



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

FINAL PROJECT REPORT

Influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas

SANDRA TEJERO CAMUÑAS

Curso 2024-2025

Título: INFLUENCIA DE LA METEOROLOGÍA ADVERSA EN LAS OPERACIONES
AÉREAS

Autor: SANDRA TEJERO CAMUÑAS

Tutor: PABLO LÓPEZ

Titulación: MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AERONÁUTICA

Curso: 2024/2025

RESUMEN

Las condiciones meteorológicas adversas continúan representando un importante desafío operativo para la seguridad en la aviación, a pesar de los avances alcanzados en los sistemas de predicción, la normativa vigente y las tecnologías embarcadas. Este estudio analiza la influencia de los fenómenos meteorológicos severos en las operaciones de vuelo, centrándose en su papel en accidentes significativos de la aviación comercial. Su objetivo es identificar patrones comunes y factores contribuyentes en este tipo de sucesos, con el fin de favorecer una mejor gestión del riesgo y la toma de decisiones operativas.

Para ello, se ha elaborado una base de datos específica de accidentes relacionados con condiciones meteorológicas adversas, con el propósito de valorar su magnitud y características. A partir de esta recopilación, se seleccionaron diez accidentes catastróficos en aviación comercial para un análisis detallado, atendiendo a criterios como la gravedad del suceso, su relevancia operacional y la disponibilidad de informes oficiales de investigación. El estudio se desarrolla en el marco normativo internacional y europeo, y examina los principales riesgos meteorológicos como la cizalladura, el engelamiento, la visibilidad reducida y la turbulencia.

Los resultados confirman que las condiciones meteorológicas adversas interactúan con frecuencia con factores humanos, poniendo de manifiesto carencias en la formación, el uso de los equipos y la toma de decisiones bajo presión. El trabajo concluye subrayando la necesidad de seguir reforzando las capacidades de predicción, mejorar la preparación de las tripulaciones ante escenarios adversos y fortalecer la integración de la información meteorológica en la toma de decisiones operativas.

Palabras clave: meteorología, riesgos, aviación, seguridad, accidente, aeronave

ABSTRACT

Adverse meteorological conditions continue to represent a major operational challenge for aviation safety, despite significant progress in forecasting systems, regulation, and onboard technology. This study analyses the influence of severe weather phenomena on flight operations, focusing on their role in major commercial aviation accidents. Its objective is to identify common patterns and contributing elements in such occurrences, with the aim of supporting improved risk management and operational practices.

A dedicated database of weather-related accidents was compiled to assess the extent and characteristics of this type of event. From this dataset, ten catastrophic accidents involving commercial aviation were selected for in-depth analysis based on criteria such as severity, operational relevance, and availability of official investigation reports. The study is framed within the international and European regulatory context and examines key meteorological hazards such as wind shear, icing, reduced visibility and turbulence.

The findings confirm that adverse weather frequently interacts with human factors, revealing gaps in training, equipment use, and decision-making under pressure. The conclusions highlight the need to further enhance forecasting capabilities, reinforce pilot preparation for adverse scenarios, and strengthen the integration of meteorological information into operational decision-making.

Keywords: meteorology, hazards, aviation, safety, accident, aircraft

Índice de contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1	Contexto y relevancia	10
1.2	Objetivo del estudio.....	11
1.3	Estructura del documento	11
2	MARCO TEÓRICO	13
2.1	Marco normativo aplicable a la investigación de accidentes aéreos.....	13
2.2	Marco normativo aplicable a la meteorología aeronáutica	15
2.3	Factores meteorológicos en la aviación.....	20
2.3.1	Cizalladura del viento (<i>Wind shear</i>)	21
2.3.2	Turbulencia atmosférica	21
2.3.3	Engelamiento	22
2.3.4	Visibilidad reducida y niebla	23
2.3.5	Tormentas eléctricas y fenómenos convectivos	25
2.4	Tecnologías y herramientas de predicción	26
2.4.1	Sistemas actuales de monitoreo y predicción meteorológica.....	28
2.4.2	Uso de las herramientas meteorológicas en tierra (torres de control y centros de pronóstico)	32
2.4.3	Uso de las herramientas meteorológicas a bordo de las aeronaves	33
2.5	Factores humanos y toma de decisiones	36
2.5.1	Evolución histórica de los factores humanos en aviación	36
2.5.2	Enfoque teórico: modelos SHELL y del queso suizo de Reason.....	38
3	METODOLOGÍA	42
3.1	Enfoque del estudio.....	42
3.2	Fuente de datos y análisis.....	43
3.3	Criterios de análisis de accidentes.....	47

