado de materialización en el tiempo. Este se basa en los resultados obtenidos durante los grupos focales de validación y priorización de tendencias con expertos de cada subsector. Para ello, se consolidan los datos del instrumento IMI desde una perspectiva cuantitativa, que luego se complementan con un análisis cualitativo.

Ilustración 1. Escala de valores instrumento IMI



Fuente: elaboración propia, a partir de lo establecido por el Ministerio del Trabajo (2023).

Ilustración 2. Metodología de validación de las tendencias



Fuente: elaboración propia.

Tendencias del subsector construcción, conservación de aeronaves y partes (CCAYP)

Tendencias desde fuentes secundarias

El subsector de CCAYP está experimentando una transformación acelerada, impulsada por la incorporación de tecnologías emergentes y la necesidad de cumplir con estándares internacionales de sostenibilidad. Este subsector, considerado uno de los más críticos dentro de la cadena de valor aeronáutica, abarca procesos altamente especializados que incluyen diseño, fabricación, ensamblaje, mantenimiento y reparación de aeronaves y sus componentes. La evolución tecnológica y la presión por reducir el impacto ambiental han generado cambios sustanciales en la forma en que se desarrollan estas actividades, obligando a las organizaciones a adoptar nuevos modelos de producción y gestión.

En el ámbito tecnológico, la digitalización se ha convertido en un eje central para la optimización de procesos en la construcción y mantenimiento de aeronaves. El uso de *big data* y de sistemas de análisis predictivo permite anticipar fallas

y programar mantenimientos preventivos, reduciendo tiempos de inactividad y costos operativos. La fabricación aditiva (impresión 3D) se posiciona como una herramienta clave para producir piezas aeronáuticas con materiales avanzados que disminuyen los desperdicios y aceleran los ciclos de producción. Asimismo, la realidad aumentada y virtual se emplea para la capacitación del personal técnico y la simulación de procedimientos complejos, mejorando la precisión y reduciendo riesgos. Tecnologías como el internet de las cosas facilitan la integración de sensores en componentes críticos, permitiendo monitorear en tiempo real su estado y garantizar la trazabilidad. Incluso el *blockchain* comienza a aplicarse para certificar la autenticidad de piezas y asegurar la transparencia en la cadena de suministro.

Desde la perspectiva organizacional, las empresas del subsector están adoptando modelos de gestión más ágiles y colaborativos para responder a los retos tecnológicos y regulatorios. La transformación digital empresarial implica la integración de plataformas que conectan diseño, producción y mantenimiento, mejorando la eficiencia y reduciendo errores humanos. Se observa un incremento en la economía colaborativa, con alianzas estratégicas entre fabricantes, aerolíneas y centros de mantenimiento para compartir recursos y conocimiento especializado. La gestión del talento humano adquiere un papel protagónico, dado que se requieren perfiles con competencias digitales, conocimientos en materiales avanzados y habilidades para operar tecnologías disruptivas. Esto ha impulsado la creación de programas de formación continua y certificaciones internacionales que garanticen la actualización permanente del personal técnico.

En síntesis, el subsector de CCAYP se encuentra en un proceso de transformación que exige adaptación rápida por parte de las organizaciones y del talento humano. La incorporación de tecnologías avanzadas, la digitalización de procesos y la adopción de prácticas sostenibles redefinen los perfiles profesionales requeridos, incrementando la demanda de ingenieros especializados en materiales compuestos, expertos en mantenimiento predictivo y técnicos capacitados en herramientas digitales. Este escenario plantea un desafío para la oferta educativa, que debe actualizar sus programas para garantizar la pertinencia y calidad de la formación, evitando que se amplíen las brechas de capital humano. La articulación entre el sistema educativo y el sector productivo se convierte en una condición indispensable para enfrentar los retos y asegurar competitividad, sostenibilidad y capacidad de innovación en el contexto global.

Tabla 2. Tendencias en el subsector CCAYP

Tendencia	Descripción	Impacto
Tendencias tecnológicas		
Blockchain para la trazabilidad completa de partes y mantenimiento	El uso de <i>blockchain</i> en el sector aeronáutico está revolucionando la trazabilidad y seguridad de los componentes de las aeronaves. La tecnología de encriptación de la información a través de cadenas de bloques permite registrar de manera inmutable el ciclo de vida de cada pieza, desde su fabricación hasta su mantenimiento y reemplazo. Esto no solo facilita la autenticidad de las piezas y componentes, sino que también permite llevar un registro detallado y verificable en cada etapa del mantenimiento.	El <i>blockchain</i> mejora la transparencia y confiabilidad en la gestión de piezas, asegurando que cada componente cumpla con los estándares de seguridad y sea genuino. Las aerolíneas y empresas de mantenimiento pueden reducir los tiempos de inspección y simplificar el acceso al historial de cada pieza que reduce el riesgo de partes falsificadas y aumenta la seguridad general de las operaciones.
Mantenimiento predictivo y monitoreo estructural con internet de las cosas	La tecnología de internet de las cosas se ha convertido en una herramienta clave en la evolución hacia mayores niveles de mantenimiento predictivo de aeronaves, es decir, para predecir posibles fallas y gestionar sus soluciones. Mediante la instalación de sensores en componentes críticos, como motores, trenes de aterrizaje y estructuras, se recopilan datos en tiempo real sobre diversas variables, como el rendimiento y el desgaste de las piezas. Estos datos se analizan para predecir posibles fallos y planificar intervenciones preventivas, lo cual optimiza la disponibilidad y fiabilidad de las aeronaves.	El mantenimiento predictivo permite una reducción significativa en el tiempo de inactividad no planificado de las aeronaves. Además, optimiza los inventarios de repuestos al enfocarse en componentes específicos que realmente requieren atención, reduciendo los costos y mejorando la seguridad operativa al detectar problemas antes de que se vuelvan críticos.
Gemelos digitales para simulación y mantenimiento proactivo	Los gemelos digitales crean réplicas virtuales de aeronaves y sus componentes que permiten realizar simulaciones y análisis detallados de su funcionamiento en distintas condiciones. Este modelo digital se alimenta de datos reales obtenidos a través de internet de las cosas y <i>blockchain</i> , y facilita la simulación de escenarios de desgaste y el diseño de planes de mantenimiento proactivo.	La utilización de gemelos digitales optimiza el mantenimiento al anticipar problemas y facilitar la planificación de intervenciones. Además, reduce los costos asociados con pruebas físicas y permite ajustar detalles de diseño y mantenimiento sin necesidad de aplicar cambios directamente en la aeronave, mejorando la eficiencia y seguridad.

Tendencia	Descripción	Impacto
Automatización y robótica en inspecciones	El empleo de drones y robots para la inspección de aeronaves permite realizar evaluaciones de precisión en menos tiempo y con mayor consistencia. Los drones realizan inspecciones externas, mientras que robots especializados pueden examinar componentes internos, como los motores, en busca de signos de desgaste o daños.	La robótica reduce considerablemente el tiempo y costo de las inspecciones, además de mejorar la precisión en la detección de fallos. Al minimizar el margen de error humano, aumenta la confiabilidad de los procesos de inspección, lo cual redundará en una mayor seguridad y disponibilidad de la flota.
Fabricación aditiva (impresión 3d) para producción de repuestos	La fabricación aditiva o impresión 3D permite la creación de piezas complejas y personalizadas de forma rápida, lo cual resulta particularmente útil para componentes de difícil obtención o específicos de modelos antiguos. La impresión 3D no solo reduce los tiempos de espera para repuestos, sino que permite fabricar piezas ligeras y optimizadas que mejoran la eficiencia del combustible.	La fabricación aditiva permite una respuesta rápida en la producción de repuestos, optimiza la gestión de inventarios y reduce los costos de almacenamiento. Esta tecnología también fomenta una mayor personalización y adaptabilidad en el diseño de componentes aeronáuticos
Automatización inteligente y blockchain en la cadena de suministro	La combinación de automatización y <i>blockchain</i> permite mejorar la integración y visibilidad de datos a lo largo de toda la cadena de suministro aeronáutica, facilitando la trazabilidad y eficiencia en el flujo de componentes y equipos.	-
Monitorización de estructuras mediante sensores avanzados	La utilización de sensores de evaluación no destructiva (NDE) permite monitorear grandes áreas de estructuras en aeronaves para detectar fallas antes de que se conviertan en problemas graves. Esto se realiza a través de tecnologías como fibra óptica, ultrasonidos y emisión acústica pasiva, mejorando la seguridad y reduciendo costos.	-
Materiales inteligentes y adaptativos	El desarrollo de materiales que cambian sus propiedades en respuesta a estímulos externos, como temperatura o presión, permite a las aeronaves adaptarse automáticamente a diferentes condiciones ambientales, mejorando la seguridad y eficiencia operativa.	-

Tendencia	Descripción	Impacto
Aleaciones reciclables de titanio y magnesio	Las nuevas aleaciones de titanio y magnesio, reciclables y resistentes, se están utilizando en la fabricación de componentes aeronáuticos para reducir el impacto ambiental y mejorar la durabilidad y resistencia de las aeronaves.	-
Tendencias organizacionales		
Certificación y credenciales digitales del personal de mantenimiento	El <i>blockchain</i> se utiliza para almacenar de manera segura las credenciales y certificaciones del personal de mantenimiento, proporcionando un historial detallado de las capacitaciones y autorizaciones que cada técnico posee. Esto asegura que las personas que harán una intervención a un componente cuenten con las habilidades y conocimientos necesarios para realizar tareas específicas.	La certificación digital mejora la seguridad operativa y facilita el control de calidad en el mantenimiento. Permite una trazabilidad de las habilidades y experiencia del personal, asegurando que cada tarea sea realizada por técnicos calificados, lo cual reduce los errores y aumenta la confiabilidad.
Colaboración en ecosistema de cadena de suministro y mantenimiento	El <i>blockchain</i> y las plataformas digitales promueven un ecosistema de colaboración en el que fabricantes, proveedores y operadores de mantenimiento pueden compartir datos sobre las piezas y reparaciones. Esta colaboración asegura una mayor transparencia en la cadena de suministro, lo cual reduce los riesgos de utilizar componentes falsificados y mejora la disponibilidad de piezas. Además, la colaboración facilita la gestión de inventarios, ya que las partes involucradas tienen acceso a información precisa y en tiempo real sobre la disponibilidad y calidad de los componentes.	-
Estandarización de protocolos y prácticas para <i>blockchain</i>	La adopción efectiva de <i>blockchain</i> en la industria aeronáutica requiere estándares y protocolos comunes que aseguren la interoperabilidad entre fabricantes, operadores y reguladores. Estos estándares permiten que todos los actores utilicen un sistema de registro unificado, facilitando la integración de la tecnología en procesos de mantenimiento y suministro.	La estandarización asegura la consistencia y confiabilidad de los datos a lo largo del ciclo de vida de la aeronave, lo cual contribuye a la seguridad y eficacia en las operaciones de mantenimiento y diseño, y facilita el cumplimiento con normativas de la industria.

Tendencia	Descripción	Impacto
Optimización del ciclo de vida en <i>leasing</i> y financiación de aeronaves	El <i>blockchain</i> permite el seguimiento detallado de las aeronaves durante su <i>leasing</i> , lo cual optimiza la transferencia de propiedad y simplifica los procesos de auditoría al final del contrato. Al almacenar un historial completo y verificable, se facilita la administración de la aeronave y se asegura su valor residual.	La transparencia en el <i>leasing</i> y la financiación de aeronaves proporciona beneficios para propietarios y operadores, permitiendo un mantenimiento optimizado y aumentando la vida útil y el valor residual de las aeronaves en el mercado secundario.
Descentralización de la producción y asociaciones en I+D	Las empresas del sector están diversificando sus actividades productivas y estableciendo asociaciones estratégicas para compartir riesgos en investigación y desarrollo, fortaleciendo el ecosistema de innovación	-
Tendencias ambientales		
Descarbonización y ecodiseño de aeronaves y partes	El diseño de aeronaves está enfocado en la sostenibilidad a través de materiales ligeros y configuraciones aerodinámicas que mejoran la eficiencia de combustible y reducen las emisiones de carbono. Estos diseños incluyen sistemas de propulsión híbridos o eléctricos y el uso de fuentes de energía renovables	El ecodiseño reduce el impacto ambiental de las aeronaves, contribuyendo a los objetivos de neutralidad climática y mejorando la competitividad al cumplir con regulaciones de emisiones y sostenibilidad.
Propulsión con energías limpias y sostenibles	Se están explorando fuentes de energía alternativas, como el hidrógeno y los sistemas híbridos, para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. La adopción de hidrógeno es particularmente relevante para vuelos de largo alcance, ya que representa una solución viable y sostenible.	La transición a energías limpias aporta a la reducción de la huella de carbono de la aviación, alineándose con los compromisos de sostenibilidad de la industria. Además, fomenta la aceptación pública de los vuelos sostenibles y ayuda a cumplir con los objetivos de descarbonización para 2050.
Circularidad en la fabricación y el ciclo de vida de componentes	El uso de materiales reciclables y la fabricación aditiva apoyan un enfoque de circularidad en la industria, permitiendo la reutilización y reciclaje de componentes al final de su vida útil. Esto reduce el desperdicio y promueve la economía circular.	La circularidad en la fabricación minimiza el impacto ambiental de la industria, reduce desechos y promueve una cadena de suministro sostenible. También optimiza los costos de fabricación y contribuye a una industria más responsable y resiliente.

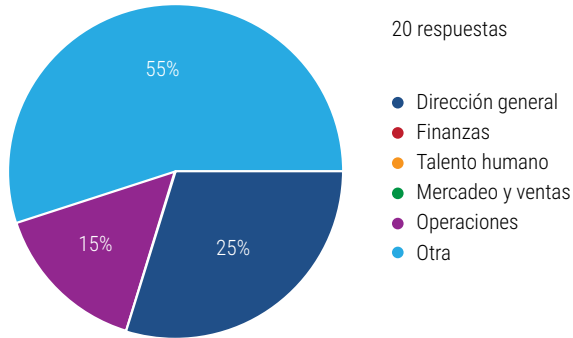
Tendencia	Descripción	Impacto
Implementación de infraestructura verde en aeropuertos	Los aeropuertos están adoptando infraestructuras sostenibles, como estaciones de carga para aeronaves eléctricas y <i>hubs</i> de hidrógeno. Estos cambios permiten abastecer aeronaves con energías limpias, apoyando la transición a una aviación sostenible	La infraestructura verde en aeropuertos es clave para reducir la huella de carbono de las operaciones en tierra y permite el desarrollo de aeronaves con tecnologías alternativas, asegurando un ecosistema más sostenible y seguro en la aviación.
Descarbonización mediante hidrógeno y combustibles sostenibles	La reducción de emisiones es una prioridad para la industria que está explorando el uso de hidrógeno y combustibles de aviación sostenibles (SAF) para alcanzar la neutralidad de carbono en 2050.	Las aeronaves que utilizan hidrógeno pueden reducir drásticamente las emisiones de carbono y mejorar la sostenibilidad en la aviación comercial. También representan una oportunidad para innovar en el diseño de estructuras que maximicen la eficiencia aerodinámica y minimicen el consumo de energía.
Uso de materiales compuestos avanzados para reducir peso y emisiones	La adopción de materiales compuestos avanzados ayuda a reducir el peso de las aeronaves, mejorando la eficiencia del combustible y disminuyendo las emisiones de CO ₂ .	Los materiales avanzados contribuyen a reducir el peso de las aeronaves, optimizando el consumo de combustible y la eficiencia general. Además, la multifuncionalidad de estos materiales permite diseños más compactos y eficientes.

Fuente: elaboración propia.

Análisis IMI a partir de fuentes primarias

A continuación, se presentan los resultados del proceso de validación de tendencias del subsector de CCAYP llevada a cabo en ejercicios de grupos focales con actores clave del sector: representantes de organizaciones de mantenimiento y talleres reparadores, académicos, asesores de empresas de diseño, entre otros. Con ellos se analizó la IMI de las tendencias.

Ilustración 3. Cargos de los actores CCAYP



Fuente: elaboración propia.

De manera particular se dio la participación de:

- Instrucción y entrenamiento.
- Fabricación de partes.
- Fabricación de aeronaves no tripuladas.
- Aseguramiento de la calidad.
- Logística.
- Especialista SMS.

Análisis de importancia de las tendencias

Como se presentó anteriormente, se identificaron tendencias tecnológicas, organizacionales y ambientales enmarcadas en las macrotendencias: inteligencia artificial, *blockchain*, internet de las cosas, materiales, descarbonización principalmente. Las 20 tendencias específicas identificadas surtieron el proceso de validación con expertos, lo cual permitió determinar las de acción inmediata, las de acción necesaria, las estrategias de largo plazo y las tendencias menos urgentes.

Análisis de materialización e impacto de las tendencias

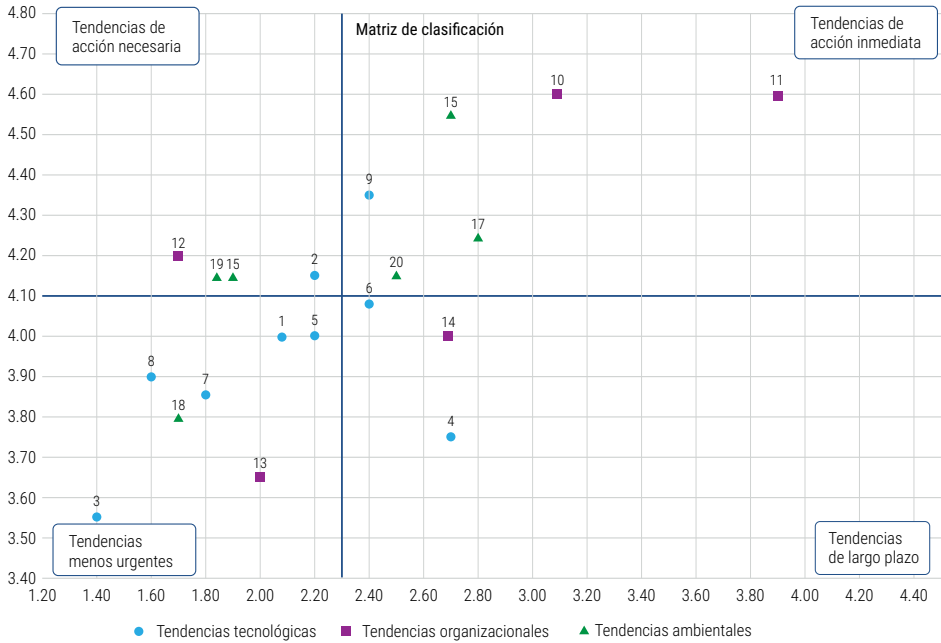
De acuerdo con la metodología expuesta para un ejercicio de prospectiva, se realizó el análisis de la materialización de las tendencias, en este caso, sobre el rango de tiempo en el cual se hará realidad o se surtirán los efectos de la tendencia, de la siguiente manera:

- Corto: 0 a 6 meses.
- Mediano: 6 meses a 3 años.
- Largo: 3 a 5 años.

La representación gráfica de las variables materialización e impacto en el capital humano de las tendencias específicas del subsector CCAYP se hizo a partir de cálculo del promedio de cada variable. Este valor promedio para ambas variables se emplea como límite visible dentro de la gráfica, generando una división de cuatro cuadrantes, que relacionan las tipologías de materialización e impacto de las tendencias: a) tendencias de acción inmediata, b) tendencias de acción necesaria, c) estrategias de largo plazo y d) tendencias menos urgentes.

El valor promedio calculado para el análisis de la materialización de tendencias es de 2,3, y para el impacto en el capital humano es de 4,1. En ilustración 4 se visualiza la ubicación de las 20 tendencias en los diferentes cuadrantes según la valoración dada por los expertos y actores consultados.

Ilustración 4. Materialización de tendencias específicas del subsector CCAYP



Tendencias específicas	
1	Tendencia 1. <i>Blockchain</i> para la trazabilidad y visibilidad completa de partes y mantenimiento
2	Tendencia 2. Mantenimiento predictivo y monitoreo estructural con internet de las cosas
3	Tendencia 3. Gemelos digitales para simulación y mantenimiento proactivo
4	Tendencia 4. Fabricación aditiva (impresión 3D) para producción de repuestos.
5	Tendencia 5. Automatización y robótica en inspección
6	Tendencia 6. Cadena de abastecimiento 4.0 (SCM 4.0)
7	Tendencia 7. Aplicación de internet de las cosas (monitorización de estructuras mediante sensores avanzados)
8	Tendencia 8. Aplicación de la inteligencia artificial y <i>big data</i> en materiales inteligentes y adaptativos
9	Tendencia 9. Desarrollo de nuevos materiales: aleaciones reciclables de titanio y magnesio
10	Tendencia 1. Certificación y credenciales digitales del personal de mantenimiento
11	Tendencia 2. Colaboración en ecosistema de cadena de suministro y mantenimiento

Tendencias específicas	
12	Tendencia 3. Estandarización de protocolos y prácticas para <i>blockchain</i>
13	Tendencia 4. Internet de las cosas, inteligencia artificial y <i>blockchain</i> facilitarán la optimización del ciclo de vida en <i>leasing</i> y financiación de aeronaves
14	Tendencia 5. Cadena de valor colaborativa: descentralización de la producción y asociaciones en I+D
15	Tendencia 1. Descarbonización y ecodiseño de aeronaves y partes
16	Tendencia 2. Propulsión con energías limpias y sostenibles
17	Tendencia 3. Circularidad en la fabricación y el ciclo de vida de componentes
18	Tendencia 4. Implementación de infraestructura verde en aeropuertos
19	Tendencia 5. Descarbonización mediante hidrógeno y combustibles sostenibles
20	Tendencia 6. Uso de materiales compuestos avanzados para reducir peso y emisiones

Fuente: elaboración propia, a partir de resultados de consulta a expertos.

Con base en las 3 grandes tendencias (tecnológica, organizacional y ambiental) y las 20 tendencias específicas, se identificó su materialización a corto, mediano o largo plazo y el impacto en el capital humano dentro del subsector CCAYP. A continuación, se presentan los resultados del cruce entre las variables y la relación de las tendencias en las cuatro tipologías de materialización.

> Tendencias de acción inmediata

Presentan una materialización por encima del promedio general (2,3), es decir, se estima un corto o mediano plazo para su materialización. Además, tienen un promedio en el impacto de capital humano por encima del general (4,1), indicando importancia alta en relación con las acciones a desarrollar para el fortalecimiento del capital humano.

Las 6 tendencias específicas ubicadas en esta tipología de materialización representan 30% de las validadas por los expertos y actores del subsector, y son las siguientes:

- Desarrollo de nuevos materiales: aleaciones reciclables de titanio y magnesio.
- Certificación y credenciales digitales del personal de mantenimiento.
- Colaboración en ecosistema de cadena de suministro y mantenimiento.

- Descarbonización y ecodiseño de aeronaves y partes.
- Circularidad en la fabricación y el ciclo de vida de componentes.
- Uso de materiales compuestos avanzados para reducir peso y emisiones.

En este cuadrante de materialización se ubican las tendencias que implican acciones de carácter inmediato frente a la búsqueda de innovación en el uso de materiales y el fortalecimiento de competencias para el personal de mantenimiento. Las tendencias validadas en este cuadrante se relacionan entre sí y determinan la importancia de dar alcance a acciones más sostenibles y eficaces, como la implementación del diseño de aeronaves con materiales ligeros, dando oportunidad de implementar aleaciones reciclables de titanio y magnesio, materiales compuestos para reducir peso y emisiones, así como buscar la circularidad en el ciclo de vida de los componentes, con el fin de integrar configuraciones aerodinámicas y digitales eficientes que contribuyan a los objetivos de neutralidad climática, sostenibilidad y estándares regulatorios de la mano del reconocimiento del personal de mantenimiento.

> Tendencias de acción necesaria

Se refiere a las tendencias a materializarse en un plazo cercano de tiempo y su impacto en el capital humano es alto, por lo cual deben ser objeto de respuestas por parte del sector, con el fin de realizar un análisis sobre las necesidades de capital humano de las tendencias. Son tendencias que presentan materialización por debajo del promedio general (2,3) y con promedio en el impacto de capital humano por encima (4,1). Se ubican en este cuadrante 4 tendencias que representan el 20% de las validadas por los expertos y actores del subsector, y son las siguientes:

- Mantenimiento predictivo y monitoreo estructural con internet de las cosas.
- Estandarización de protocolos y prácticas para *blockchain*.
- Propulsión con energías limpias y sostenibles.
- Descarbonización mediante hidrógeno y combustibles sostenibles.

En este cuadrante de materialización se ubican las tendencias que implican acciones frente a los desafíos técnicos que requieren planificación y colaboración multisectorial con la finalidad de implementar métodos de mantenimiento predictivo, la implementación de energías limpias dentro del sector aeronáutico

que permitan la transición operativa eficiente, sostenible y segura, así como la estandarización de los protocolos que permitan la operatividad en entornos cada vez más digitalizados mediante el uso de internet de las cosas y *blockchain*.

> Tendencias menos urgentes

Se sitúan por debajo del promedio frente al impacto del capital humano (4,1) y del promedio de materialización (2,3), por lo cual se estima que las tendencias ubicadas en este cuadrante se desarrollaran en el mediano plazo. En esta tipología se incluyen 7 tendencias que representan 35% de las validadas por los expertos y actores del subsector, y son las siguientes:

- *Blockchain* para la trazabilidad y visibilidad completa de partes y mantenimiento.
- Gemelos digitales para simulación y mantenimiento proactivo.
- Automatización y robótica en inspección.
- Aplicación de internet de las cosas (monitorización de estructuras mediante sensores avanzados).
- Aplicación de la inteligencia artificial y *big data* en materiales inteligentes y adaptativos.
- Internet de las cosas, inteligencia artificial y *blockchain* facilitarán la optimización del ciclo de vida en *leasing* y financiación de aeronaves.
- Implementación de infraestructura verde en aeropuertos.

En este cuadrante de materialización se ubican las tendencias menos urgentes y con una materialización dada a mediano o largo plazo, las cuales están asociadas al uso de tecnologías emergentes que permitirán la transformación de la eficiencia operativa, la optimización de recursos en el ciclo de vida de las aeronaves y la mejora continua dentro de las áreas multisectoriales del sector aeronáutico.

> Estrategias de largo plazo

Son aquellas tendencias que tienen un alto impacto en el capital humano, pero su materialización es a largo plazo. Se incluyen dentro de este cuadrante 3 tendencias que representan el 15% de las respuestas de los expertos y actores del subsector, y son las siguientes:

- Fabricación aditiva (impresión 3D) para producción de repuestos.
- Cadena de abastecimiento 4.0 (SCM 4.0).
- Cadena de valor colaborativa: descentralización de la producción y asociaciones en I+D.

> Resumen de las tendencias

Los datos registrados en la tabla 3 presentan la clasificación sistemática de las 20 tendencias identificadas en el estudio, organizadas según su nivel de urgencia. Los resultados muestran que las *tendencias menos urgentes* constituyen la categoría más numerosa, con 35% del total, seguidas de las *tendencias de acción inmediata*, que representan el 30%. Esta distribución evidencia que, si bien existe un conjunto relevante de fenómenos que requieren monitoreo constante, también se identifican dinámicas que demandan respuestas rápidas para evitar impactos negativos en el corto plazo. En contraste, las *tendencias de acción necesaria* (20%) y las *tendencias de largo plazo* (15%) muestran una menor presencia relativa, lo cual sugiere que, aunque su ocurrencia es menos frecuente, su consideración resulta fundamental para la planificación estratégica y la sostenibilidad del sistema analizado.

Tabla 3. Clasificación de las tendencias

Tendencias	Cantidad	%
Tendencias de acción inmediata	6	30
Tendencias de acción necesaria	4	20
Tendencias menos urgentes	7	35
Tendencias de largo plazo	3	15
Total general	20	100

Fuente: elaboración propia.

Análisis y conclusiones de impacto en las ocupaciones según la materialización de las tendencias

Sobre los cargos impactados por las tendencias, se concluye lo siguiente:

Tabla 4. Cargos impactados por las tendencias CCAYP

Tendencias tecnológicas	Cargos impactados
Tendencia 1. <i>Blockchain</i> para la trazabilidad y visibilidad completa de partes y mantenimiento	Dirección general, operador de equipos, inspectores de mantenimiento, ingenieros, certificación, supervisores de calidad y agentes de logística
Tendencia 2. Mantenimiento predictivo y monitoreo estructural con internet de las cosas	Ingenieros de confiabilidad, calidad, técnicos de mantenimiento
Tendencia 3. Gemelos digitales para simulación y mantenimiento proactivo	Técnicos de mantenimiento, ingenieros de confiabilidad, calidad
Tendencia 4. Fabricación aditiva (impresión 3D) para producción de repuestos.	Ingenieros de diseño, operarios de producción de piezas, logística, técnicos de mantenimiento y calidad
Tendencia 5. Automatización y robótica en inspección	Ingenieros de diseño, técnicos de mantenimiento, certificación, inspectores, especialistas de estructuras y motores, supervisores de calidad
Tendencia 6. Cadena de abastecimiento 4.0 (SCM 4.0)	Directivos de OMA y ODA, logística, aseguramiento de calidad, gestor de aeronavegabilidad, almacenistas y abastecimientos
Tendencia 7. Aplicación de internet de las cosas (monitorización de estructuras mediante sensores avanzados)	Ingenieros de diseño y producción, inspectores de aeronavegabilidad, técnicos de mantenimiento, especialistas de estructuras aeronáuticas, confiabilidad y CASS, aseguramiento de la calidad, personal de NDT
Tendencia 8. Aplicación de la inteligencia artificial y <i>big data</i> en materiales inteligentes y adaptativos	Ingenieros de diseño, gerentes de mantenimiento, logística, técnicos de mantenimiento, especialistas de estructuras, aseguramiento de la calidad
Tendencia 9. Desarrollo de nuevos materiales: aleaciones reciclables de titanio y magnesio	Ingeniería de diseño, productores de partes, logística, especialistas de estructuras y técnicos de mantenimiento

Tendencias organizacionales	Cargos impactados
Tendencia 1. Certificación y credenciales digitales del personal de mantenimiento	Todos los cargos de una OMA y ODA: directivos, ingeniería, calidad confiabilidad, técnicos y especialistas, entrenamiento
Tendencia 2. Colaboración en ecosistema de cadena de suministro y mantenimiento	Directivos y área de certificación, técnicos, confiabilidad y aseguramiento de la calidad, logística y almacenamiento
Tendencia 3. Estandarización de protocolos y prácticas para <i>blockchain</i>	Confiabilidad, ingenieros de diseño, aseguramiento de la calidad, técnicos y especialistas de mantenimiento y logística
Tendencia 4. Internet de las cosas, inteligencia artificial y <i>blockchain</i> facilitarán la optimización del ciclo de vida en leasing y financiación de aeronaves	Directivos, ingenieros, financiera, aseguramiento de la calidad y logística
Tendencia 5. Cadena de valor colaborativa: descentralización de la producción y asociaciones en I+D	Directivos, financiera, planeación e ingeniería
Tendencias ambientales	Cargos impactados
Tendencia 1. Descarbonización y ecodiseño de aeronaves y partes.	Directivos, ingeniería de diseño, aseguramiento de la calidad y logística
Tendencia 2. Propulsión con energías limpias y sostenibles	Directivos, ingeniería de diseño, aseguramiento de la calidad y logística
Tendencia 3. Circularidad en la fabricación y el ciclo de vida de componentes	Directivos, ingeniería de diseño y desarrollo y técnicos de mantenimiento
Tendencia 4. Implementación de infraestructura verde en aeropuertos	Directivos de aeródromos, personal de combustibles de aviación, logística
Tendencia 5. Descarbonización mediante hidrógeno y combustibles sostenibles	Directivos, ingeniería de diseño y desarrollo, gerente de mantenimiento
Tendencia 6. Uso de materiales compuestos avanzados para reducir peso y emisiones	Ingeniería de diseño, técnicos de materiales compuestos, especialistas de estructuras, logística y aseguramiento de la calidad

Fuente: elaboración propia.

Tendencias del subsector servicios a la navegación aérea (SNA)

Tendencias desde fuentes secundarias

El SNA suministra y apoya el desarrollo seguro y ordenado de la aviación civil internacional mediante la integración de capital humano, información, tecnología, instalaciones y servicios. Desde el punto de vista técnico, el sistema comprende las operaciones de aeródromos, la gestión del tránsito aéreo, los servicios meteorológicos, de información aeronáutica, de búsqueda y salvamento, y los sistemas de comunicaciones, navegación, vigilancia, meteorológicos y energía (CNS) tanto a bordo de las aeronaves como en tierra (OACI, 2018a). Por otro lado, el sistema comprende operaciones en ruta para integrar las operaciones aeroportuarias y los tiempos de escala; finalmente, hacia la comunidad se encuentran involucrados todos aquellos relacionados con el suministro de recursos de navegación aérea.

De conformidad con los documentos 9161 y 9734 de la OACI, los SNA constituyen gestión de tránsito aéreo (ATM/ATS), infraestructura tecnológica, sistemas de comunicación, navegación y vigilancia (CNS), servicio de búsqueda y salvamento (SAR), servicio de meteorología aeronáutica (MET) y gestión de información aeronáutica (AIM), la cual se encarga de poner a disposición, en interés de la seguridad aérea, toda la información pertinente para las operaciones de aeronaves que realizan operaciones de aviación civil nacional e internacional dentro, hacia y desde el territorio colombiano (OACI, 2018b).

En el desarrollo del análisis documental sobre las tendencias del subsector SNA, se realizó la consulta en bases de datos académicas especializadas (Science Direct, Web of Science, Springer, IEEE, entre otras), con una ventana de tiempo de búsqueda de 2019 a 2024. Asimismo, se analizaron diferentes informes y estudios técnicos vigentes, nacionales e internacionales, como los publicados por Aeronáutica Civil de Colombia, Fedesarrollo (2022), Pro Aéreo México (2021), IATA (2021) y OACI (2018a, 2018b).

Al estudiar las diferentes fuentes de información, se determinaron las tendencias presentadas en la tabla 5.

Tabla 5. Tendencias del subsector SNA

Nombre de la tendencia	Tendencia específica	Tipo de tendencia	Descripción	Servicio impactado
Automatización y digitalización	Sistemas ciber-físicos (CPS)	Tecnológica	Un CPS diseñado correctamente se basa en la perfecta integración de componentes físicos y digitales con la posibilidad de incluir interacciones humanas. Un CPS requiere que estén presentes tres funciones fundamentales: control, computación y comunicación. Los CPS prácticos suelen combinar redes de sensores y computación integrada para monitorear y controlar procesos físicos, con circuitos de realimentación que permiten que los procesos físicos afecten los cálculos y viceversa. A pesar del progreso significativo en la investigación de CPS, todos los beneficios económicos, sociales y ambientales asociados con estos sistemas están lejos de realizarse plenamente. Se están realizando importantes inversiones en todo el mundo para desarrollar CPS para un número cada vez mayor de aplicaciones de ingeniería, incluidas la aeroespacial, el transporte, la defensa, la robótica, las comunicaciones, la seguridad, la energía, la medicina, la agricultura inteligente, entre otros.	CNS AIM
	Operaciones basadas en el desempeño (PBO)	Tecnológica	Operaciones para las cuales se explota todo el rendimiento CNS disponible para establecer un sistema ATM de alto rendimiento, centrado en la red, colaborativo, integrado y fluido, que admita el tráfico aéreo de alta densidad. En esta etapa, los servicios ATM se personalizan en función del nivel más alto de desempeño CNS proporcionado por los sistemas terrestres y de tránsito involucrados, lo cual permite una explotación mejorada de la capacidad del espacio aéreo.	CNS
	Observación, pronósticos y predicción meteorológicos	Tecnológica Organizacional	En algunos países como China se ha ampliado la aplicación de la tecnología meteorológica de la aviación en la gestión del tráfico aéreo, se ha mejorado integralmente el nivel de observación y pronóstico del tiempo y se ha permitido que la meteorología participe en la toma de decisiones cooperativa de todo el proceso de las operaciones de la aviación para adaptarse a la búsqueda del transporte aéreo en el futuro de la seguridad, flexibilidad y eficiencia. Basado en los requisitos de la aviación civil, se propone la nueva generación de tecnología meteorológica aeronáutica y se promueve una tecnología de asistencia meteorológica aeronáutica para la toma de decisiones basada en la predicción de trayectorias 4D.	MET

Nombre de la tendencia	Tendencia específica	Tipo de tendencia	Descripción	Servicio impactado
Automatización y digitalización	Aviación no tripulada Movilidad aérea urbana	Organizacional	La gestión del tráfico a futuro requerirá menos intervenciones tácticas humanas y permitirá el libre flujo de información entre operadores confiables, lo cual incluirá nuevos tipos de proveedores y operadores de servicios. Para 2045, se esperan mayores niveles de automatización y autonomía (aeronaves sin tripulación) en la gestión del espacio aéreo. La evolución hacia el estado final incluirá un cambio progresivo de un sistema de gestión del tráfico aéreo centrado en el ser humano a un sistema de gestión del tráfico aéreo compuesto por sistemas con un cambio en el papel del ser humano.	ATM
	Corrección de rutas	Tecnológica Organizacional	La automatización deberá utilizarse para apoyar al controlador mediante la automatización de tareas rutinarias de naturaleza administrativa (como la coordinación, las autorizaciones de las vías aéreas) y proporcionando alertas precisas y pertinentes a los controladores. Sin embargo, se considera que la toma de decisiones y la autoridad deben permanecer con los controladores de tráfico aéreo.	ATM/ ATC
Realidad virtual (VR) y realidad aumentada (AR)	Procesos de capacitación y formación.	Tecnológica	Simulación de escenarios virtuales para la capacitación y formación de personal para el SAR, junto con el uso de herramientas tecnológicas de inmersión.	SAR
Tecnología 5G	Comunicaciones aéreas 5G	Tecnológicas	Los avances recientes en los sistemas de comunicación proporcionan una tecnología que permite la conexión y la seguridad de las aeronaves. Un sistema de comunicación prometedor que utiliza plataformas estratosféricas proporciona un rendimiento de comunicación mejorado y eficiente y puede ser una solución eficiente para establecer redes de comunicación para la aviación.	CNS

Nombre de la tendencia	Tendencia específica	Tipo de tendencia	Descripción	Servicio impactado
Inteligencia artificial / <i>machine learning</i>	Técnicas de predicción / Pronóstico de transporte aéreo	Tecnológica	La predicción de la densidad del tráfico aéreo es crucial para la seguridad de la aviación y la ATM. Comprender los complejos patrones de tráfico variables espaciotemporales y las interdependencias de las redes de tráfico aéreo es especialmente exigente. Para abordar estos desafíos, se han propuesto diversas técnicas de <i>deep learning</i> , <i>machine learning</i> , técnicas paramétricas como (filtro de Kalman, ARIMA, regresión) modelos estocásticos, modelos cuasi-dinámicos redes convolucionales, entre otros.	ATM/ ATC
	Identificación de operaciones anómalas o inseguras	Tecnológica	Para la identificación de operaciones anómalas o inseguras, al igual que para la predicción del transporte aéreo, se vienen estudiando y desarrollando técnicas basadas en <i>machine learning</i> .	ATM/ ATC
<i>Space traffic management</i> (STM)	Seguridad espacial	Organizacional	Gestionar la creciente congestión en órbita ha pasado a primer plano dentro de la comunidad internacional de operadores espaciales, ya que las tendencias relacionadas con el tráfico espacial se han vuelto imposibles de ignorar. La STM es fundamentalmente una cuestión de seguridad espacial.	
Internet de las cosas	Data aeronáutica Redes de internet de las cosas	Tecnológicas	Internet de las cosas, la computación en la nube, el procesamiento de <i>big data</i> y la inteligencia artificial son tecnologías de vanguardia que han estado cambiando el mundo. Estas tecnologías se apoyan entre sí y crean muchos dominios de estudios y aplicaciones interdisciplinarios y transdisciplinarios. Internet de las cosas conecta los dispositivos del mundo físico con el mundo virtual a través de Internet y varios protocolos. Los dispositivos generan grandes cantidades de datos que contienen información vital sobre el mundo físico. Los entornos de computación en la nube facilitan el proceso de <i>big data</i> y la toma de decisiones inteligentes basadas en análisis de <i>big data</i> y aprendizaje automático.	ATM