4	ANÁLISIS DE ACCIDENTES	49
4.1	Accidente del vuelo 703 de Saratov Airlines – 11 de febrero de 2018 (LOC-I)	49
4.2	Accidente del vuelo Air India Express 1344 – 7 de agosto de 2020 (Runway Excursion) 53	
4.3	Accidente del vuelo Flydubai FZ981 – 19 de marzo de 2016 (LOC-I)	56
4.4	Accidente del vuelo Precision Air 494 – 6 de noviembre de 2022 (CFIT).....	60
4.5	Accidente del vuelo Bhoja Air 213 – 20 de abril de 2012 (LOC-I)	63
4.6	Accidente del vuelo TANS Perú ELV204 – 23 de agosto de 2005 (CFIT)	67
4.7	Accidente del vuelo FTL101 – 10 de octubre de 2001 (LOC-I)	71
4.8	Accidente del vuelo N100EQ – 8 de diciembre de 2014 (LOC-I)	74
4.9	Accidente del vuelo Sosoliso Airlines 1145 – 10 de diciembre de 2005 (LOC-I)	78
4.10	Accidente del vuelo Tara Air 197 – 29 de mayo de 2022 (CFIT)	82
4.11	Patrones comunes y conclusiones clave del análisis de los accidentes	86
5	PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	88
5.1	Propuesta tecnológica – CASO DE USO	88
5.1.1	Propuesta: incorporación de un sistema predictivo embarcado	89
5.1.2	Estimación costes de implantación.....	90
5.2	Propuesta CRM – CASO DE USO	91
5.2.1	Propuesta: Integración del CRM con soporte predictivo meteorológico embarcado 92	
5.2.2	Estimación costes de implantación.....	93
5.3	Proyección evolutiva.....	94
6	CONCLUSIONES.....	96
	REFERENCES	97

Figures

Figura 1 – <i>Fatal accidentes</i> según EASA <i>Annual Safety Review Report 2024</i>	10
Figura 2 - Fatalidades según <i>EASA Annual Safety Report 2024</i>	10
Figura 3 - Visibilidad reducida.....	23
Figura 4 - Tormenta	25
Figura 5 - Primera imagen desde el espacio radar TIROS-1	26
Figura 6 – Radar Doppler en las oficinas NWS en Tampa, Florida.....	29
Figura 7 - Primera imagen del disco completo de la Tierra captada por el Meteosat de Tercera Generación	30
Figura 8 - Ejemplo de estación meteorológica automática con sensores utilizados en observación aeronáutica.....	31
Figura 9 - Radar Doppler de Terminal (TDWR) - CLT	32
Figura 10 - Sistemas State of the art de detección de la formación de hielo (Fuente Goodrich Aircraft Corporation).....	35
Figura 11 - Modelo de Reason y cadena causal del accidente (Adaptado de Mouw, 2020, a partir de Reason, 1997)	39
Figura 12 - Antonov An-148 Moskva-Domodedovo Airport (DME/UUDD); 06 May 2017;	49
Figura 13 - Foto MAK; Moskva-Domodedovo Airport (DME/UUDD); 11 Feb 2018	51
Figura 14 – FZ981 Informe de investigación – Crash site	53
Figura 15 - FZ981 Informe de investigación	55
Figura 16 - Impacto aeronave - Informe investigación accidente FZ981	59
Figura 17 - Foto accidente PW494. AAIB Tanzania	62
Figura 18 - B737-236A Bhoja Air	64
Figura 19 - BHO213 Bureau of Aircraft Accidents Archive.....	66
Figura 20 - B737-244 ADV Informe final de investigación	68
Figura 21 - Accidente OB1809P Informe de investigación.....	70
Figura 22 - Fairchild SA-226-AT ("Metro II")	71
Figura 23 - Radar de reflectividad del 10 de octubre de 2001 a las 08:30 UTC (10:30 hora local)	73
Figura 24 - Embraer EMB-500 Phenom 100	75
Figura 25 – Accidente Embraer EMB-500 Phenom 100 (Fuselaje).....	77
Figura 26 - McDonnell Douglas DC-9-32 (operado por JAT)	79
Figura 27 - Accidente Sosoliso Airlines	81
Figura 28 - DHC-6 Twin Otter 300 Tara Air	82
Figura 29 - Accidente Tara Air 197	85