Nombre de la tendencia	Tendencia específica	Tipo de tendencia	Descripción	Servicio impactado
Tecnologías verdes	Combustibles de aviación sostenibles (SAF)	Verde	Mejoras de eficiencia mediante SAF podría evitar entre 125 y 140 millones de toneladas (Mt) de CO ₂ para 2050, lo cual reduciría las necesidades de energía en vuelo entre un 7% y un 10%.	ATM
	Fuentes de energía renovable (estaciones aeronáuticas)	Verde	A medida que el cambio climático se exagera y los recursos existentes se agotan, la necesidad de industrias sostenibles se vuelve cada vez más importante. La aviación no es una excepción. A pesar de las emisiones globales de dióxido de carbono relacionadas El sector de la aviación representa actualmente entre el 2% y el 4%, las previsiones para los viajes aéreos indican un crecimiento anual de entre 3% y 5%, y otras industrias presentan más potencial para reducir las emisiones de carbono una vez que recurran a un nivel creciente uso de energías renovables.	ATM
	Celdas de hidrogeno y baterías	Verde	Se podrían evitar entre 35 y 125 Mt adicionales de CO ₂ para 2050, dependiendo cuán rápido ingresen al mercado, dónde puedan volar y cuántos pasajeros pueden llevar a bordo.	ATM
	Implementación de procesos (tiempos en el <i>waitpoint</i> , administración de salidas, reducción de los tiempos objetivos de despegue, etc.) para la contribución a menos emisiones CO ₂	Verde	Contribución a los TBO-CDO-CCO-AMAN-DMAN.	ATM

Nombre de la tendencia	Tendencia específica	Tipo de tendencia	Descripción	Servicio impactado
Industria 4.0	Mejoramiento de la eficiencia en operaciones aeroportuarias	Tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> • Optimización de los procedimientos de aproximación, guía vertical incluida. • Mayor rendimiento de las pistas mediante separación por estela turbulenta. • Mejoramiento de la afluencia de tránsito mediante secuenciación de pistas (AMAN/DMAN). • Seguridad operacional y eficiencia de las operaciones en la superficie. • Operaciones aeroportuarias mejoradas mediante CDMA nivel aeropuerto. • Gestión de control de aeródromos operada a distancia. • Accesibilidad aeroportuaria optimizada y operaciones aeroportuarias mejoradas mediante la gestión de salidas superficies y llegadas. 	ATM
	Optimización de la capacidad y vuelos flexibles	Tecnológica	Mayor eficiencia para manejar la fluencia mediante la planificación basada en una visión a escala de la red capacidad inicial para vigilancia en tierra Mejores operaciones mediante trayectorias en rutas mejoradas	ATM
Big data	Mejoramiento de la eficiencia en interoperabilidad mundial de datos y sistemas	Tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> • Integración de toda la información ATM digital. • Gestión de la información aeronáutica digital y de todo el sistema SWIM. • Mayor interoperabilidad, eficiencia y capacidad Información meteorológica para mejorar la eficiencia y seguridad operacionales. • Información meteorológica integrada. 	ATM
	Implementación de trayectorias de vuelos eficientes	Tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor flexibilidad y eficiencia en los perfiles de descenso y mayor flexibilidad y eficiencia en los perfiles de salida. • Mejor sincronización del tránsito aéreo y operación basada en la trayectoria inicial. • Aplicación inicial de servicios en ruta de enlace de datos. 	ATM

Nombre de la tendencia	Tendencia específica	Tipo de tendencia	Descripción	Servicio impactado
Big data	Optimización del plan de SNA	Organizacional	A través de la gestión de los SNA: minería de datos, análisis, inteligencia artificial para aumentar el desempeño del PSNA en eficiencia, capacidad, seguridad operacional, predictibilidad, flexibilidad, costo-eficiencia. También incluye la optimización de procesos, racionalización, digitalización y automatización para acelerar la toma de acciones, y mejorar gestión de los costos de los SNA, con el fin de asegurar costo-eficiencia.	ATM
Estandarización	Alineación organizacional del programa de seguridad del Estado, programa estatal para la gestión de autoridad en seguridad operacional (SSP, OACI – PEGASO, UAEAC)	Organizacional	Cooperación del PSNA con otros miembros de la comunidad: autoridad aeronáutica, otras autoridades, I+D, universidades, operadores aeronaves, CIA, proveedores de servicios aeroportuarios.	ATM

Fuente: elaboración propia.

Análisis IMI de tendencias desde fuentes primarias

A continuación, se presenta el análisis de la materialización e impacto de las tendencias identificadas en el subsector de SNA, considerando el proceso de validación y las contribuciones realizadas por expertos provenientes del ámbito académico, institucional y empresarial.

Las tendencias se analizaron según la percepción de los expertos respecto al marco temporal en el cual podrían concretarse o empezar a generar impactos significativos. Para este propósito, el estudio de prospectiva clasifica los horizontes temporales en corto plazo (0-6 meses), mediano plazo (1-2 años) y largo plazo (3-5 años).

La visualización gráfica de las variables relacionadas con la materialización e impacto de las tendencias en el capital humano del sector se basó en el cálculo de promedios para cada una. Estos promedios sirven como puntos de referencia para dividir el espacio gráfico en cuatro cuadrantes, que describen las categorías de materialización e impacto: a) tendencias de acción inmediata, b) tendencias de acción necesaria, c) estrategias de largo plazo, y d) tendencias menos urgentes.

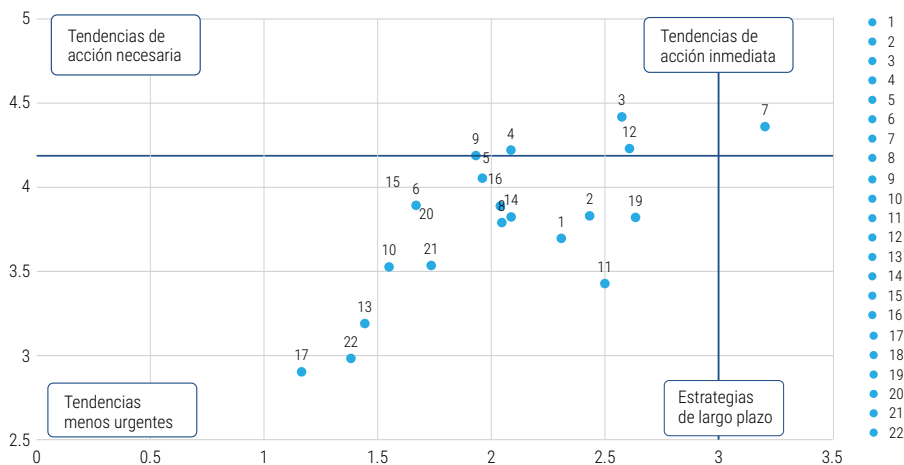
Tabla 6. Tendencias del subsector SNA

N	Gran tendencia	Tendencia específica	Categoría
1	Estandarización	Alineación organizacional del programa de seguridad del Estado, programa estatal para la gestión de autoridad en seguridad operacional (SSP, OACI - PEGASO, UAEAC)	Organizacionales
		Alianzas interadministrativas del PSNA	Organizacionales
2	Big data	Optimización del plan de SNA	Organizacionales
		Mejoramiento de la eficiencia en interoperabilidad mundial de datos y sistemas	Tecnológicas
3	Industria 4.0	Optimización y eficiencia en operaciones aeroportuarias (vuelos flexibles)	Tecnológicas
4	Space traffic management (STM)	Seguridad espacial	Organizacionales
		ADS-B (<i>Automatic Dependent Surveillance-Broadcast</i>)	Organizacionales
5	Internet de las cosas	Data aeronáutica, redes de internet de las cosas	Tecnológicas
6	Inteligencia artificial/ <i>Machine learning</i>	Técnicas de identificación, predicción y pronóstico de transporte aéreo	Tecnológicas
7	Realidad virtual (VR) y realidad aumentada (AR)	Procesos de capacitación y formación	Tecnológicas
8	Tecnología 5G	Comunicaciones aéreas 5G	Tecnológicas
9	Tecnología Satelital	Integración digital CNS y meteorología con cobertura satelital	Tecnológicas
10	Robótica	Robótica SAR/Aérea/Aeroportuaria	Tecnológicas

N	Gran tendencia	Tendencia específica	Categoría
11	Automatización y digitalización	Operaciones basadas en el desempeño (PBO)	Tecnológicas
		Control de tráfico aéreo automatizado (ATC), corrección de rutas	Tecnológicas
		Movilidad aérea urbana/Aviación no tripulada	Tecnológicas
		Sistemas CPS	Tecnológicas
		Observación, pronósticos y predicción meteorológicos	Tecnológicas
		Sistemas de información aeronáutica Digital	Organizacionales
12	Tecnologías ambientales	Combustibles de aviación sostenibles (SAF)	Verde
		Fuentes de energía renovable (estaciones aeronáuticas)	Verde
		Celdas de hidrogeno y baterías	Verde

Fuente: elaboración propia.

Ilustración 5. Análisis de tendencias IMI



Fuente: elaboración propia, a partir de resultados de grupos de prospectiva.

La identificación de tendencias se llevó a cabo a través de la búsqueda en fuentes académicas en una ventana de tiempo de tres años aproximadamente, con el fin de revisar los documentos recientemente publicados. En la tabla se presenta la clasificación de grandes tendencias, sus tendencias específicas y su categoría (organizacionales, tecnológicas y verdes).

Teniendo en cuenta las 12 grandes tendencias y las 22 tendencias específicas, se identificó materialización a corto, mediano o largo plazo, y su impacto en el capital humano.

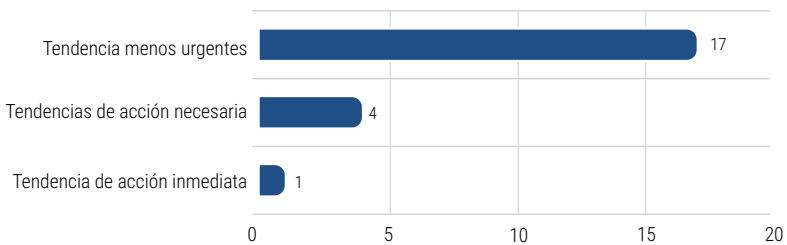
Tabla 7. Clasificación de las tendencias del subsector SNA

Etiquetas de fila	Cantidad	%
Tendencia de acción inmediata	1	5
Tendencia de acción necesaria	4	18
Tendencia menos urgente	17	77
Total general	22	100

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados del cruce entre las variables y la relación de las tendencias en las cuatro tipologías de materialización:

Ilustración 6. Resultados del cruce de variables SNA



Fuente: elaboración propia.

Tendencias de acción inmediata

Esta categoría agrupa las tendencias que presentan un promedio de materialización superior 3.0, con lo cual se espera su concreción en el corto o mediano plazo. Asimismo, estas tendencias tienen un promedio de impacto en el capital humano superior a 4.3, lo que resalta su alta importancia en relación con las acciones necesarias para fortalecer el talento humano.

La tendencia específica clasificada en esta tipología representa el 5% de las validadas por los expertos y actores del subsector, a saber, la relacionada con ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast). ADS-B es una tecnología de vigilancia automática que utiliza señales GPS para determinar la ubicación exacta de una aeronave. Las aeronaves equipadas con ADS-B transmiten su posición, velocidad y altitud a través de una señal de radio. Esta señal puede ser recibida tanto por estaciones en tierra como por otras aeronaves en el área, lo cual permite un mayor conocimiento de la situación en tiempo real. Algunas de sus ventajas son las siguientes:

- Mayor seguridad: los controladores aéreos y los pilotos tienen información en tiempo real sobre el tráfico aéreo cercano.
- Reducción de costos: a diferencia del radar tradicional, el ADS-B es más económico de instalar y mantener.
- Cobertura global: con la instalación de receptores en estaciones terrestres y en satélites, el ADS-B permite un seguimiento más amplio, incluso en áreas sin cobertura radar.

El ADS-B está emergiendo como una tendencia en América Latina debido a su capacidad para mejorar la gestión del tráfico aéreo en una zona caracterizada por grandes áreas remotas y cobertura limitada de radar. Este sistema, más económico y eficiente que los radares tradicionales, es ideal para monitorear vuelos en zonas montañosas, selvas y espacios con baja infraestructura.

Además, la región está experimentando un crecimiento significativo en el tráfico aéreo, impulsado por el aumento de pasajeros y la expansión de aerolíneas de bajo costo, lo cual hace necesario adoptar tecnologías modernas para gestionar el espacio aéreo de manera segura y eficiente. Las regulaciones internacionales de la OACI también están incentivando su implementación, ya que el ADS-B garantiza la interoperabilidad con otras regiones del mundo y atrae a aerolíneas extranjeras.

Su adopción mejora la seguridad aérea al proporcionar datos precisos en tiempo real sobre posición y altitud, ayudando a evitar colisiones. Asimismo, su facilidad de instalación y mantenimiento lo convierte en una opción viable para países con presupuestos limitados.

Finalmente, el ADS-B no solo beneficia a las aerolíneas comerciales, sino también a la aviación general, que desempeña un papel crucial en la conectividad de áreas inaccesibles de la región.

Tendencias de acción necesaria

Se refiere a las tendencias a materializarse en un plazo cercano de tiempo y su impacto en el capital humano es alto, por lo cual deben ser objeto de respuestas por parte del subsector, con el fin de realizar un análisis sobre las necesidades de capital humano de las tendencias. Presentan materialización por debajo del promedio general (3.0) y un promedio en el impacto de capital humano por encima (4.3). Se incluyen en esta tipología 4 tendencias que representan el 18% de las validadas por los expertos y actores del subsector.

La primera está relacionada con la optimización del plan de SNA, necesaria en países como Colombia, donde se evidencia crecimiento del tráfico aéreo y complejidad del espacio aéreo. Esto incluye la actualización de infraestructuras, tecnologías y procedimientos para alinearse con las recomendaciones de la OACI y la estrategia global del GANP (Global Air Navigation Plan). Algunas acciones a mediano plazo a considerar son las siguientes:

- Implementar tecnologías basadas en PBN (*Performance-Based Navigation*) para optimizar rutas y reducir el consumo de combustible.
- Actualizar los sistemas de gestión del tráfico aéreo con herramientas que integren datos en tiempo real.
- Capacitar a los controladores aéreos en el uso de nuevas tecnologías y procedimientos.
- Promover la digitalización de los planes de vuelo para una mayor eficiencia y conectividad con otros países.

Otra tendencia enlistada la constituye el mejoramiento de la eficiencia en interoperabilidad mundial de datos y sistemas. La aviación global exige un flujo de datos continuo y confiable entre países y regiones para garantizar operaciones

seguras y eficientes. En Colombia, la modernización de los sistemas de gestión del tráfico aéreo es clave para garantizar la interoperabilidad con otros sistemas regionales e internacionales, especialmente en el marco del crecimiento de la conectividad aérea con Norteamérica y Europa. Para ello, se plantean las siguientes acciones a mediano plazo:

- Adoptar estándares internacionales como SWIM (*System Wide Information Management*) para la gestión de datos compartidos.
- Modernizar las bases de datos de control aéreo con plataformas digitales compatibles con otros sistemas globales.
- Crear acuerdos bilaterales para el intercambio de datos de tráfico aéreo con países vecinos.
- Participar en foros internacionales para mantenerse actualizado con las tendencias globales en interoperabilidad.

Técnicas de identificación, predicción y pronóstico de transporte aéreo es la tercera tendencia, dado el constante crecimiento de la industria, especialmente en rutas nacionales e internacionales clave. Técnicas avanzadas de análisis predictivo y pronóstico permiten anticipar flujos de tráfico, ajustar capacidades aeroportuarias y mejorar la planificación estratégica, por tanto, conviene considerar el siguiente marco de acciones a mediano plazo:

- Implementar sistemas de *big data* y análisis predictivo para prever picos de demanda en el tráfico aéreo.
- Desarrollar herramientas para modelar escenarios de tráfico futuro y evaluar la capacidad de aeropuertos.
- Establecer un sistema nacional de monitoreo que combine datos históricos y en tiempo real para predecir patrones de tráfico.
- Coordinar con aerolíneas para optimizar itinerarios y reducir congestiones en horarios pico.

Por último, se encuentra la tendencia asociada a la integración digital CNS y meteorología con cobertura satelital. Colombia, con su geografía diversa y compleja, enfrenta desafíos significativos en términos de monitoreo y gestión meteorológica. La integración digital de sistemas CNS con servicios meteorológicos a través de cobertura satelital puede mejorar la seguridad y eficiencia en la navegación

aérea, especialmente en zonas montañosas y de difícil acceso. Algunas acciones a mediano plazo:

- Instalar sistemas de vigilancia aérea basados en satélites, como el ADS-B satelital, para monitorear áreas remotas.
- Integrar sistemas meteorológicos avanzados que proporcionen alertas en tiempo real sobre condiciones climáticas.
- Crear un centro nacional de gestión digital CNS y meteorología para consolidar datos y mejorar la toma de decisiones.
- Capacitar al personal técnico en el manejo de herramientas digitales y tecnologías satelitales.

Tendencias menos urgentes

Se sitúan por debajo del promedio frente al impacto del capital humano (4,3) y del promedio de materialización (3,0). Se estima que las tendencias ubicadas en esta tipología se desarrollaran en el mediano plazo. En esta tipología se incluyen 17 tendencias que representan el 77% de las validadas por los expertos y actores del subsector:

- Tendencia 1: Alineación organizacional del programa de seguridad del Estado, programa estatal para la gestión de autoridad en seguridad operacional (SSP, OACI – PEGASO, UAEAC).
- Tendencia 2: Alianzas interadministrativas del PSNA.
- Tendencia 5: Optimización y eficiencia en operaciones aeroportuarias (vuelos flexibles).
- Tendencia 6: Seguridad espacial.
- Tendencia 8: Data Aeronáutica, redes de internet de las cosas.
- Tendencia 10: Procesos de capacitación y formación.
- Tendencia 11: Comunicaciones aéreas 5G.
- Tendencia 13: Robótica SAR/Aérea/Aeroportuaria
- Tendencia 14: Operaciones basadas en el desempeño (PBO).
- Tendencia 15: Control de tráfico aéreo automatizado (ATC), corrección de rutas.
- Tendencia 16: Movilidad aérea urbana/Aviación no tripulada.

- Tendencia 17: Sistemas CPS.
- Tendencia 18: Observación, pronósticos y predicción meteorológicos.
- Tendencia 19: Sistemas de información aeronáutica digital.
- Tendencia 20: Combustibles de aviación sostenibles (SAF).
- Tendencia 21: Fuentes de energía renovable (estaciones aeronáuticas).
- Tendencia 22: Celdas de hidrogeno y baterías.

Las tendencias emergentes en aviación reflejan un enfoque integral hacia la modernización y sostenibilidad de la industria, abarcando aspectos operativos, tecnológicos, de formación y de sostenibilidad ambiental. La alineación organizacional del programa de seguridad del Estado (SSP y PEGASO) busca fortalecer las capacidades regulatorias y operativas en Colombia para garantizar un cumplimiento eficiente de los estándares internacionales de seguridad operacional. Asimismo, las alianzas interadministrativas del PSNA promueven la colaboración entre entidades nacionales para optimizar la gestión del espacio aéreo y los servicios asociados, mientras que la optimización de operaciones aeroportuarias mediante vuelos flexibles apunta a mejorar la eficiencia y minimizar los retrasos, alineándose con la creciente demanda de tráfico aéreo. En términos tecnológicos, la implementación de redes de internet de las cosas para datos aeronáuticos, comunicaciones 5G y sistemas CPS revolucionará la conectividad, la gestión de datos y la automatización de procesos críticos, como el control de tráfico aéreo (ATC) y la corrección de rutas.

Por otro lado, la sostenibilidad se está posicionando como una prioridad estratégica. La adopción de combustibles de aviación sostenibles (SAF), el uso de celdas de hidrógeno y baterías y la integración de fuentes de energía renovable en estaciones aeronáuticas son iniciativas que reducirán significativamente las emisiones de carbono. Además, la incorporación de movilidad aérea urbana y sistemas de aviación no tripulada representará un cambio en la dinámica de transporte en ciudades densamente pobladas. En el ámbito operativo, la automatización y la robótica, como los SAR y aeroportuarios, mejorarán la eficiencia y la seguridad en aeropuertos y en misiones de búsqueda y rescate. Estas iniciativas, combinadas con un enfoque en la formación de talento humano y el desarrollo de capacidades avanzadas en pronósticos meteorológicos y gestión digital de la información aeronáutica, posicionarán a Colombia como un referente en la aviación moderna y sostenible a nivel regional e internacional.

Análisis y conclusiones de impacto ocupación según la materialización de tendencias

Respecto a los cargos impactados por las tendencias del subsector, se evidencia unanimidad en las respuestas de los 30 actores participantes de los grupos focales y se concluye las 3 tendencias más relevantes identificadas:

Tabla 8. Conclusiones impacto según materialización del subsector SNA

N.º	TENDENCIA	CARGOS IMPACTADOS
3	Optimización del plan de SNA	Personal AIM, ATC, MET, directores regionales, Analistas de Datos
7	ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)	Personal ATC, ATSEP, pilotos, AIM, dirección telecomunicaciones
12	Integración digital CNS y meteorología con cobertura satelital	Personal MET, ATC, AIM, Dirección de Telecomunicaciones

Fuente: elaboración propia.

En el caso de la optimización del plan de servicios, se requiere una mejor integración de las tecnologías PBN (Performance-Based Navigation) y la digitalización de la información aeronáutica. Esto demanda un fortalecimiento de capacidades técnicas en el personal AIM y ATC para manejar nuevas plataformas y procedimientos avanzados. Los meteorólogos (MET) deberán proporcionar pronósticos más precisos integrados con sistemas digitales en tiempo real. Los directores regionales, responsables de implementar estos cambios, necesitarán habilidades en gestión de proyectos y liderazgo adaptativo. Además, los analistas de datos jugarán un papel crucial al interpretar grandes volúmenes de información para tomar decisiones estratégicas y operativas.

Para la implementación de ADS-B impacta a múltiples niveles, los controladores de tránsito aéreo necesitarán capacitarse en el manejo de esta tecnología, con el fin de gestionar el tráfico aéreo de manera más precisa y eficiente. El personal ATSEP estará encargado de la instalación, mantenimiento y supervisión de la infraestructura ADS-B, requiriendo una formación específica en sistemas electrónicos avanzados. Los pilotos deberán comprender cómo interactuar con el sistema ADS-B en las

aeronaves. Por su parte, el personal AIM integrará los datos generados por el ADS-B en los sistemas de información aeronáutica, asegurando precisión y disponibilidad de la información. Finalmente, la dirección de telecomunicaciones supervisará la conectividad y la interoperabilidad del sistema con otras tecnologías de vigilancia.

Por último, la integración de sistemas CNS con meteorología y cobertura satelital exige un enfoque multidisciplinario. Los meteorólogos deberán trabajar con herramientas digitales avanzadas para generar pronósticos en tiempo real que sean compatibles con los sistemas CNS. Los controladores de tránsito aéreo tendrán que aprender a operar con sistemas que combinan datos meteorológicos y de vigilancia, mejorando la toma de decisiones operativas. El personal AIM se encargará de digitalizar y distribuir esta información en formatos estándares globales. La dirección de telecomunicaciones, por su parte, liderará la implementación de la infraestructura satelital y garantizará que los sistemas sean interoperables y cumplan con las regulaciones internacionales.

Estas tendencias reflejan una creciente necesidad de capacitación especializada y colaboración interdisciplinaria entre diferentes cargos dentro del subsector. Se requerirá una inversión significativa en formación técnica y en herramientas tecnológicas para garantizar que el personal esté preparado para adoptar e implementar estas transformaciones. Además, es crucial que los cargos directivos coordinen estos cambios estratégicamente, promoviendo la sostenibilidad y eficiencia del sistema de navegación aérea en Colombia.

Tendencias del subsector operaciones aeroportuarias (OA)

Tendencias por fuentes secundarias

Aeropuertos

Se identifican 5 megatendencias que darán forma al futuro de los aeropuertos (Wyman, 2023):

- Lograr el cero neto: para el 2050, los aeropuertos serán productores y centros de energía, proporcionando fuentes de energía a los usuarios y comunidades y ayudando con la descarbonización y flujos de ingresos sostenibles.

- **Innovación tecnológica:** para el 2050, los procesos de los aeropuertos serán completamente autónomos, lo cual aumentará la velocidad y la calidad de las actividades desde la seguridad hasta la inmigración y embarque, igual sucederá con la carga. El procesamiento de pasajeros será totalmente automatizado: facturación, entrega de equipaje, inmigración y embarque gracias a la tecnología de reconocimiento facial. Se hará identidad digital reconocida internacionalmente para todos los pasajeros.
- **Conectividad intermodal:** para el 2050, los aeropuertos serán modelos de viajes conectados e integrados para enlaces urbanos y regionales y transporte masivo de muchos tipos incluidos trenes, vehículos autónomos, taxis aéreos, entre otros.
- **Fuerza laboral cambiante:** para el 2050, los robots y la automatización habrán asumido la mayor parte de las funciones actuales en los aeropuertos reemplazando al personal, posiblemente las funciones de los humanos se limitarán a las habilidades interpersonales.
- **Revolución de la experiencia del pasajero:** para el 2050, habrá terminales sin colas, con procesos personalizados y planificados, los pasajeros tendrán un viaje fluido desde el hogar hasta el destino, pasando menos tiempo en el aeropuerto. El procesamiento remoto simplificará los procedimientos de embarque y seguridad.

Tendencias de los servicios aeroportuarios

Servicios aeroportuarios con el Anexo 14 de la OACI, RAC 14 Colombia y el Plan Global para la seguridad operacional de la aviación (GASP)

- Mayor énfasis en la gestión de la seguridad operacional. Los aeropuertos deben implementar un Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional (SMS) siguiendo los lineamientos de OACI y la reglamentación local. Esto permite identificar peligros y gestionar riesgos de manera proactiva.
- Cumplimiento de nuevos requisitos físicos de las pistas, calles de rodaje y plataformas. El Anexo 14 ha aumentado los requisitos para estas áreas críticas, buscando reducir excursiones de pista y otras incidencias.
- Mejoras en los sistemas eléctricos de los aeropuertos. Se busca tener suministros más confiables y alternativas en caso de fallos. Esto incluye luces de aproximación, de pista, etc.

- Nuevos equipos y tecnologías para las operaciones en condiciones de baja visibilidad. Por ejemplo, iluminación LED de alta intensidad, nuevos sensores meteorológicos, GPS diferencial para guiado en tierra.
- Mayor vigilancia y control de amenazas. Uso de cercos perimetrales, CCTV robustecidos, sistemas de detección de intrusos, controles de acceso, para prevenir amenazas dentro del aeropuerto.
- Mejor gestión de la fauna para reducir el peligro aviario. Técnicas como falcos, deterrentes acústicos, manejo del hábitat en los alrededores.
- Identificación de peligros y evaluación de riesgos de forma proactiva y continua. Se utilizan herramientas como análisis de trabajos seguros (SAT) y reportes de incidentes para detectar riesgos.
- Análisis de datos de seguridad para identificar tendencias peligrosas. Mediante estadísticas, datos de vuelo y sistemas de reporte se detectan riesgos latentes.
- Evaluaciones de riesgo más rigurosas, considerando probabilidad y severidad de consecuencias. Se priorizan los riesgos más críticos.
- Seguimiento y medición de la efectividad de las medidas de mitigación. Viendo indicadores como incidentes, cuasi-accidentes, se evalúa la eficacia.
- Auditorías internas y externas al SMS de forma periódica. Ayudan a identificar brechas y oportunidades de mejora.
- Revisión gerencial para monitorear el desempeño del SMS y asignar recursos, capacitación al personal en conceptos de SMS y seguridad operacional. Desarrollar una cultura positiva, integración del SMS con sistemas de calidad y del área administrativa.

En resumen, la tendencia es implementar sistemas aeroportuarios más seguros, confiables y resilientes. Siguiendo los estándares globales más recientes, el SMS en aeropuertos funciona bajo estándares globales, con personal competente, para gestionar proactivamente los riesgos.

Tecnologías de navegación y comunicación que hacen más eficientes las operaciones aeroportuarias, Anexo 14 de la OACI, RAC 14 Colombia y el Plan Global para la Seguridad Operacional de la Aviación (GASP)

- Sistemas AVDGS para guiado automático de aeronaves en tierra mediante señales visuales. Reducen tiempo de rodaje y previenen incursiones. Requieren capacitación de pilotos y personal.

- Sistemas A-SMGCS para vigilancia e intercambio de información sobre movimiento de aeronaves y vehículos en plataforma. Permiten optimizar rutas y flujos.
- Comunicaciones digitales aerotierra como el VHF digital. Mejoran cobertura y calidad de audio. Requieren radios compatibles.
- Navegación satelital GNSS para rutas de rodaje y aproximación. Reduce necesidad de otras ayudas terrestres. Precisa capacitación de controladores y pilotos.
- Información meteorológica de alta resolución para la toma de decisiones. Permite aproximaciones en condiciones adversas.
- Automatización de servicios de información aeronáutica mediante Tablets/ dispositivos móviles. Agiliza difusión de NOTAMs y otros datos.
- Uso de vehículos eléctricos en plataforma, suministro de energía limpia, oferta de combustibles sostenibles para aeronaves, más amigables con el medio ambiente. Requieren infraestructura especial, reducción de emisiones.
- Digitalización de registros de aeronavegabilidad, servicios, y pasajeros, mediante software especializado. Optimiza procesos.

Infraestructuras sostenibles aeroportuarias. Anexo 14 de la OACI, RAC 14 Colombia y el Plan Global para la seguridad operacional de la aviación (GASP) y el RAC 216.

- Sistemas eficientes de gestión energética, como iluminación LED, energía solar, sensores de movimiento. Requieren entrenamiento técnico del personal de mantenimiento.
- Gestión eficiente del agua, con sistemas de captación de aguas lluvia, tratamiento de aguas residuales, dispositivos ahorradores. Necesita concientización de los empleados.
- Prácticas de gestión ambiental como medición de la huella de carbono, compensación de emisiones, y reciclaje.
- Medidas de aislamiento acústico en motores, edificios sensibles al ruido. Además de monitoreo y gestión de rutas de vuelo.
- Diseño e infraestructura aeroportuaria que minimice el impacto visual. Por ejemplo, uso de vegetación natural en los alrededores.
- Comunicación y cooperación continua con las comunidades vecinas. Atendiendo sus preocupaciones y necesidades ambientales.

- Capacitación al personal sobre sostenibilidad y cumplimiento de requisitos ambientales de OACI y autoridades nacionales.
- En conclusión, se busca un desarrollo aeroportuario ambientalmente amigable y socialmente responsable.
- Fomento de sistemas de intercambio de información y de coordinación de operaciones.
- Sistemas A-CDM (Airport Collaborative Decision Making) para compartir datos en tiempo real entre aerolíneas, control aéreo y aeropuerto. Permite optimizar flujos. Requiere capacitación de usuarios.
- Plataformas digitales de comunicación para coordinación de slots, asignación de gates, información de vuelos. Facilitan la coordinación entre partes.
- Sistemas para compartir información sobre estado de infraestructura, trabajos de mantenimiento, cierre de pistas. Permite planificar operaciones.
- Uso de aplicaciones móviles y tablets por el personal operativo para reportes e intercambio de información en tiempo real.
- Sistemas de monitoreo colaborativo de amenazas y administración de crisis entre aeropuerto, compañías aéreas y otras agencias.

Infraestructura e instalaciones aeropuertos 4G y 5G.

- Pistas, calles de rodaje y plataformas capaces de soportar aeronaves más grandes y pesadas como el A380, B777X, entre otros. Esto requiere pavimentos más resistentes.
- Sistemas avanzados de ayudas visuales como luces LED de mayor visibilidad, señalización digital programable, indicadores de posición en pista, etc.
- Mayor uso de tecnologías “verdes” como pavimentos permeables, sistemas de drenaje sostenibles, iluminación solar.
- Infraestructura preparada para operaciones de rodaje automatizado, con señalización e iluminación compatible con sistemas de guiado visual autónomos.
- Reconfiguración de áreas de movimiento para mejorar eficiencia. Calles de salida rápida, vías paralelas adicionales, etc.
- Edificios terminales más amplios y eficientes energéticamente, con tecnología integrada para procesamiento de pasajeros y equipaje.
- Hangares, plataformas y rodajes diseñados para categorías de aeronaves más grandes como A380.

- Mayor uso de energías renovables, como paneles solares en edificios. Infraestructura preparada para aviación eléctrica.
- Integración de tecnologías digitales para optimizar procesos, como IoT, *big data*, inteligencia artificial.
- Diseño centrado en la experiencia del pasajero, con áreas comerciales atractivas.
- Diseño de terminales más amplios y eficientes, con capacidad para manejar el aumento en pasajeros y operaciones.
- Uso de tecnologías para automatización de procesos como check-in, manejo de equipaje, controles de seguridad, embarque, etc.
- Integración de sistemas biométricos para identificación de pasajeros en puntos de control.
- Implementación de controles de seguridad más avanzados, como escáneres 3D, detección de explosivos, etc.
- Diseño flexible de áreas comerciales, para adaptarse a diferentes distribuciones y necesidades de las aerolíneas.
- Conceptos de sostenibilidad como certificaciones LEED, uso de energía renovable, iluminación eficiente, etc.
- Tecnologías para mejorar la experiencia del pasajero como WiFi de alta velocidad, cargadores USB, pantallas interactivas.
- Áreas para chequeo y manejo de equipaje fuera del terminal para aumentar capacidad.
- Sistemas de información integrados para gestión de datos de pasajeros, vuelos, procesos, recursos del aeropuerto en tiempo real.
- Arquitectura e infraestructura alineada con estándares globales de seguridad (Anexo 17 OACI), calidad, eficiencia operacional.

En resumen, se apunta a aeropuertos más eficientes, sostenibles y tecnológicamente avanzados y hacia terminales más tecnológicos, sustentables, enfocados en la experiencia del usuario y alineados con los más altos estándares internacionales.

Gestión Ambiental y control de Fauna. RAC 216 y RAC 14 Anexo 14 OACI y Plan Global de Seguridad Operacional (GANP) y estudios en aeropuertos internacionales.

- Mayor énfasis en identificar peligros por fauna, analizar riesgos y establecer procedimientos de manejo proactivo, en lugar de solo reactivo.

- Uso creciente de tecnologías como radar de detección de aves, sistemas de ultrasonido, láser, drones, etc. para monitoreo y dispersión.
- Diseño de áreas verdes y manejo de hábitats en aeropuertos para disminuir atracción de fauna.
- Mayor coordinación y reportes entre controladores aéreos, personal de pista y manejo de fauna para identificar peligros.
- Procedimientos actualizados de inspección de pista para detección de fauna e informe sobre condiciones peligrosas.
- Capacitación periódica al personal sobre identificación de especies, patrones de comportamiento y técnicas de dispersión.
- Evaluación de riesgos ambientales y planes de contingencia integrados al sistema de gestión de seguridad operacional.
- Medición de indicadores y estadísticas para seguimiento de tendencias y mejora continua.
- Colaboración regional entre aeropuertos para compartir datos, técnicas y monitoreo de rutas migratorias.
- Cumplimiento de estándares globales como Anexo 14 OACI y directrices de la OACI para gestión de riesgos por fauna.

En resumen, el enfoque se orienta cada vez más a la gestión proactiva y basada en riesgos, apoyándose en tecnología y coordinación regional.

Formación y capacitación del personal de infraestructura e instalaciones en pista, Plataforma, calles de rodaje, cerramiento, edificaciones: Plan Global de Seguridad Operacional (GANP), aeropuertos.

- Capacitación en nuevas tecnologías y sistemas utilizados en pavimentos, iluminación, drenaje, señalización de pista y plataforma. Por ejemplo, luces LED, sistemas de guía visual, etc.
- Actualización en normas y recomendaciones internacionales como Anexo 14 OACI, estándares globales para diseño de aeropuertos.
- Entrenamiento en inspección, mantenimiento y reparación de pavimentos, sistemas eléctricos, de drenaje, etc. acorde a manuales técnicos.
- Formación en gestión de proyectos aeroportuarios, planeación y supervisión de obras.

- Procedimientos de seguridad operacional durante trabajos en el área de movimiento. Comunicación y coordinación con control de tráfico aéreo. Simulacros de emergencia y contingencia que involucren fallas en infraestructura.
- Entrenamiento en sistemas de gestión de la seguridad operacional (SMS) aplicados a infraestructura aeroportuaria.
- Formación en factores humanos, liderazgo y trabajo en equipo en entornos aeroportuarios.
- Uso de nuevas tecnologías para capacitación como realidad virtual, simulación 3D, drones, etc.
- Procedimientos de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo basados en manuales técnicos y recomendaciones de fabricantes.
- Formación en gestión de proyectos e ingeniería de mantenimiento aeroportuario. Análisis de datos, indicadores de desempeño.
- Cursos recurrentes en áreas críticas: mantenimiento eléctrico, de equipos de climatización, de sistemas hidráulicos, etc.
- Formación en gestión de la seguridad operacional, análisis de riesgos, investigación de accidentes e incidentes.
- Protocolos actualizados de coordinación y seguridad operacional en trabajos en áreas de movimiento.
- Simulacros de situaciones de emergencia que impliquen fallas de equipos o sistemas.

La capacitación debe enfocarse tanto en temas técnicos como en habilidades blandas y uso de nuevas tecnologías, desarrollo de competencias técnicas e incorporar las nuevas tecnologías y estándares globales en el campo.

Formación y capacitación del personal de ayudas visuales para los aeropuertos. Plan Global de Seguridad Operacional (GANP), aeropuertos.

- Mayor énfasis en la gestión de riesgos y análisis de amenazas para identificar peligros potenciales en el área de movimiento. Esto podría incluir capacitación en evaluación de riesgos, mapeo de procesos, etc.
- Entrenamiento en nuevas tecnologías y sistemas de ayudas visuales, como luces LED, señalización digital, sistemas de guía visual en tierra A-VDGS, etc.
- Procedimientos actualizados de inspección y mantenimiento de ayudas visuales acordes a regulaciones internacionales como los Anexos 14 y 19 de OACI.

- Formación en factores humanos, comunicación y trabajo en equipo para mejorar la coordinación entre control de tráfico aéreo, operaciones aeroportuarias y mantenimiento.
- Capacitación periódica y recurrente en temas críticos como: gestión de plataforma, control de fauna, manejo de FOD, baja visibilidad, etc.
- Entrenamiento práctico en escenarios reales y simuladores para desarrollar habilidades técnicas y capacidad de respuesta ante emergencias.
- Formación en sistemas de gestión de la seguridad operacional (SMS) y su aplicación en las ayudas visuales.
- Actualización en regulaciones y estándares internacionales de OACI, EASA, etc.

En resumen, se espera una capacitación más integral, orientada a riesgos, apoyada en tecnología, con énfasis en lo humano y apegada a las mejores prácticas globales.

Formación y capacitación del personal de Gestión Ambiental y control de Fauna de acuerdo, según el Plan Global de Seguridad Operacional (GANP) y aeropuertos.

- Mayor énfasis en la identificación de especies, sus patrones de comportamiento y técnicas efectivas de manejo humanitario.
- Entrenamiento práctico en el uso adecuado de herramientas y tecnologías para dispersión, como cañones de piro, láser, drones, etc.
- Procedimientos actualizados de inspección, reporte y comunicación sobre condiciones de riesgo por fauna entre áreas operativas.
- Formación en análisis de riesgos, estadísticas e investigación de incidentes relacionados con fauna para mejora continua.
- Capacitación en diseño y mantenimiento de áreas verdes aeroportuarias para minimizar atracción de fauna.
- Entrenamiento periódico en temas críticos como especies locales, patrones migratorios, épocas de mayor riesgo, etc.
- Formación en sistemas de gestión de seguridad operacional y su aplicación al control de fauna.
- Simulacros de contingencia y respuesta ante incidentes de fauna.
- Actualización sobre tecnologías innovadoras para monitoreo, detección y dispersión de fauna.
- Énfasis en el trabajo en equipo y la coordinación entre áreas relevantes del aeropuerto.

En resumen, la capacitación deberá ser más integral, orientada a la gestión de riesgos, y enfocada en las mejores prácticas de acuerdo con el ecosistema y manejo de tecnologías disponibles.

Servicio de Extinción de Incendios (SEI)

Tecnología para el Servicio de Extinción de Incendios (SEI) en los aeropuertos de acuerdo con el documento 9137 de la OACI, RAC 14 Capítulo 6 y 17 y la Asociación Nacional de Protección contra el fuego NFPA.

- Vehículos SEI de alta tecnología, con sistemas de monitoreo, mayor capacidad de agua/espuma, y equipos de alta presión y descarga.
- Sistemas robotizados y drones equipados con mangueras, cámaras térmicas y sensores para apoyar la extinción remota.
- Equipos de protección personal más ergonómicos y resistentes al calor, con sensores biométricos integrados.
- Sistemas de comunicación y alerta más rápidos y confiables entre la torre de control, bomberos y otros actores.
- Simuladores y realidad virtual para entrenamiento inmersivo del personal en diversos escenarios de incendio.
- Sistemas automáticos de detección y alarma contra incendios basados en vídeo, audio y sensores de humo.
- Equipos portátiles de detección de puntos calientes después del incendio mediante visión infrarroja.
- *Big data* e inteligencia artificial para modelar y predecir comportamiento/propagación de incendios.
- Materiales ignífugos y retardantes de última generación para construcción de infraestructura del aeropuerto.
- Sistemas más eficientes de espuma y extintores limpios, sustentables y amigables con el medio ambiente.