Tables

Tabla 1 - Marco normativo investigación de accidentes OACI.....	13
Tabla 2 - Marco normativo investigación de accidentes EASA	14
Tabla 3 - - Marco normativo investigación de accidentes España	15
Tabla 4 - Marco normativo meteorología OACI	17
Tabla 5 - Marco normativo meteorología EASA	18
Tabla 6 - Factores meteorológicos Anexo 3 OACI.....	20
Tabla 7 - Histórico avances tecnológicos en la detección de meteorología.....	28
Tabla 8 - Ocurrencias según efecto meteorológico	44
Tabla 9 - Efectos meteorológicos vs Accidentes	45
Tabla 10 - Ocurrencias vs Año vs Fatalidades.....	46
Tabla 11 - Accidentes analizados	48
Tabla 12 - Sistema predictivo embarcado vs sistema actual A320Neo.....	90
Tabla 13 - Estimación costes solución tecnológica.....	91
Tabla 14 - CRM A320 Neo vs CRM predictivo propuesto.....	92
Tabla 15 - Estimación de costes CRM.....	94

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto y relevancia

La seguridad aérea ha experimentado avances significativos en la última década, reflejados en una reducción generalizada de los accidentes fatales en las operaciones comerciales mundiales. Como se observa en la Figura 1, extraída del informe *Annual Safety Review 2024* de EASA, el número de accidentes fatales que involucran aviones comerciales ha presentado una tendencia general descendente desde 2020. De hecho, en 2023 se registraron solo dos accidentes fatales en todo el mundo, la cifra más baja de la última década:

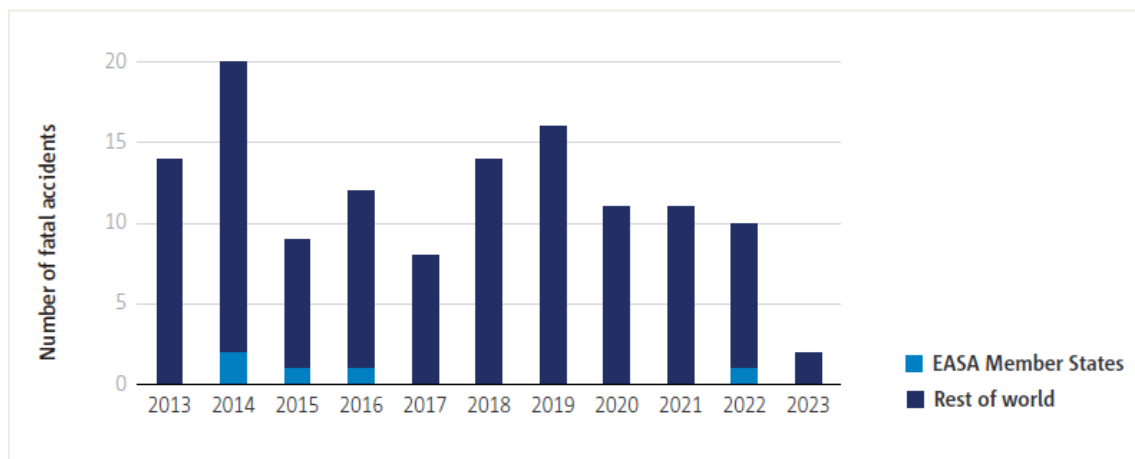


Figura 1 – Fatal accidentes según EASA *Annual Safety Review Report 2024*

La gráfica anterior, también concuerda y va en línea con el descenso del número de fatalidades en dichos sucesos:

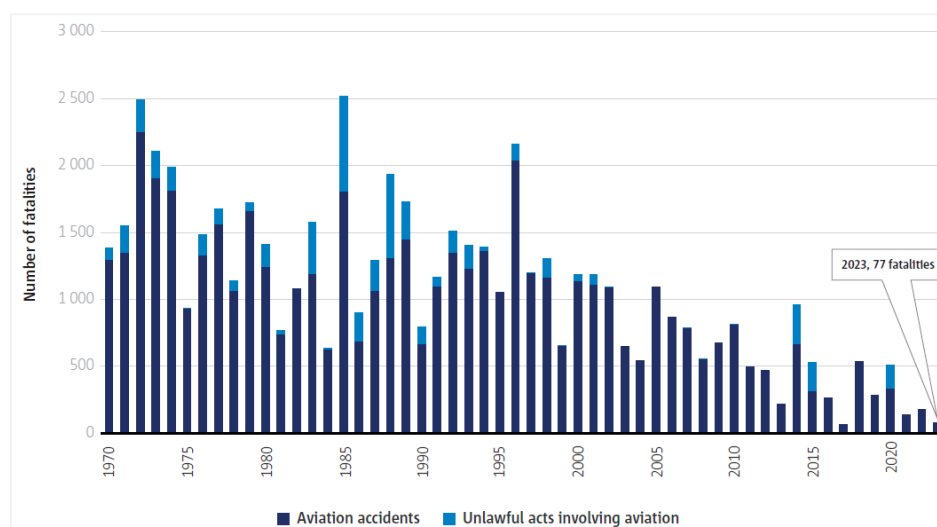


Figura 2 - Fatalidades según EASA *Annual Safety Report 2024*

A pesar de la disminución global de los accidentes fatales y fatalidades, **la meteorología adversa sigue siendo un factor de riesgo importante en la aviación**. Según el *Annual Safety Review 2024* de EASA, en el periodo 2019-2023, la causa más común de los accidentes fatales fue asociada a errores o confusión por parte de las tripulaciones y a la gestión de situaciones complejas creadas por fallos técnicos o condiciones meteorológicas adversas, como lluvias intensas y tormentas eléctricas, especialmente durante la aproximación.

En esta línea, un estudio reciente publicado en la revista *Ciencia y Poder Aéreo*, realizado por Daza Rincón, Ucros Rojas y Mónico Muñoz (2025), basado en datos de la Junta Nacional de Seguridad en el Transporte (NTSB) de Estados Unidos correspondientes al periodo 2008–2020, revela que el 23% de los accidentes aéreos analizados estuvieron relacionados con condiciones meteorológicas adversas. Entre los factores más recurrentes se destacan el viento adverso, la baja visibilidad, la formación de hielo y la turbulencia. Además, este estudio indica que, en ese mismo país, el 82% de los retrasos y el 42% de las cancelaciones de vuelos están vinculados a eventos meteorológicos.

Estos resultados subrayan la importancia de mejorar tanto las predicciones como las respuestas operativas ante condiciones climáticas adversas.