En resumen, las tecnologías buscan maximizar la efectividad, seguridad y sustentabilidad en la respuesta a incendios.

Simuladores de instrucción para el Servicio de Extinción de Incendios (SEI). Documento 9137 de la OACI, RAC 14 Capítulo 6 y 17 y la Asociación Nacional de Protección contra el fuego NFPA

- Vehículos SEI de alta tecnología, con sistemas de monitoreo, mayor capacidad de agua/espuma, y equipos de alta presión y descarga.
- Sistemas robotizados y drones equipados con mangueras, cámaras térmicas y sensores para apoyar la extinción remota.
- Equipos de protección personal más ergonómicos y resistentes al calor, con sensores biométricos integrados.
- Sistemas de comunicación y alerta más rápidos y confiables entre la torre de control, bomberos y otros actores.
- Simuladores y realidad virtual para entrenamiento inmersivo del personal en diversos escenarios de incendio.
- Sistemas automáticos de detección y alarma contra incendios basados en vídeo, audio y sensores de humo.
- Equipos portátiles de detección de puntos calientes después del incendio mediante visión infrarroja.
- *Big data* e inteligencia artificial para modelar y predecir comportamiento/propagación de incendios.
- Materiales ignífugos y retardantes de última generación para construcción de infraestructura del aeropuerto.
- Sistemas más eficientes de espuma y extintores limpios, sustentables y amigables con el medio ambiente.

En resumen, las tecnologías buscan maximizar la efectividad, seguridad y sustentabilidad en la respuesta a incendios.

Capacitación para el Servicio de Extinción de Incendios (SEI). Documento 9137 de la OACI, RAC 14 Capítulo 6 y 17 y la Asociación Nacional de Protección contra el fuego NFPA

- Programas de grado y posgrado especializados en seguridad aeroportuaria, incendios en aeronaves y mercancías peligrosas.
- Énfasis en aspectos prácticos como simulacros, estudio de casos reales, y pasantías en aeropuertos, con competencias para la respuesta inmediata a emergencias y rescate en aeronaves de nuevos diseños.

- Cursos de rescate y lucha contra incendios en espacios confinados simulando condiciones en aeronaves.
- Capacitación en operación de nuevas tecnologías para extinción: como vehículos robotizados, drones, simuladores virtuales y equipos de protección inteligentes.
- Entrenamiento en respuesta coordinada a emergencias con otros actores: control de tránsito aéreo, seguridad, policía.
- Formación continua sobre peligros de nuevos materiales usados en aviones y en el transporte de carga.
- Desarrollo de habilidades blandas: liderazgo, comunicación, manejo de crisis, trabajo en equipo. Mandos intermedios con habilidades avanzadas de liderazgo, coordinación de equipos y toma de decisiones, gestión de crisis.
- Énfasis en competencias investigativas para determinar causas de incendios y mejorar prevención, que determinen causas y recomienden medidas preventivas.
- Programas flexibles que combinen metodologías presenciales, virtuales y prácticas en el puesto de trabajo.
- Técnicos en equipos electrónicos, sistemas automáticos de detección y extinción.
- Analistas de datos que modelen y predigan la propagación de incendios utilizando inteligencia artificial.
- Instructores certificados en técnicas y equipos de combate de incendios aeronáuticos.
- Profesionales en prevención de incendios y diseño de infraestructuras ignífugas.
- Especialistas en materiales, química y comportamiento del fuego ante nuevos retardantes y espumas ecológicas.
- Bomberos con dominio de inglés técnico aeronáutico y normalización internacional en SEI.

En síntesis, se requieren perfiles multifuncionales, con sólida base técnica y enfocados en la prevención. altamente cualificados y actualizados ante las nuevas tecnologías y retos.

Análisis IMI

Este capítulo aborda el análisis de la materialización e impacto de las tendencias identificadas en el subsector de OA, considerando el proceso de validación y las contribuciones realizadas por expertos provenientes del ámbito académico, institucional y empresarial.

La materialización de las tendencias se evalúa según la percepción de los expertos sobre el rango temporal en el que estas se concretarán o comenzarán a generar efectos. Los periodos definidos para este análisis son los siguientes: corto plazo (0-6 meses), mediano plazo (1-2 años) y largo plazo (3-5 años), de acuerdo con la metodología empleada en este estudio de prospectiva. No obstante, debido al tiempo requerido para la ejecución de actividades, proyectos y estudios, se contempla la posibilidad de utilizar rangos temporales más amplios.

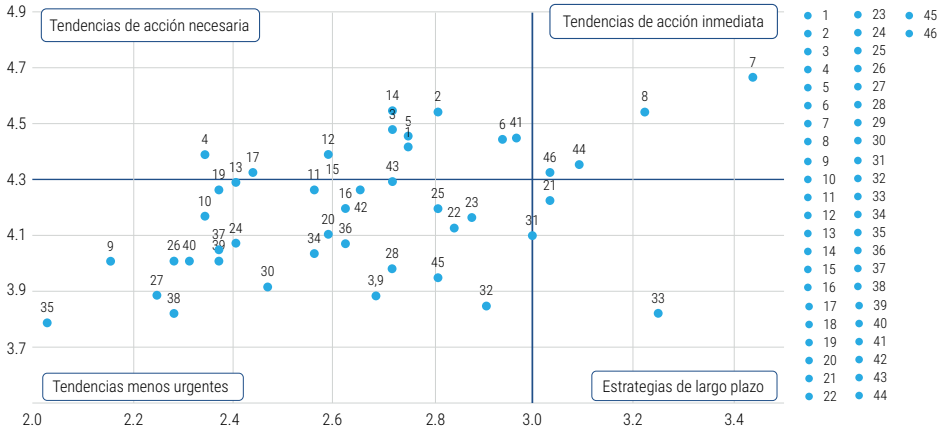
Tabla 9. Tendencias subsector operaciones aeroportuarias

N.º	Nombre de las áreas donde se analizaron las tendencias a nivel organizacional, tecnológicas y verdes
1	Organizacionales
2	Infraestructura
3	Ayudas visuales y sistemas eléctricos
4	Ambiental y control fauna
5	Servicios médicos aeroportuarios
6	Servicios de extinción de incendios
7	Sistema de seguridad operacional

Fuente: elaboración propia.

La representación gráfica de las variables de materialización e impacto en el capital humano de las tendencias específicas del sector se realizó a partir del cálculo del promedio de cada variable. Estos valores se emplean como referencia en la gráfica, dividiendo el espacio en cuatro cuadrantes que describen las tipologías de materialización e impacto de las tendencias: a) tendencias de acción inmediata, b) tendencias de acción necesaria, c) estrategias de largo plazo y d) tendencias menos urgentes.

Ilustración 7. Clasificación de las tendencias del subsector OA



Fuente: elaboración propia, a partir de resultados de grupos de prospectiva.

En primer lugar, se indagó por las cuatro tendencias a nivel organizacional en los aeropuertos, a saber:

1. Alineación organizacional del *Plan Global para la Seguridad Operacional* (del GASP) y del *Plan de Navegación Aérea para Colombia* (de la UAEAC).
2. Integración de tecnologías digitales para optimizar procesos, como internet de las cosas, *big data*, inteligencia artificial.
3. Automatización y digitalización de los sistemas propios de las operaciones aeroportuarias.
4. Aeropuertos 4G y 5G.

En segundo lugar, se tomaron las áreas de manejo de los aeropuertos y sobre estas se analizaron las tendencias de acuerdo con la tipología de tecnológicas y verdes, que a continuación se presentan en diversos campos de acción.

En infraestructura:

- Tecnológicas:
 5. Sistemas eficientes de gestión energética, como iluminación LED, energía solar, sensores de movimiento.
 6. Sistemas para compartir información sobre estado de infraestructura, trabajos de mantenimiento, cierre de pistas.
 7. Gestión eficiente del agua, con sistemas de captación de aguas lluvia, tratamiento de aguas residuales, dispositivos ahorradores.
 8. Sistemas de monitoreo colaborativo de amenazas y administración de crisis entre aeropuerto, compañías aéreas y otras agencias.
 9. Pistas, calles de rodaje y plataformas capaces de soportar aeronaves más grandes y pesadas como el A380 y el B777X. Esto requiere pavimentos más resistentes.
 10. Infraestructura preparada para operaciones de rodaje automatizado, con señalización e iluminación compatible con sistemas de guiado visual autónomos.
- Verdes:
 11. Medidas de aislamiento acústico en motores, edificios sensibles al ruido. Además de monitoreo y gestión de rutas de vuelo.
 12. Mayor uso de tecnologías “verdes”, como pavimentos permeables, sistemas de drenaje sostenibles e iluminación solar.
 13. Mayor uso de energías renovables, como paneles solares en edificios. Infraestructura preparada para aviación eléctrica.
 14. Uso de vehículos eléctricos en plataforma, suministro de energía limpia, oferta de combustibles sostenibles para aeronaves más amigables con el ambiente. Requieren infraestructura especial.

En ayudas visuales y sistemas eléctricos:

- Tecnológicas:
 15. Entrenamiento en nuevas tecnologías y sistemas de ayudas visuales, como luces LED, señalización digital, sistemas de guía visual en tierra A-VDGS.
 16. Mantenimiento de ayudas visuales acordes a regulaciones internacionales con Procedimientos automatizados de inspección.

17. Simuladores para desarrollar habilidades técnicas y capacidad de respuesta ante emergencias.

- Verdes:

18. Sostenibilidad como certificaciones LED, uso de energía renovable, edificios y terminales eficientes energéticamente.

19. Estaciones remotas aeronáuticas susceptibles de funcionar con fuentes de energía renovable, particularmente eólica y solar.

En el plano ambiental y de control de fauna:

- Tecnológicas:

20. Uso de tecnologías como radar de detección de aves, sistemas de ultrasonido, láser, drones, para monitoreo y dispersión.

21. Colaboración regional entre aeropuertos para compartir datos, técnicas y monitoreo de rutas migratorias.

22. Sistemas automatizados de monitoreo de ruido y CO₂.

- Verdes:

23. Gestión de temas críticos como especies locales, patrones migratorios, épocas de mayor riesgo y técnicas efectivas de manejo humanitario.

24. Adoptar el programa *Airport Carbon Accreditation* de la ACI para medir, controlar, reducir y compensar emisiones en aeropuertos. Adoptar programas complementarios, como el enfoque equilibrado de ruido de la OACI y explorar la resiliencia de la infraestructura aeronáutica ante efectos del cambio climático.

25. Diseño de áreas verdes y manejo de hábitats en aeropuertos para disminuir atracción de fauna.

26. Implementación del *Plan de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional* (CORSIA) para medir, reducir y compensar emisiones de aeronaves.

En cuanto a servicios médicos aeroportuarios:

- Tecnológicas:
 27. Tecnologías médicas para atención de pacientes y detección temprana de posibles riesgos sanitarios en pasajeros y usuarios del TA, como cámaras térmicas y sensores biométricos.
 28. Procesos digitalizados para que los pasajeros envíen previamente certificados de vacunación y visas médicas a las autoridades sanitarias.
 29. Estaciones de autogestión para que los pasajeros realicen autoevaluaciones de salud y riesgo epidemiológico.
 30. Creación de instalaciones médicas y de cuarentena dentro de los aeropuertos para atender emergencias de salud.
 31. Intercambio de información en tiempo real sobre posibles amenazas de salud pública y preparación ante posibles riesgos sanitarios emergentes.
- Verdes:
 32. Protocolos de higiene, uso de equipos de protección personal y detección de síntomas.
 33. Manejo de residuos médicos.

Frente a los servicios de extinción de incendios:

- Tecnológicas:
 34. Vehículos SEI de alta tecnología, con sistemas de monitoreo, mayor capacidad de agua/espuma, y equipos de alta presión y descarga.
 35. Sistemas robotizados y drones equipados con mangueras, cámaras térmicas y sensores para apoyar la extinción remota.
 36. Equipos de protección personal más ergonómicos y resistentes al calor, con sensores biométricos integrados.
 37. Simuladores y realidad virtual para entrenamiento inmersivo del personal en diversos escenarios de incendio
 38. Equipos portátiles de detección de puntos calientes después del incendio mediante visión infrarroja.

- Verdes:
 39. Tecnologías verdes ante nuevos retardantes, espumas ecológicas y extintores limpios, sustentables y amigables con el medio ambiente.
 40. Materiales ignífugos y retardantes de última generación para construcción de infraestructura del aeropuerto.

En gestión de seguridad operacional:

- Tecnológicas:
 41. Implementar un SMS siguiendo los lineamientos de OACI y la reglamentación local para identificar peligros y gestionar riesgos de manera proactiva.
 42. Sistemas de información integrados con vigilancia cimentada en la efectividad y eficacia de los SMS de cada proveedor de servicio, basado en rendimiento a través del Security Safety Plan.
 43. Tecnología de la información para la compilación, transformación y administración de datos de seguridad operacional que permitan generar análisis estadísticos para la toma de decisiones y para realizar una gestión predictiva del riesgo.
 44. Respuesta a incidentes mediante centros de operaciones para investigar y remediar situaciones al instante.
 45. La aplicación de la metodología ISO/IEC 31010: Gestión de riesgos – Técnicas de evaluación de riesgos, plataformas seguras de comunicación en tiempo real, que permitan el intercambio de alertas.
- Verdes:
 46. Pasar de una vigilancia prescriptiva a una vigilancia basada en riesgos, realizar ajustes al proceso de auditorías a través de unas bases de datos y de indicadores de seguridad que permita definir perfiles de riesgo, priorizar los niveles de riesgo y determinar planes de acción del proveedor de servicios, según sea el caso.

Teniendo en cuenta las 7 áreas seleccionadas, y a partir de las 46 tendencias específicas de tipo organizacional, tecnológicas y verdes, se identificó la materialización a corto, mediano o largo plazo y el impacto en el capital humano dentro del subsector de OA en un aeropuerto, de la siguiente manera:

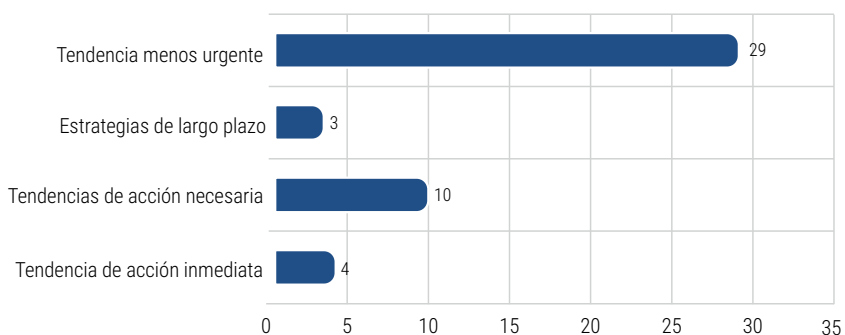
Tabla 10. Materialización de las tendencias subsector OA

Etiquetas de fila	Cantidad	%
Tendencia de acción inmediata	4	9
Tendencia de acción necesaria	10	22
Estrategias de largo plazo	3	7
Tendencia menos urgente	29	63

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados del cruce entre las variables y la relación de las tendencias en las cuatro tipologías de materialización:

Ilustración 8. Tendencias categorizadas en el subsector OA



Fuente: elaboración propia.

Tendencias de acción inmediata

Esta categoría agrupa las tendencias que presentan un promedio de materialización superior a 3,0, con lo cual se espera su concreción en el corto o mediano plazo. Asimismo, estas tendencias tienen un promedio de impacto en el capital humano superior a 4,3, que resalta su alta importancia en relación con las acciones necesarias para fortalecer el talento humano.

Las 4 tendencias específicas clasificadas en esta tipología representan el 9% de las validadas por los expertos y actores del subsector. Las tendencias específicas incluidas en esta categoría son las siguientes:

7. Gestión eficiente del agua, con sistemas de captación de aguas lluvia, tratamiento de aguas residuales, dispositivos ahorradores.
8. Sistemas de monitoreo colaborativo de amenazas y administración de crisis entre aeropuerto, compañías aéreas y otras agencias.
44. Respuesta a incidentes mediante centros de operaciones para investigar y remediar situaciones al instante.
46. Pasar de una vigilancia prescriptiva a una vigilancia basada en riesgos, realizar ajustes al proceso de auditorías a través de unas bases de datos y de indicadores de seguridad, se definen perfiles de riesgo, priorizar los niveles de riesgo y determinar planes de acción del proveedor de servicios, según el riesgo identificado.

En esta tipología se encuentran 4 tendencias que demandan acciones inmediatas. Entre las observaciones realizadas por los expertos, destacan las 2 primeras, que corresponden a aquellas vinculadas a la infraestructura de los aeropuertos y están asociadas al aspecto relacionado con tecnología. Las 2 tendencias siguientes de acción inmediata están asociados directamente con seguridad operacional del aeropuerto, tanto a nivel de tecnología como verde, y con la respuesta a incidentes de aviación mediante centros de operaciones orientados a investigar y remediar situaciones de manera inmediata, así como el manejo de la vigilancia prescriptiva basada en riesgos, con el fin de determinar planes de acción del proveedor de servicios, según el riesgo identificado.

Tendencias de acción necesaria

Estas son tendencias que presentan materialización por debajo del promedio general (3,0) y con promedio en el impacto de capital humano por encima del promedio general (4,3). Se incluyen en esta tipología 10 tendencias, que representan el 22% de las validadas por los expertos y actores del subsector:

1. Alineación organizacional del *Plan Global para la Seguridad Operacional* (del GASP) y del *Plan de Navegación Aérea para Colombia* (de la UAEAC).

2. Integración de tecnologías digitales para optimizar procesos, como internet de las cosas, *big data*, inteligencia artificial.
3. Automatización y digitalización de los sistemas propios de las operaciones aeroportuarias.
4. Aeropuertos 4G y 5G.

Estas 4 primeras tendencias se ubican en el nivel organizacional de los aeropuertos: son los ejes marco del quehacer de un aeropuerto y se constituyen en ejes de acción necesarios, dado que tienen impacto en el factor humano y permiten no solo dar respuesta a la normatividad vigente, sino que, al implementar las tecnologías digitales, la automatización de los sistemas y la concreción de 4G y 5G, se evoluciona hacia unos aeropuertos caracterizados por los siguientes puntos:

- Mayor conectividad y eficiencia: las velocidades ultrarrápidas permiten el intercambio de datos entre dispositivos y actualizaciones en tiempo real. Esto agiliza los procesos de embarque y mejora los controles de seguridad y la experiencia de los clientes.
- Gestión inteligente del tráfico aéreo: la congestión y la gestión del tráfico aéreo en los centros de transporte plantean retos importantes. Con tecnologías avanzadas como los sensores del internet de las cosas y los análisis basados en inteligencia artificial pueden integrarse con la infraestructura para comprender y mitigar estos retos.
- Vehículos autónomos y drones: con esta conectividad de alta velocidad y baja latencia se puede soportar eficazmente el despliegue de taxis y vehículos de reparto autónomos, que dependan de una amplia cobertura y baja latencia. Estos vehículos tienen la capacidad de navegar por entornos complejos de forma más eficiente, reduciendo la congestión del tráfico y las emisiones.
- Mayor seguridad y protección: esta tecnología mejora aspectos como la videovigilancia en tiempo real, el reconocimiento facial y los sistemas de autenticación biométrica, con lo cual el personal de seguridad puede responder rápidamente a posibles amenazas, manteniendo un entorno más seguro para los pasajeros. Con la ayuda de dispositivos de internet de las cosas impulsados por 5G, los aeropuertos pueden utilizar cámaras de video conectadas para evitar el robo de equipaje y dispositivos de cotejo de equipaje y pasajero para garantizar que cada maleta se vaya con su propietario correspondiente.

Ahora bien, se destacan las siguientes tendencias:

6. Sistemas para compartir información sobre estado de infraestructura, trabajos de mantenimiento, cierre de pistas.
12. Mayor uso de tecnologías “verdes”, como pavimentos permeables, sistemas de drenaje sostenibles, iluminación solar.
14. Uso de vehículos eléctricos en plataforma, suministro de energía limpia, oferta de combustibles sostenibles para aeronaves, más amigables con el medio ambiente. Requieren infraestructura especial.

Estas tendencias se relacionan con la infraestructura de los aeropuertos, son de acción necesaria y corresponden tanto a la tipología de tecnológicas como verdes, dado que, con la creciente demanda de servicios por parte de los operadores aéreos, propietarios de aeronaves, empresas comerciales de pasajeros y carga y de la comunidad en general, se requiere de aeropuertos en el que no solamente se haga mantenimiento, sino que estén en un proceso continuo de mejoramiento y de ampliación de infraestructura aeroportuaria.

Sobre las tendencias verdes a nivel de infraestructura aeroportuaria, se trata de repensar el aeropuerto con acciones inmediatas que mejoren los niveles ambientales de las OA para alcanzar niveles ambientalmente sostenibles. Dentro de los impactos ambientales que deben ser considerados para estas acciones inmediatas se puede distinguir: a) el ruido, para lo cual se deben generar mapas de ruido y elaborar planes de acción encaminados a mitigar sus efectos; b) calidad del aire en la vecindad del aeropuerto, la cual se ve afectada por emisiones de los motores de aeronave, emisiones de los vehículos y equipos y emisiones de otras instalaciones existentes en el aeropuerto; c) emisiones de gases de efecto invernadero, generados, entre otros, por la planta de energía del aeropuerto, los vehículos, el mantenimiento de la infraestructura aeroportuaria, los equipos de apoyo en tierra y los equipos de energía de emergencia, los sistemas de eliminación de residuos, elementos que son fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero; d) uso y gestión de recursos como el agua, del cual se debe reducir su uso y explorar otras fuentes como la reutilización del agua de lluvia, el tratamiento de aguas residuales y el reciclaje de aguas de refrigeración; e) gestión de residuos, crucial para mantener el cumplimiento con las leyes y reglamentos ambientales, como el tratamiento de los residuos peligrosos, residuos orgánicos e inorgánicos, artículos confiscados de los controles de seguridad y el equipaje facturado, residuos de las operaciones de limpieza de las aeronaves,

residuos provenientes de la construcción u obras civiles en el aeropuerto, residuos industriales y aguas residuales y aguas pluviales contaminadas.

Otras tendencias a reseñar en este punto son las siguientes:

15. Entrenamiento en nuevas tecnologías y sistemas de ayudas visuales, como luces LED, señalización digital, sistemas de guía visual en tierra A-VDGS.
17. Simuladores para desarrollar habilidades técnicas y capacidad de respuesta ante emergencias.

Las tendencias 15 y 17 están relacionadas con ayudas visuales y sistemas eléctricos, también de acción necesaria, y corresponden a la tipología de tecnológicas. Actualmente, el sistema de guía visual para el atraque (VDGS) solo está instalado en el Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá, para proporcionar al piloto información de guiado en azimut (muestra la posición de la aeronave en relación con el eje del área de estacionamiento) y de la distancia a la posición de parada del puesto de estacionamiento de aeronave, con base en mediciones realizadas mediante un sensor óptico que envía la información a un computador que la procesa y orienta al piloto a través de una unidad de presentación ubicada sobre la fachada del edificio terminal en la extensión de la línea de eje de la posición de parqueo. La tendencia 17 advierte la necesidad de que el aeropuerto esté preparado para afrontar cualquier tipo de emergencia relacionada con los sistemas de ayudas visuales y sistemas eléctricos para una mejor precisión del aterrizaje. Entre las señales que proporcionan se encuentran el eje de la pista, la rodadura y laterales, la franja lateral de la pista, y las señales de la zona de contacto entre la aeronave y la pista, las cuales deben estar operativas y se les debe realizar los mantenimientos necesarios de acuerdo con los equipos utilizados.

La última tendencia de acción necesaria es la siguiente:

41. Implementar un SMS siguiendo los lineamientos de OACI y la reglamentación local para identificar peligros y gestionar riesgos de manera proactiva.

La tendencia 41 está relacionada con gestión de seguridad operacional y corresponde a la tipología de tecnológica. La seguridad operacional de un aeropuerto debe plantear estrategias para investigar y analizar los peligros de

manera prospectiva, clasificar y gestionar el riesgo, pero, sobre todo, mitigarlos en su máxima expresión para evitar que ocurran.

Estrategias a largo plazo

Son aquellas tendencias que tienen un alto impacto en el capital humano, pero que su materialización es a largo plazo. Se incluyen dentro de esta tipología 3 tendencias, que representan el 7% de las respuestas de los expertos y actores del subsector:

21. Colaboración regional entre aeropuertos para compartir datos, técnicas y monitoreo de rutas migratorias de aves.
31. Intercambio de información en tiempo real sobre posibles amenazas de salud pública y preparación ante posibles riesgos sanitarios emergentes.
33. Manejo de residuos médicos.

Esta tipología integra tendencias a largo plazo, demandables actualmente por el sector, debido al creciente interés de la sociedad. La tendencia 21 está relacionada con el área ambiental y de control fauna de un aeropuerto y corresponde a la tipología de tecnológica. Ella resulta fundamental para evitar impactos con fauna silvestre durante las fases de despegue y ascenso o de aproximación y aterrizaje con las aeronaves y su operación, por lo cual se requiere compartir información relevante con la región, ya que las aves se sienten atraídas a un aeropuerto debido a comida, agua o hábitat, aunado a que las aeronaves modernas son más silenciosas y tienen mayor velocidad.

Las tendencias 31 y 33 están relacionadas con los servicios médicos aeroportuarios y corresponden tanto a la tipología de tecnológicas como verdes. La tendencia 31 persigue que los Estados parte acuerden desarrollar, reforzar y mantener capacidades sanitarias básicas en materia de prevención, vigilancia, control y respuesta en los puntos de entrada, así como establecer y mantener allí planes de contingencia para emergencias de salud pública para prevenir la propagación internacional de enfermedades. Los Estados parte deben seguir directrices sobre el desarrollo de las capacidades de vigilancia y respuesta en materia de salud pública, dado que en los puntos de entrada convergen los operadores, el personal aeroportuario, las tripulaciones de aeronaves, los viajeros y acompañantes y otras partes interesadas que intervienen en el transporte aéreo. La tendencia 33 está orientada al manejo de residuos médicos, incluidos dentro del tipo de residuos peligrosos, por lo cual

necesitan un tratamiento especial por parte de la gestión del aeropuerto. Materiales médicos como guantes, batas, mascarillas y equipos médicos desechables que, aunque son esenciales para la prevención de infecciones, han llevado a un aumento sustancial en la producción de desechos sanitarios. Las pandemias, con su énfasis en prácticas de bioseguridad y el uso masivo de equipos de protección personal, aumenta esta situación.

Tendencias menos urgentes

Se sitúan por debajo del promedio frente al impacto del capital humano (4,3) y el promedio de materialización (3,0). Se estima que las tendencias ubicadas en esta tipología se desarrollaran en el mediano plazo y en esta tipología se incluyen 29 tendencias que representan el 63% de las validadas por los expertos y actores del subsector:

5. Sistemas eficientes de gestión energética, como iluminación LED, energía solar, sensores de movimiento.
9. Pistas, calles de rodaje y plataformas capaces de soportar aeronaves más grandes y pesadas como el A380, B777X, entre otros. Esto requiere pavimentos más resistentes.
10. Infraestructura preparada para operaciones de rodaje automatizado, con señalización e iluminación compatible con sistemas de guiado visual autónomos
11. Medidas de aislamiento acústico en motores, edificios sensibles al ruido. Además de monitoreo y gestión de rutas de vuelo.
13. Mayor uso de energías renovables, como paneles solares en edificios. Infraestructura preparada para aviación eléctrica.
16. Mantenimiento de ayudas visuales acordes a regulaciones internacionales con Procedimientos automatizados de inspección.
18. Sostenibilidad como certificaciones LED, uso de energía renovable, edificios y terminales eficientes energéticamente.
19. Estaciones remotas aeronáuticas susceptibles de funcionar con fuentes de energía renovable, particularmente eólica y solar.
20. Uso de tecnologías como radar de detección de aves, sistemas de ultrasonido, láser, drones, para monitoreo y dispersión.
22. Sistemas automatizados de monitoreo de ruido y CO₂.

23. Gestión de temas críticos como especies locales, patrones migratorios, épocas de mayor riesgo y técnicas efectivas de manejo humanitario.
24. Adoptar el programa *Airport Carbon Accreditation* de la ACI para medir, controlar, reducir y compensar emisiones en aeropuertos. Adoptar programas complementarios, como el enfoque equilibrado de ruido de la OACI y explorar la resiliencia de la infraestructura aeronáutica ante efectos del cambio climático.
25. Diseño de áreas verdes y manejo de hábitats en aeropuertos para disminuir atracción de fauna.
26. Implementación del *Plan de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional* (CORSIA) para medir, reducir y compensar emisiones de aeronaves.
27. Tecnologías médicas para atención de pacientes y detección temprana de posibles riesgos sanitarios en pasajeros y usuarios del TA, como cámaras térmicas y sensores biométricos.
28. Procesos digitalizados para que los pasajeros envíen previamente certificados de vacunación y visas médicas a las autoridades sanitarias.
29. Estaciones de autogestión para que los pasajeros realicen autoevaluaciones de salud y riesgo epidemiológico.
30. Creación de instalaciones médicas y de cuarentena dentro de los aeropuertos para atender emergencias de salud.
32. Protocolos de higiene, uso de equipos de protección personal y detección de síntomas.
34. Vehículos SEI de alta tecnología, con sistemas de monitoreo, mayor capacidad de agua/espuma, y equipos de alta presión y descarga.
35. Sistemas robotizados y drones equipados con mangueras, cámaras térmicas y sensores para apoyar la extinción remota.
36. Equipos de protección personal más ergonómicos y resistentes al calor, con sensores biométricos integrados.
37. Simuladores y realidad virtual para entrenamiento inmersivo del personal en diversos escenarios de incendio
38. Equipos portátiles de detección de puntos calientes después del incendio mediante visión infrarroja.
39. Tecnologías verdes ante nuevos retardantes, espumas ecológicas y extintores limpios, sustentables y amigables con el medio ambiente.
40. Materiales ignífugos y retardantes de última generación para construcción de infraestructura del aeropuerto.

42. Sistemas de información integrados. Vigilancia cimentada en la efectividad y eficacia de los SMS de cada proveedor de servicio, basado en rendimiento a través del Security Safety Plan.
43. Tecnología de la información para la compilación, transformación y administración de datos de seguridad operacional que permitan generar análisis estadísticos para la toma de decisiones y para realizar una gestión predictiva del riesgo.
45. La aplicación de la metodología ISO/IEC 31010: Gestión de riesgos – Técnicas de evaluación de riesgos, plataformas seguras de comunicación en tiempo real, que permitan el intercambio de alertas.

Se destaca que todas las tendencias específicas corresponden a todas las áreas de atención de un aeropuerto, y esto explica la necesidad de mayores tiempos de materialización de las estrategias de conservación para ver resultados. En este paquete se incluyen las tendencias 5, 9, 10, 11 y 13, relacionadas con el área de infraestructura de un aeropuerto, y corresponde a las tipologías de tecnológicas y verdes. También en esta tipología se agrupan las tendencias 16, 18 y 19 del área de ayudas visuales y sistemas eléctricos, tanto tecnológicas como verdes, orientadas hacia la automatización de la infraestructura y la propensión por orientar las acciones hacia la sostenibilidad ambiental de un aeropuerto.

Por otro lado, las tendencias 20, 22, 24, 25 y 26 agrupa al área de ambiental y control fauna, tanto tecnológicas como verdes, encaminadas hacia la construcción de aeropuertos para minimizar el impacto ambiental, mediante la implementación de sistemas de energía renovable, como paneles solares y turbinas eólicas, para reducir la dependencia de combustibles fósiles, maximizar el uso de la luz natural, reducir la necesidad de sistemas de climatización, usar eficientemente el agua y realizar todo el tratamiento de la fauna local y migratoria de los aeropuertos.

En este mismo grupo, además, se presentan las tendencias 27, 28, 29, 30 y 32 del área de los servicios médicos aeroportuarios, tanto tecnológicas como verdes, reguladas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y en aplicación al RSI, debe asegurar la asistencia médica sanitaria de primera intervención y evacuación de todo el personal de las instalaciones aeroportuarias, dada la especificidad de la comunidad aeroportuaria: número alto de trabajadores concentrados en un área, riesgo de accidente aéreo que ocurren normalmente en el aeropuerto o en las inmediaciones, uso transitorio de las instalaciones del aeropuerto por parte de viajeros y visitantes, tráfico internacional de personas y bienes con riesgo de transmisión de enfermedades.

En este grupo de tendencias menos urgentes se destacan las tendencias 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40 del área de los servicios de extinción de incendios, tanto tecnológicas como verdes. Esta área del aeropuerto presenta unas tendencias centradas en la innovación del equipamiento y los agentes ignífugos que permitirían una mayor eficacia y eficiencia ante una respuesta de emergencia, complementada con objetivos de sostenibilidad ambiental, además de la excelencia en seguridad para el personal de bomberos. Las innovaciones se centran en cambios impulsados por tendencias como electrificación, mejora en la seguridad de los equipos, uso y apropiación de tecnologías inteligentes, aunado a capacitación avanzada.

Por último, se encuentran las tendencias 42, 43 y 45 del área de gestión de seguridad operacional, del tipo tecnológica, orientadas a compartir información entre los Estados, gracias a la implementación de un sistema de colección organizada y métodos de análisis de los peligros y la gestión de los riesgos.

Análisis y conclusiones de impacto ocupacional según la materialización de las tendencias

Respecto a los cargos impactados por las tendencias del subsector de OA, se evidencia unanimidad en las respuestas de los 32 actores participantes de los grupos focales y se concluye las 3 tendencias más relevantes identificadas:

Tabla 11. Cargos impactados por las tendencias subsector OA

Tendencia	Cargos Impactados
7. Gestión eficiente del agua, con sistemas de captación de aguas lluvia	Personal técnico, administrativo y de apoyo aeroportuario
8. Sistemas de monitoreo colaborativo de amenazas y administración de crisis entre aeropuerto, compañías aéreas y otras agencias	Seguridad operacional, gestores aeroportuarios e inspectores
2. Integración de tecnologías digitales para optimizar procesos, como internet de las cosas, <i>big data</i> , inteligencia artificial	Personal administrativo, operaciones aeroportuarias, gerentes y gestores aeroportuarios

Fuente: elaboración propia.

El análisis de los cargos impactados por las tendencias identificadas en el subsector en Colombia refleja cómo las transformaciones tecnológicas, ambientales y operativas afectan a las diversas áreas clave de un entorno aeroportuario.

Tendencia 7: gestión eficiente del agua, con sistemas de captación de aguas lluvia

Cargos impactados: personal técnico, administrativo y de apoyo aeroportuario.

La gestión eficiente del agua con captación de aguas lluvia demanda un fortalecimiento de capacidades técnicas en el personal técnico, administrativo y de apoyo aeroportuario. Se requiere, además de actualizar la infraestructura, contar con personal a cargo de la gestión del agua, lo cual involucra actividades de planificación, desarrollo, distribución y uso óptimo de los recursos hídricos. Para el cumplimiento de esta gestión, los cargos impactados deben poseer las siguientes habilidades específicas.

En el personal técnico:

- Dominio en la instalación, operación y mantenimiento de sistemas de captación, almacenamiento y tratamiento de aguas lluvia.
- Conocimiento en tecnologías de monitoreo y control de calidad del agua.
- Capacidad para realizar diagnósticos técnicos sobre el estado de la infraestructura hidráulica.
- Competencia en el manejo de *software* especializado para la modelación hidráulica y la optimización del uso del agua.

En el personal administrativo:

- Competencias en planificación estratégica y presupuestos de proyectos de gestión hídrica.
- Conocimiento en normativas y estándares ambientales nacionales e internacionales relacionados con el manejo del agua.
- Habilidad para coordinar equipos multidisciplinarios y gestionar recursos.
- Capacidad para desarrollar informes y reportes de sostenibilidad.

En el personal de apoyo:

- Capacitación en prácticas sostenibles y de uso eficiente del agua.
- Conocimiento básico en el manejo de sistemas de captación de aguas lluvia y su mantenimiento preventivo.
- Sensibilización en la importancia del ahorro y la reutilización del recurso hídrico.
- Habilidades comunicativas para promover una cultura de sostenibilidad entre los usuarios y el personal del aeropuerto.

El desarrollo de estas capacidades asegura una gestión integral del recurso hídrico, alineada con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia operacional en el sector aeroportuario.

Tendencia 8: sistemas de monitoreo colaborativo de amenazas y administración de crisis entre aeropuertos, compañías aéreas y otras agencias

Cargos impactados: seguridad operacional, gestores aeroportuarios e inspectores.

La implementación de sistemas de monitoreo colaborativo de amenazas y administración de crisis entre aeropuertos, compañías aéreas y otras agencias exige capacidades técnicas especializadas en el personal de seguridad operacional, gestores aeroportuarios e inspectores.

En seguridad operacional:

- Dominio avanzado en la gestión de SMS, incluyendo el diseño, implementación y evaluación de protocolos de seguridad.
- Capacidad para identificar, evaluar y priorizar riesgos mediante el uso de herramientas de análisis de datos y modelación predictiva.
- Competencias en gestión de crisis, incluyendo la toma de decisiones bajo presión y la coordinación con múltiples actores en tiempo real.
- Habilidades en el uso de tecnologías avanzadas como sistemas de vigilancia automática dependiente (ADS-B) y *software* de monitoreo en tiempo real para detectar amenazas.

En los gestores aeroportuarios:

- Conocimientos en administración de riesgos aeroportuarios y estrategias de mitigación basadas en análisis de datos y escenarios de simulación.
- Habilidades en la coordinación interinstitucional con compañías aéreas, agencias gubernamentales y entidades de respuesta a emergencias.
- Capacidades en planificación y ejecución de ejercicios de simulación de crisis para evaluar y fortalecer la capacidad de respuesta colaborativa.
- Familiaridad con normativas internacionales, como las regulaciones de la OACI y de las autoridades de aviación civil.

En los inspectores:

- Capacidad para realizar auditorías de seguridad y evaluar el cumplimiento de los estándares establecidos en los SMS.
- Formación en investigación de incidentes y accidentes, incluyendo análisis de causas raíz y recomendaciones correctivas.
- Competencias en el uso de herramientas tecnológicas para recopilar, procesar y analizar datos sobre amenazas y vulnerabilidades.
- Habilidad para redactar informes técnicos detallados y comunicar hallazgos de manera clara y objetiva a las partes interesadas.

Estas capacidades permiten a los equipos enfrentar desafíos de seguridad y crisis de manera proactiva, eficiente y colaborativa, promoviendo una operación aeroportuaria segura y resiliente.

Tendencia 2: integración de tecnologías digitales para optimizar procesos, como internet de las cosas, *big data*, inteligencia artificial

Cargos impactados: personal administrativo, operaciones aeroportuarias, gerentes y gestores aeroportuarios.

La integración de tecnologías digitales para optimizar procesos, como internet de las cosas, *big data* e inteligencia artificial, requiere el desarrollo de capacidades específicas en los cargos impactados para garantizar una adopción efectiva de las tecnologías y maximizar sus beneficios.

En el personal administrativo:

- Conocimiento en herramientas digitales para la automatización de procesos administrativos, como sistemas de gestión empresarial y aplicaciones basadas en inteligencia artificial.
- Competencia en el análisis de datos para la toma de decisiones, incluyendo interpretación de *dashboards* y reportes generados por herramientas de *big data*.
- Capacidad para identificar y priorizar áreas de mejora mediante el uso de tecnologías de internet de las cosas que optimicen los flujos de trabajo y el uso de recursos.
- Habilidades en gestión del cambio organizacional para facilitar la adopción de nuevas tecnologías dentro del equipo.

En las operaciones aeroportuarias:

- Dominio de tecnologías de internet de las cosas para el monitoreo en tiempo real de operaciones clave, como gestión de equipajes, control de acceso y optimización del tráfico en pistas y terminales.
- Competencia en el uso de plataformas de inteligencia artificial para anticipar y responder a incidentes operativos o problemas de capacidad en los aeropuertos.
- Habilidad para trabajar con sistemas de análisis predictivo y gestión de recursos, mejorando la eficiencia y reduciendo tiempos de espera.
- Capacidades técnicas para la integración de nuevas tecnologías 5G en sistemas críticos de comunicación y operación.

En los gerentes y gestores aeroportuarios:

- Conocimiento estratégico en la implementación de soluciones basadas en *big data* e inteligencia artificial para la optimización de recursos humanos y materiales.
- Habilidad para desarrollar e implementar estrategias digitales orientadas a la sostenibilidad, eficiencia y mejora de la experiencia del pasajero.
- Competencias en la supervisión de proyectos tecnológicos, asegurando el cumplimiento de plazos, presupuestos y objetivos.
- Habilidad para liderar equipos multidisciplinarios que colaboren en la adopción e integración de tecnologías emergentes.

- Familiaridad con regulaciones internacionales y estándares relacionados con la implementación de sistemas tecnológicos avanzados en aeropuertos.

La transformación digital y sostenible en el sector aeroportuario está directamente vinculada con el desarrollo de capacidades específicas en los cargos impactados: las tendencias analizadas, como la gestión eficiente del agua, los sistemas de monitoreo colaborativo y la integración de tecnologías digitales, requieren personal técnico, administrativo y operativo con habilidades especializadas en el uso de nuevas herramientas y metodologías. Esto demanda una inversión significativa en formación, actualización profesional y adquisición de competencias en tecnologías emergentes como internet de las cosas, *big data* e inteligencia artificial, así como en la gestión de recursos sostenibles. La capacitación adecuada y la integración de equipos multidisciplinarios son clave para garantizar la eficacia en la implementación de estas tendencias.

El éxito de las tendencias depende de una coordinación efectiva y liderazgo estratégico en los cargos clave: gerentes, gestores aeroportuarios y líderes de seguridad operacional desempeñan un rol fundamental en la planificación y supervisión de estas innovaciones, con su capacidad para liderar la adopción de tecnologías, gestionar recursos de manera eficiente y promover una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad y la digitalización es crucial. La sinergia entre equipos técnicos, administrativos y operativos asegura no solo la eficiencia de los procesos, sino también una adaptación ágil a los desafíos emergentes en un entorno altamente dinámico como el aeroportuario.

Tendencias del subsector seguridad de la aviación civil (AVSEC)

Tendencias desde fuentes secundarias

Sistema de gestión de la seguridad de la aviación civil, Anexo 17 de la OACI, RAC 160 y Plan Global para la Seguridad de la Aviación Civil (GASeP)

- Mayor énfasis en la evaluación de amenazas emergentes y gestión de riesgos de seguridad de forma proactiva.

- Implementación de nuevas tecnologías para detección de explosivos, armamento, materiales peligrosos. Por ejemplo: escáneres 3D, equipos ETD, CCTV inteligente.
- Mejoras en los procesos de control de accesos a áreas restringidas. Uso de sistemas biométricos, lectores de tarjetas, puertas automáticas.
- Fortalecimiento de los sistemas de verificación de antecedentes de personas que acceden a zonas de seguridad restringidas.
- Mayor coordinación y cooperación con otras instituciones de seguridad y policía para enfrentar amenazas.
- Estándares más rigurosos para el control de calidad de los equipos de seguridad.
- Capacitación continua y especializada del personal de seguridad aeroportuaria.
- Auditorías periódicas a los procedimientos y sistemas de gestión de la seguridad de la aviación.
- Intercambio de mejores prácticas en seguridad aeroportuaria mediante estudios comparativos con otros aeropuertos.

En resumen, el enfoque es fortalecer continuamente los sistemas de seguridad, siguiendo estándares globales y anticiparse a las nuevas amenazas.

Tecnología avanzada para la seguridad de los pasajeros y las mercancías, de acuerdo con el Plan Global para la Seguridad de la Aviación Civil (GASeP)

- Scanners 3D de cuerpo entero para detección de objetos ocultos sin necesidad de desvestirse. Ofrecen imágenes más nítidas que los equipos 2D.
- Sistemas de detección de explosivos y narcóticos basados en tecnologías como espectrometría de movilidad iónica (IMS) y espectroscopia Raman.
- Uso de tomografía computarizada para inspección de equipaje de mano y detectar explosivos líquidos y artículos prohibidos.
- Sistemas biométricos (reconocimiento facial, iris, huella) integrados con bases de datos para identificación de personas.
- Inteligencia artificial y machine learning para analizar imágenes y detectar comportamientos sospechosos en tiempo real.
- Tecnología RFID para rastreo y trazabilidad de equipajes y carga. Permite identificar anomalías.

- Herramientas de detección de ciberamenazas para monitorear y proteger los sistemas informáticos críticos de los aeropuertos.
- Equipos portátiles y móviles para análisis e inspección en plataforma y otras áreas remotas del aeropuerto.

En conclusión, las tecnologías buscan agilizar los procesos de detección maximizando la seguridad. Se requiere personal capacitado y procedimientos robustos.

Seguridad cibernética para los sistemas de información y comunicación de posibles ataques, Plan Global para la Seguridad de la Aviación Civil (GASeP)

- Implementación de *firewalls* de nueva generación e IPS para monitorear y prevenir intrusiones.
- Sistemas de detección y prevención de intrusos (IDS/IPS) para identificar y bloquear ataques en tiempo real.
- Monitoreo continuo de la red para detectar actividades anómalas y amenazas mediante SIEM.
- Cumplimiento de estándares internacionales como ISO 27001 en gestión de seguridad de la información.
- Capacitación al personal sobre amenazas cibernéticas y buenas prácticas de seguridad informática.
- Autenticación multifactor para acceso a sistemas críticos. Utiliza técnicas biométricas y tokens.
- Respuesta a incidentes mediante SOC (Security Operations Centers) para investigar y remediar ataques.
- Pruebas de penetración ética periódica para evaluar la seguridad de infraestructura y aplicaciones.
- Copias de seguridad y planes de continuidad del negocio ante eventos como ransomware.
- Controles estrictos sobre dispositivos extraíbles y acceso remoto para reducir superficie de ataque.

En conclusión, un enfoque de seguridad integral, capacitación y vigilancia constante es esencial frente a las ciberamenazas.

Fomento de la colaboración a través de la implementación de sistemas de intercambio de información y de coordinación de operaciones AVSEC para la detección y respuesta ante posibles amenazas, Plan Global para la Seguridad de la Aviación Civil (GASeP) y estudios de seguridad

- Plataformas seguras de comunicación en tiempo real entre aeropuertos, líneas aéreas, autoridades y agencias de seguridad. Permite intercambio de alertas.
- Sistemas automáticos de detección temprana de amenazas mediante análisis de bases de datos de pasajeros y carga.
- Coordinación de protocolos conjuntos de respuesta ante incidentes de seguridad entre actores involucrados.
- Simulacros conjuntos entre aerolíneas, aeropuerto, policía, aduanas, para entrenar respuesta coordinada.
- Comités operativos para diseñar e implementar mejoras a los procesos y tecnologías de detección.
- Programas de capacitación estandarizados entre el personal de distintas aerolíneas y agencias del aeropuerto.
- Acuerdos interinstitucionales para intercambio de información de inteligencia sobre posibles amenazas.
- Auditorías e inspecciones conjuntas para evaluar fallas y oportunidades en los sistemas de seguridad.
- Intercambio de mejores prácticas mediante conferencias, publicaciones y estudios comparativos entre aeropuertos.

En síntesis, compartir información, capacitación y trabajo en equipo entre todas las organizaciones es indispensable para una seguridad efectiva.

Formación y capacitación del personal AVSEC. Plan Global para la Seguridad de la Aviación Civil (GASeP)

- Entrenamiento en nuevas tecnologías de detección como escáneres 3D, sistemas biométricos, Inteligencia Artificial. Enfocado en su correcta operación y mantenimiento.
- Formación especializada en análisis de imágenes de rayos X, detección de comportamientos sospechosos y evaluación de riesgos.

- Simulacros frecuentes en equipo para preparación y respuesta ante diversos escenarios de amenazas.
- Capacitación en técnicas de investigación e interrogatorio para entrevistas a pasajeros de alto riesgo.
- Cursos de actualización en identificación de explosivos, armas, y tácticas de contrabando.
- Entrenamiento en amenazas cibernéticas, *hacking* y protección de sistemas de información.
- Formación en aspectos legales, éticos y de derechos humanos en la labor de seguridad aeroportuaria.
- Desarrollo de habilidades blandas como trabajo en equipo, manejo de estrés, y servicio al cliente.

En conclusión, se requiere una capacitación integral, actualizada y con enfoque práctico para contar con personal AVSEC de clase mundial.

Automatización de procesos de facilitación en aeropuertos Anexo 11 de la OACI, RAC 209

- Sistemas automáticos de control fronterizo, como E-Gates para cruce de pasajeros mediante biometría sin intervención humana.
- Tecnologías de autoservicio (*self-service*) para chequeo de pasajeros y equipaje. Permiten imprimir etiquetas y despachar maletas autónomamente.
- Quioscos interactivos y totems para que el pasajero realice consultas, cambios en vuelos, solicitud de servicios durante su viaje.
- Digitalización de la documentación de viaje y aduanera, mediante aplicaciones móviles que almacenan carnés de vacunación, pasaportes electrónicos, declaraciones de aduana, etc.
- Automatización del control de pasaportes a través de sistemas de lectura óptica, validación biométrica y bases de datos de INTERPOL/Policia.
- Chatbots y asistentes virtuales para orientar a los viajeros en trámites aeroportuarios durante toda su experiencia de viaje.
- *Blockchain* para compartir datos aduaneros y migratorios entre instituciones gubernamentales y aeroportuarias.
- Análisis de datos (*Big Data*) para modelar y predecir los tiempos de espera en distintos procesos.

En resumen, hay una tendencia hacia la digitalización, automatización y uso de datos para agilizar los procesos aeroportuarios.

Implementación de sistemas de gestión de fronteras Anexo 11 de la OACI, RAC 209

- Sistemas automatizados de control de pasaportes y visados mediante lectores de documentos electrónicos, bases de datos biométricas y *blockchain*.
- Integración de sistemas de información entre instituciones de migración, aduanas, aerolíneas y aeropuertos para intercambio seguro de datos.
- Evaluación de riesgos previa a la llegada de pasajeros mediante análisis avanzado de datos e inteligencia artificial.
- Tecnologías como escaneo facial y lectura del iris para identificación y autenticación biométrica de pasajeros.
- Quioskos y medios digitales para declaraciones aduaneras, impuestos de viajes y trámites de solicitud de ingreso.
- Canales automáticos como e-Gates para cruce de frontera sin interacción humana, mediante biometría.
- Monitorización en tiempo real de flujos de pasajeros, colas y tiempos de espera para una asignación dinámica de recursos.
- Trazabilidad de pasajeros y equipajes sospechosos mediante etiquetas RFID.
- Equipos móviles para oficiales de migración y aduanas, permitiendo verificar información en pocos segundos.

En síntesis, existe un impulso hacia la automatización, la colaboración interinstitucional y el análisis de datos para facilitar el cruce fronterizo.

Tecnologías móviles para la facilitación en aeropuertos fronteras

- Aplicaciones móviles de las aerolíneas para que el pasajero gestione en su smartphone la documentación de viaje, check-in y pase de abordar.
- Uso de tablets y dispositivos móviles por autoridades de migración y aduanas para verificar en tiempo real información de pasajeros y cruces fronterizos.
- Lectores de códigos QR en pasaportes, visados o certificados de vacunación, mediante dispositivos móviles, para validar su autenticidad.

- Apps oficiales que contengan información biométrica del pasajero como pasaporte electrónico aceptado por los sistemas aeroportuarios.
- Portales de autoregistro de información personal y aduanera mediante teléfonos inteligentes, para agilizar trámites de ingreso.
- Sistemas de validación de identidad mediante reconocimiento facial en dispositivos móviles.
- Beacons, Bluetooth para proporcionar al pasajero información relevante en su teléfono cuando se acerca a un punto de control.
- Pagos vía móvil para tasas aeroportuarias, impuestos migratorios o de aduanas.

En resumen, el objetivo es aprovechar la tecnología móvil que ya poseen los pasajeros para agilizar los procesos y reducir tiempos de espera y trabajar de forma proactiva, colaborativa e integrada entre todos los actores del aeropuerto.

Tecnologías de facilitación en aeropuertos para pasajeros, mercancías y los elementos que llevan, de acuerdo con el Anexo 11 de la OACI, RAC 209

- Sistemas biométricos (reconocimiento facial, iris, huella digital) para identificar a los pasajeros en los puntos de control.
- Escaneo 3D de equipaje de mano para detectar artículos prohibidos sin necesidad de abrir las maletas.
- Portales de autoservicio y quioscos interactivos para que los pasajeros realicen *check-in* y aduana sin contacto humano.
- Etiquetas RFID y GPS para seguimiento en tiempo real de equipajes y carga dentro del aeropuerto.
- Portales web y aplicaciones móviles para que los pasajeros completen previamente documentos de viaje y aduaneros.
- Sistemas de información compartidos entre instituciones gubernamentales para validación anticipada de requisitos de entrada a un país.
- Tecnología *blockchain* para compartir datos de pasajeros y carga de manera segura e inmutable entre las partes autorizadas.
- Inteligencia artificial y *machine learning* para analizar datos y modelar comportamientos, prediciendo tiempos de espera.
- Salas de inspección y escáneres CT para revisión no intrusiva de equipajes sospechosos.

En resumen, las tecnologías buscan agilizar al máximo el movimiento seguro de personas y bienes en la frontera aeroportuaria.

Servicios de sanidad en aeropuertos de acuerdo con el Anexo 11 de la OACI, RAC 209

- Implementación de tecnologías para detección temprana de posibles riesgos sanitarios en pasajeros, como cámaras térmicas y sensores biométricos.
- Procesos digitalizados para que los pasajeros envíen previamente certificados de vacunación y visas médicas a las autoridades sanitarias.
- Estaciones de autogestión para que los pasajeros realicen autoevaluaciones de salud y riesgo epidemiológico.
- Utilización de simulacros y ejercicios conjuntos con autoridades sanitarias para preparación y respuesta ante posibles pandemias.
- Creación de instalaciones médicas y de cuarentena dentro de los aeropuertos para atender emergencias de salud.
- Coordinación entre aeropuertos para intercambio de información en tiempo real sobre posibles amenazas de salud pública.
- Capacitación al personal aeroportuario sobre protocolos de higiene, uso de equipos de protección personal y detección de síntomas.
- Campañas informativas a los pasajeros sobre medidas preventivas, mediante pantallas, folletos y anuncios en el aeropuerto.

En síntesis, existe un mayor énfasis en la preparación ante posibles riesgos sanitarios emergentes.

Nuevos perfiles que se requerirán en el mediano y largo plazo para implementar la nueva facilitación

- Especialistas en tecnologías emergentes como biometría, inteligencia artificial, *blockchain*, para diseñar e integrar nuevos sistemas.
- Analistas de datos, que puedan procesar y extraer información valiosa de grandes volúmenes de datos sobre pasajeros y operaciones, habilidades más especializadas en tecnología digital y la ciberseguridad.
- Especialistas en ciberseguridad para proteger la confidencialidad e integridad de los sistemas e información compartida.

- Ingenieros de sistemas y redes para integrar y mantener la creciente infraestructura tecnológica.
- Administradores aeroportuarios con conocimientos actualizados en tendencias de facilitación y marcos regulatorios.
- Asesores y consultores en innovación, que identifiquen nuevas soluciones para optimizar los procesos.
- Gestores de proyectos especializados en implementación de iniciativas de transformación digital de gran escala.
- Profesionales en talento humano y cambio cultural, para guiar la adaptación de los equipos a los nuevos procesos.
- Especialistas en experiencia del pasajero, para diseñar servicios centrados en sus necesidades.

En conclusión, se requerirán perfiles más tecnológicos, analíticos y con mentalidad innovadora.

Formación del personal de servicios médicos aeroportuarios Plan Global de Seguridad Operacional (GANP) RAC 209 FAL

- Capacitación en primeros auxilios, RCP, manejo de desfibrilador externo automático (DEA) y otras técnicas de emergencia.
- Entrenamiento en el manejo de incidentes con múltiples víctimas y planes de respuesta médica ante emergencias.
- Actualización periódica en enfermedades infecciosas, protocolos de cuarentena y mitigación de riesgos de salud pública (RSI OMS).
- Procedimientos de notificación y reporte de incidentes médicos según regulaciones aeronáuticas. Manejo de la *Big Data*.
- Capacitación en factores humanos y recursos de tripulación para atención de pasajeros con necesidades especiales.
- Entrenamiento en el uso y mantenimiento de equipos médicos de emergencia utilizados en aeropuertos.
- Énfasis en la mejora continua, protocolización de procesos y medición de indicadores de los servicios médicos.

En resumen, la capacitación debe enfocarse tanto en habilidades técnicas como en gestión de procesos e integración de nuevas tecnologías médicas.

Análisis IMI

Esta sección aborda el análisis de la materialización e impacto de las tendencias identificadas en el subsector AVSEC, considerando el proceso de validación y las contribuciones realizadas por expertos provenientes del ámbito académico, institucional y empresarial del sector.

La materialización de las tendencias se evalúa según la percepción de los expertos respecto al marco temporal en el cual podrían concretarse o comenzarían a generar impactos significativos. Para este propósito, el estudio de prospectiva clasifica los horizontes temporales en corto plazo (0-6 meses), mediano plazo (1-2 años) y largo plazo (3-5 años), de acuerdo con la metodología empleada en este estudio de prospectiva.

La representación gráfica de las variables de materialización e impacto en el capital humano de las tendencias específicas del sector se hizo a partir del cálculo del promedio de cada variable. Estos valores promedio se emplean como referencia en la gráfica, dividiendo el espacio en cuatro cuadrantes que describen las tipologías de materialización e impacto de las tendencias: a) tendencias de acción inmediata, b) tendencias de acción necesaria, c) estrategias de largo plazo, y d) tendencias menos urgentes.

Tabla 12. Tendencias subsector AVSEC

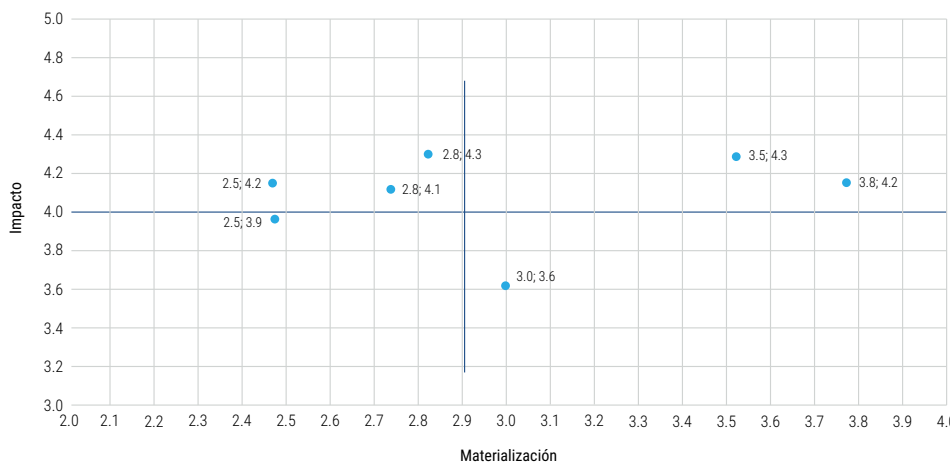
N.º	Gran tendencia	Tendencia específica	Categoría
1	Inteligencia artificial e internet de las cosas	Implementación de aeropuertos 4.0 para mejorar el servicio	Tecnológicas
		Nuevas tecnologías para facilitar los procesos de inspección para los pasajeros	Tecnológicas
2	Automatización	Proceso de migración ágil con el sistema de reconocimiento de retina	Tecnológicas
3	Ciberseguridad	Garantizar la protección de la información y evitar amenazas cibernéticas	Tecnológicas
4	<i>Big data</i>	Sistemas de gestión de seguridad de la aviación (SeMS)	Organizacional
		Evaluación de riesgos en seguridad de la aviación	Organizacional

N.º	Gran tendencia	Tendencia específica	Categoría
5	Big data	Cooperación regional para el intercambio de información y mejores prácticas	Organizacional
6		Minimizar el impacto ecológico en las actividades AVSEC	Verde

Fuente: elaboración propia.

La identificación de tendencias se llevó a cabo a través de la búsqueda en fuentes académicas en una ventana de tiempo de 3 años aproximadamente, con el fin de revisar los documentos recientemente publicados. En la tabla se presenta la clasificación de grandes tendencias, sus tendencias específicas y su categoría (organizaciones, tecnológicas y verdes).

Ilustración 9. Matriz de clasificación IMI del subsector AVSEC



Fuente: elaboración propia, a partir de resultados de grupos de prospectiva.

Tabla 13. Tendencias clasificadas subsector AVSEC

Número	Nombre tendencias específicas
1	Implementación de aeropuertos 4.0 para mejorar el servicio
2	Nuevas tecnologías para facilitar los procesos de inspección para los pasajeros
3	Proceso de migración ágil con el sistema de reconocimiento de retina
4	Garantizar la protección de la información y evitar amenazas cibernéticas
5	SeMS
6	Evaluación de riesgos en seguridad de la aviación
7	Cooperación regional para el intercambio de información y mejores prácticas
8	Minimizar el impacto ecológico en las actividades AVSEC

Fuente: elaboración propia.

A partir de las 4 grandes tendencias y las 8 tendencias específicas, se identificó su materialización a corto, mediano o largo plazo, así como su impacto en el capital humano dentro del sector ambiental. A continuación, se presentan los resultados del cruce entre las variables y la relación de las tendencias en las cuatro tipologías de materialización:

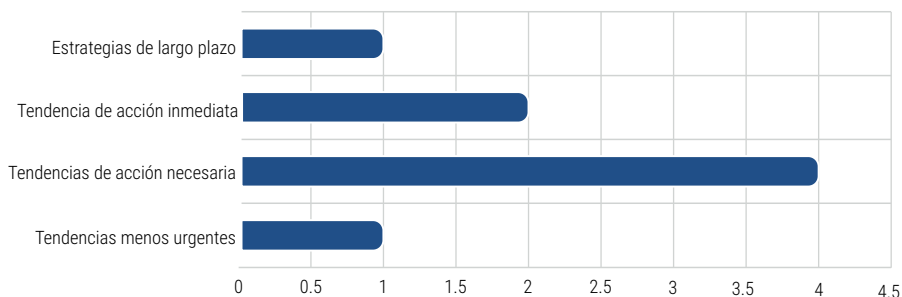
Tabla 14. Materialización de las tendencias AVSEC

Etiquetas de fila	Cantidad	%
Tendencia de acción inmediata	2	25
Tendencia de acción necesaria	4	50
Tendencia menos urgente	1	12
Estrategias de largo plazo	1	13
Total general	8	100

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados del cruce entre las variables y la relación de las tendencias en las cuatro tipologías de materialización.

Ilustración 10. Categorización de las tendencias subsector AVSEC



Fuente: elaboración propia.

Tendencias de acción inmediata

Esta categoría agrupa las tendencias que presentan un promedio de materialización superior a 2.9, lo cual indica que se espera su concreción en el corto o mediano plazo. Asimismo, tienen un promedio de impacto en el capital humano superior a 4.1, que resalta su alta importancia en relación con las acciones necesarias para fortalecer el talento humano.

Las tendencias específicas clasificadas en esta tipología representan el 25% de las validadas por los expertos y actores del subsector:

5. SeMS.
6. Evaluación de riesgos en seguridad de la aviación.

Al analizar las tendencias que surgen como resultado, se observa la necesidad de implementar actividades inmediatas en materia organizacional y de gestión de la seguridad, lo cual fundamenta la importancia de la capacitación de estos temas para todo el personal inmerso en el subsector.

Tendencias de acción necesaria

En estas se enmarcan aquellas que presentan materialización por debajo del promedio general (2,9) y con promedio en el impacto de capital humano por encima del promedio general (4,1). Se incluyen en esta tipología 4 tendencias que

congregan el 50% de las validadas por los expertos y actores del subsector, y son las siguientes:

2. Nuevas tecnologías para facilitar los procesos de inspección para los pasajeros.
3. Proceso de migración ágil con el sistema de reconocimiento de retina.
4. Garantizar la protección de la información y evitar amenazas cibernéticas.
8. Minimizar el impacto ecológico en las actividades AVSEC.

Las tendencias de acción necesarias están relacionadas con un importante componente de desarrollo tecnológico y ambiental aplicado a la seguridad operacional en inspección de pasajeros, migración ágil, protección de información y uso correcto de la tecnología para disminuir el impacto de residuos ambientales.

Tendencias menos urgentes

Son las tendencias que se sitúan por debajo del promedio frente al impacto del capital humano (4,1) y del promedio de materialización (2,9). Se estima que las tendencias ubicadas en esta tipología se desarrollaran en el mediano plazo. En esta tipología se incluye 1 tendencia que representan el 12% de las validadas por los expertos y actores del subsector:

1. Implementación de aeropuertos 4.0 para mejorar el servicio.

En esta tendencia se debe proyectar la modernización de los aeropuertos que cumplan con una infraestructura tecnológica con niveles de sistemas automatizados en los procesos de embarque y demás entornos en los cuales los usuarios gocen de mayor autonomía en la toma de un servicio de transporte aéreo. Para ello, se debe contar con inversiones a nivel tecnológico y organizacional de la nación.

Estrategias de largo plazo

Son las tendencias que se sitúan por debajo del promedio frente al impacto del capital humano (4,1) y del promedio de materialización (2,9). Se estima que las tendencias ubicadas en esta tipología se desarrollaran en el mediano plazo. En esta tipología se incluye una tendencia que representa el 13% de las validadas por los expertos y actores del subsector:

7. Cooperación regional para el intercambio de información y mejores prácticas.

Esta tendencia sería producto del desarrollo tecnológico, organizacional y ambiental de las naciones de la región y su compromiso de cooperación.

Análisis y conclusiones de impacto ocupación según la materialización de tendencias

Ante la pregunta: ¿qué tipo de cargo se ve modificado o afectado?, se evidencia unanimidad en las respuestas de los 26 actores participantes de los grupos focales y se concluye lo siguiente:

- No se prevé la creación de cargos nuevos, sino la transformación de los cargos existentes.
- Los cargos de no profesionales relacionados con el subsector AVSEC corresponden a los más impactados, tras la materialización de las tendencias del sector tecnológico, puesto que requieren habilidades en el manejo de sistemas de CCTV y vigilancia computarizada asistida por inteligencia artificial para el cumplimiento de las actividades asignadas a los nuevos puestos de trabajo.

Los actores perciben que los nuevos conocimientos son resultado del impacto de las tendencias, cada uno identificando aquellas de mayor relevancia. Esto conduce a una diversificación de conocimientos, donde se destacan principalmente los técnicos en áreas como *big data*, inteligencia artificial, automatización y ciberseguridad.

El estudio sobre el impacto ocupacional en el subsector AVSEC revela que la materialización de las tendencias tecnológicas no implica la creación de nuevos cargos, sino la transformación funcional de los existentes, especialmente aquellos de carácter operativo y no profesional. Los perfiles relacionados con vigilancia y control se ven altamente impactados por la incorporación de sistemas CCTV inteligentes y plataformas de monitoreo asistidas por inteligencia artificial, lo cual exige competencias en automatización, ciberseguridad, análisis de datos y gestión digital de procesos. Esta evolución genera una diversificación significativa de conocimientos técnicos, destacando áreas como *big data*, inteligencia artificial y tecnologías emergentes aplicadas a la seguridad operacional, que demanda una

inversión sostenida en formación especializada y actualización profesional para garantizar la adaptación del talento humano.

En cuanto a la clasificación de tendencias según su nivel de urgencia, se identifican cuatro categorías estratégicas. Las tendencias de acción inmediata (SeMS y evaluación de riesgos) requieren capacitación prioritaria en gestión de seguridad y análisis de riesgos para todo el personal AVSEC. Las tendencias de acción necesaria (tecnologías para inspección, biometría, ciberseguridad y sostenibilidad) exigen respuestas rápidas orientadas a la adopción tecnológica y la protección de datos. Las tendencias menos urgentes, como la implementación de aeropuertos 4.0, implican inversiones a mediano plazo en infraestructura automatizada, mientras que las estrategias de largo plazo, como la cooperación regional, dependen de la madurez tecnológica y organizacional de los países y de la consolidación de mecanismos de gobernanza colaborativa. Este panorama confirma que la transformación del subsector AVSEC está estrechamente vinculada con la digitalización, la sostenibilidad y la gestión estratégica del talento humano, factores clave para garantizar la eficiencia y resiliencia del sistema en un entorno global altamente dinámico.

Conclusiones

El sector aeronáutico se encuentra en una fase de transición hacia la Industria 4.0, caracterizada por la integración de tecnologías disruptivas como internet de las cosas, inteligencia artificial, robótica, *blockchain* y fabricación aditiva, junto con enfoques de ecodiseño y sostenibilidad ambiental. Esta evolución impactará de manera directa los modelos de negocio, la gestión de procesos y la estructura organizacional, promoviendo prácticas como la trazabilidad total de componentes, la reducción del mantenimiento no programado y la optimización de inventarios globales. La implementación de estas herramientas exige un compromiso estratégico con la innovación tecnológica, la optimización organizacional y la colaboración intersectorial, orientando al sector hacia operaciones más productivas, seguras y sostenibles.

La materialización de tendencias como *blockchain* para trazabilidad, internet de las cosas y monitoreo estructural, gemelos digitales, fabricación aditiva, automatización en inspección y SCM 4.0 no conduce a la creación de nuevos cargos, sino a la reconversión funcional de perfiles existentes en ingeniería, mantenimiento, calidad, certificación y logística. Los ocupantes de estos puestos requieren una actualización profunda de competencias en gestión de datos y simulación, integración de sistemas, metrología digital, aseguramiento de la calidad basado en evidencia y operación de procesos automatizados. Adicionalmente, la transición ambiental (ecodiseño, circularidad, materiales compuestos y aleaciones de alta eficiencia, y preparación para energías limpias) impacta directamente a diseño, producción y mantenimiento, obligando a incorporar conocimientos de ciclo de vida, normativa ambiental internacional y criterios de sostenibilidad en la ingeniería y la gestión de la cadena de suministro.

La optimización del plan de servicios de navegación aérea, la aplicación de ADSB y la integración digital CNS-Meteorología con cobertura satelital producen una transformación profunda en ATC, AIM, MET y ATSEP, lo cual orienta sus perfiles hacia la interoperabilidad de sistemas, el análisis de datos en tiempo real, la operación de plataformas digitales y la gestión de información aeronáutica conforme a estándares internacionales. Para asegurar continuidad operacional y niveles de seguridad adecuados, se requiere capacitación específica en vigilancia

dependiente, integración de datos meteorológicos, ciberseguridad y calidad de servicio de telecomunicaciones aeronáuticas. En paralelo, directores regionales y responsables de telecomunicaciones deben ejercer un liderazgo de implementación tecnológica con enfoque de gobernanza y alineación regulatoria (por ejemplo, OACI, documentos 4444 y 9881), garantizando interoperabilidad entre sistemas CNS, vigilancia y meteorología, y orquestando la coordinación interinstitucional necesaria para la eficiencia y sostenibilidad del sistema.

La transformación digital y sostenible del entorno aeroportuario exige una reconfiguración integral de capacidades en niveles técnicos, administrativos y operativos, impulsada por la gestión eficiente de recursos (por ejemplo, agua y energía), monitorización colaborativa y integración de tecnologías emergentes (internet de las cosas, *big data* e inteligencia artificial). Esto requiere inversión continua en formación y actualización profesional, incorporación de metodologías de gestión de activos y procesos basados en datos, y conformación de equipos multidisciplinarios capaces de asegurar interoperabilidad tecnológica y excelencia operacional. El éxito de esta transición depende de gestores aeroportuarios y líderes de seguridad operacional con capacidad de conducción estratégica, administración eficiente de recursos y promoción de una cultura organizacional orientada a sostenibilidad, innovación y resiliencia, como condición para mantener la competitividad frente a un entorno dinámico de la aviación global.

El impacto ocupacional derivado de las tendencias tecnológicas se manifiesta como transformación de cargos existentes, particularmente en perfiles no profesionales vinculados a vigilancia y control. La adopción de sistemas CCTV inteligentes y plataformas de monitoreo asistidas por inteligencia artificial exige capacidades en automatización, ciberseguridad, análisis de datos y gestión digital de procesos, junto con protocolos de respuesta y aseguramiento de la información. Esta diversificación de conocimientos demanda programas de formación especializada y actualización continua para garantizar que el talento humano pueda desempeñarse eficazmente en entornos de seguridad operacional más complejos y altamente digitalizados, sin que ello implique la creación de nuevas estructuras ocupacionales, sino su elevación de competencias y adaptación funcional.

Referencias

- Aeronáutica Civil (Aerocivil). (2020a). *Plan de Navegación Aérea para Colombia*. Unidad Administrativa Especial de Aerocivil.
- Aeronáutica Civil (Aerocivil). (2020b). *RAC 203. Servicio meteorológico para la navegación aérea*. Unidad Administrativa Especial de Aerocivil.
- Aeronáutica Civil (Aerocivil). (2020c). *RAC 215. Servicios de información aeronáutica*. Unidad Administrativa Especial de Aerocivil.
- Aeronáutica Civil (Aerocivil). (2021b). *GEN 3.3. Servicios de tránsito aéreo*. Unidad Administrativa Especial de Aerocivil.
- Aeronáutica Civil (Aerocivil). (2021c). *GEN 3.4. Servicios de comunicaciones y navegación*. Unidad Administrativa Especial de Aerocivil.
- Aeronáutica Civil (Aerocivil). (2022c). *GEN 3.5 Servicios Meteorológicos*. Unidad Administrativa Especial de Aerocivil.
- Aeronáutica Civil (Aerocivil). (2022d). *Implementación ADS-B Colombia* (vol. 1). Unidad Administrativa Especial de Aerocivil.
- Aeronáutica Civil (Aerocivil). (2023). *RAC 210. Telecomunicaciones aeronáuticas* (enmienda 2). Unidad Administrativa Especial de Aerocivil.
- Ahmed, W. (2025). Artificial Intelligence in Aviation: A Review of Machine Learning and Deep Learning Applications for Enhanced Safety and Security. *Premier Journal of Artificial Intelligence*, 3, 100013.
- Amthiou, H., Arioua, M., & Benbarrad, T. (2023). Digital Twins in Industry 4.0: A Literature Review. *ITM Web of Conferences*, 52, 01002.
- Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA). (2024). *Global Outlook for Air Transport*. IATA.
- Autoridades de Aviación Civil de la Región SAM. (2015). *Manual para servicios de tránsito aéreo del LAR 210*. Autoridades de Aviación Civil de la Región SAM.
- Autoridades de Aviación Civil de la Región SAM. (2017). *LAR 203. Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional*. Autoridades de Aviación Civil de la Región SAM.
- Beiderbeck, D., Frevel, N., von der Gracht, H., Schmidt, S. L., & Schweitzer, V. M. (2021). Preparing, Conducting, and Analyzing Delphi Surveys: Cross-Disciplinary Practices, New Directions, and Advancements. *MethodsX*, 8, 101401.
- Calvet, L. (2024). Towards Environmentally Sustainable Aviation: A Review on Operational Optimization. *Future Transportation*, 4(2), 518–547.
- European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2023). *NPA 2023-02: Training the next generation of ATCOs-CBTA and virtualisation*. European Union Aviation Safety Agency.
- Fang, Z. (2024). The Impact of AI on the Aviation Industry: Opportunities and Challenges for a Sustainable Future. *Engineering Proceedings*, 80(1), 2.
- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). (2018a). *Documento 9161: Manual sobre los servicios de navegación aérea*. OACI.

- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). (2018b). *Documento 9734: Manual sobre la gestión de la seguridad operacional y supervisión*. OACI.
- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). (2025). *A42-WP/474: Need to Update Competency Frameworks for Aviation Personnel in Accordance with New Trends in AI*. Working Paper, 42nd Assembly.
- Revista InterXtra Aviación. (2025). *Perspectivas del sector aeronáutico para 2025: estabilidad con desafíos clave*. Revista InterXtra Aviación. <https://www.ixaviacion.com/inicio-blog/perspectivas-del-sector-aeronautico-para-2025-estabilidad-con-desafios-clave>
- S&P Global. (2025). *Decarbonizing Aviation: Scale-Up Costs-Biggest Challenge to Progress. Special Report*. S&P Global.
- Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques (SITA). (2024). *Air Transport IT Insights 2024*. SITA.
- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC). (2023). *Plan Estratégico Aeronáutico 2030: Armonizado con el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. UAEAC. <https://www.aerocivil.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=13732>
- World Economic Forum. (2025). *Global Aviation Sustainability Outlook 2025*. World Economic Forum.
- Ziakkas, D., Flores, A., & Suckow, M. W. (2023). The Implementation of CBTA Framework in Aviation Human Systems. En Tareq Ahram, Waldemar Karwowski, Pepetto Di Bucchianico, Redha Tair, Luca Casarotto and Pietro Costa (Eds.), *Intelligent Human Systems Integration: Integrating People and Intelligent Systems* (pp. 862-868). International Conference AHFE Open Access (vol. 69), Estados Unidos.

Lista de siglas

UAEAC	Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil
CEA	Centro de Estudios Aeronáuticos
CNS/ATM	Comunicaciones, Navegación, Vigilancia y Gestión del Tráfico Aéreo
IMI	Análisis Impacto, Madurez, Incidencia
ATM	<i>Air Traffic Management</i> o Gestión del Tráfico Aéreo
RAC	Reglamentos Aeronáuticos de Colombia
ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance-Broadcast</i> o vigilancia dependiente automática por radiodifusión
CBTA	<i>Competency-Based Training and Assessment</i> o formación y evaluación basada en competencias
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
SAF	Sustainable Aviation Fuel o combustibles de aviación sostenibles
IATA	<i>International Air Transport Association</i> o Asociación Internacional de Transporte Aéreo
SITA	Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques
CCAYP	Construcción y conservación de aeronaves y partes
SMS	<i>Safety Management System</i> o Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional
SAR	<i>Search and Rescue</i> o búsqueda y salvamento
MET	Servicio de meteorología aeronáutica
SSP	<i>State Safety Programme</i> o Programa de Seguridad Estatal
PEGASO	Programa del Estado para la Gestión de la Seguridad Operacional
ATC	<i>Air Traffic Control</i> o control de tráfico aéreo
PBN	<i>Performance-Based Navigation</i> o navegación basada en el rendimiento
ATSEP	<i>Air Traffic Safety Electronics Personnel</i> o profesionales en electrónica para la seguridad del tráfico aéreo
GASP	<i>Global Aviation Safety Plan</i> o plan global para la seguridad operacional de la aviación
RSI	Reglamento Sanitario Internacional
SeMS	<i>Security Management System</i> o sistemas de gestión de seguridad
CCTV	Circuito cerrado de televisión

Información de autores

Angélica María Palacios Martínez. Doctora en Ciencias aplicadas a la Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada. Docente del Centro de Estudios Aeronáuticos (CEA). Líder del grupo de Investigación GINA de la Unidad Administrativa Especial de Aeronautica Civil de Colombia (UAEAC).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3698-9466>

Correo electrónico: angelica.palacios@aerocivil.gov.co

Betty Barrios Salcedo. Magíster en Educación de la Pontificia Universidad Javeriana, Coordinadora de Autoevaluación y Aseguramiento de la Calidad del Centro de Estudios Aeronáuticos (CEA). Inspectora de Seguridad de la Aviación Civil. Investigadora del grupo de Investigación GINA de la Unidad Administrativa Especial de Aeronautica Civil de Colombia (UAEAC).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4959-3286>

Correo electrónico: betty.barrios@aerocivil.gov.co

Mariela Inés Rodríguez Acosta. Magíster en Docencia Universidad de la Salle. Docente Centro de Estudios Aeronáuticos (CEA). Investigadora del Grupo de Investigación Aeronáutica (GINA) del CEA.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8720-0547>

Correo electrónico: mariela.rodriguez@aerocivil.gov.co

Edwin Leandro Ibañez Orjuela. Especialista en gerencia de proyectos de la Universidad EAN, Ingeniero en Mecatrónica de la Universidad Militar. Docente de Programa de Gestión de Tránsito Aéreo.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5334-1648>

Correo electrónico: edwin.ibanez@aerocivil.gov.co

Ana María Pineda García. Magíster en Innovación Educativa de la Universidad Internacional de La Rioja (UNIR). Directora académica del Centro de Estudios Aeronáuticos (CEA). Experta aeronautica e Investigadora del grupo de Investigación GINA de la Unidad Administrativa Especial de Aeronautica Civil de Colombia (UAEAC).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7703-4956>

Correo electrónico: ana.pineda@aerocivil.gov.co

Este libro se publicó en archivo digital
en el mes de diciembre de 2025.

El sector aeronáutico colombiano se transforma a la velocidad del cambio tecnológico, y con él evolucionan los perfiles, las funciones y las competencias que demanda la industria. Este libro ofrece una radiografía completa del ecosistema aeronáutico, articulando sus subsectores, su estructura laboral y las tendencias que definirán el futuro del talento humano en el país. A partir del Plan Estratégico Aeronáutico 2030, la Aeronáutica Civil y el Centro de Estudios Aeronáuticos presentan un estudio que identifica brechas, necesidades emergentes y oportunidades de cualificación, integrando análisis documental, participación de actores clave y una lectura territorial estratégica. Es una obra esencial para instituciones formadoras, tomadores de decisiones y profesionales interesados en comprender cómo se configura —y hacia dónde se dirige— el capital humano en una de las industrias más dinámicas y exigentes del país.