1.2 Objetivo del estudio

El objetivo de este estudio es **analizar el impacto de los fenómenos meteorológicos adversos en la seguridad operacional de la aviación**. Con este propósito, se considerará el marco regulatorio vigente, así como los conceptos meteorológicos clave vinculados a la aviación. También se verá el históricos de accidentes con causas metrológicas y se particularizará en varios accidentes, de carácter más severo, para identificar patrones comunes y así comprender cómo la meteorología influye en dichos sucesos y tener una base para proponer medidas futuras que contribuyan a mejorar la seguridad operacional frente a este tipo de condiciones adversas.

1.3 Estructura del documento

En primer lugar, tras la introducción, se desarrolla el marco teórico con el fin de contextualizar el estudio desde una perspectiva normativa, técnica y operacional. En este capítulo se establecen las bases necesarias para comprender el complejo en el que se producen los accidentes meteorológicos en aviación. En este sentido, se realiza una revisión completa del marco normativo internacional (OACI), europeo (EASA) y nacional (España), proporcionando una visión integral de las regulaciones que rigen tanto la investigación técnica de accidentes como la provisión de servicios meteorológicos aeronáuticos.

Asimismo, dentro del marco teórico, se define el concepto y la tipología de los fenómenos meteorológicos que influyen significativamente en la aviación. La elección de estos fenómenos específicos se justifica en su frecuencia de aparición en accidentes graves y en su relevancia operacional, derivada tanto de la literatura especializada como del análisis preliminar de datos estadísticos procedentes de la base de datos Aviation Safety Network (ASN).

A continuación, se presenta la metodología, donde se justifica y detalla la elección de un enfoque cualitativo y descriptivo para la investigación. Aquí también se describe la selección de casos concretos basada en criterios específicos como la severidad de los accidentes, la disponibilidad de información técnica y su representatividad dentro de la aviación comercial.

Seguidamente, se desarrolla el capítulo dedicado al análisis detallado de los accidentes seleccionados, el cual ocupa una posición central dentro del documento, constituyendo el núcleo del trabajo. En este capítulo se pone en práctica lo expuesto en el marco teórico y la metodología, proporcionando un estudio sistemático de los sucesos. Se examinan las circunstancias meteorológicas particulares en cada caso, junto con los factores humanos que interactuaron para desencadenar los accidentes.

A continuación, se presentan los casos de uso y proyecciones finales, en los que se exploran soluciones tecnológicas y operativas para mitigar los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos adversos, así como posibles avances en la integración de estos sistemas con las normativas y operaciones actuales.

Finalmente, el documento concluye con las conclusiones, sintetizando los hallazgos más relevantes del estudio y proponiendo líneas futuras de investigación.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Marco normativo aplicable a la investigación de accidentes aéreos

La investigación de accidentes aéreos se rige por un conjunto de normas y regulaciones a nivel internacional, europeo y nacional. Su objetivo es identificar las causas de los incidentes y mejorar la seguridad aérea, evitando que sucesos similares vuelvan a ocurrir. Estas regulaciones establecen los procedimientos, requisitos y responsabilidades de las autoridades encargadas de la investigación.

A continuación, se presenta un resumen de la normativa aplicable en este ámbito:



Internacional – OACI

Convenio de Chicago	El Artículo 26 del Convenio de Chicago establece que cuando una aeronave de un Estado sufre un accidente en el territorio de otro Estado, este último debe investigar el suceso conforme a los procedimientos de la OACI. Además, permite la participación del Estado de matrícula de la aeronave y, cuando sea posible, la asistencia de representantes acreditados para colaborar en la investigación. El objetivo principal es determinar las causas del accidente y prevenir futuros incidentes, sin asignar responsabilidades legales.
Anexo 13: Investigación de Accidentes	El Anexo 13 establece las Normas y Métodos Recomendados (SARPs) para la investigación de accidentes e incidentes en la aviación civil. Su finalidad es mejorar la seguridad operacional mediante un proceso técnico y estandarizado que garantiza la recopilación, análisis y difusión de información relevante. El Anexo 13 también define la obligación de notificación a la OACI en casos de accidentes graves, la responsabilidad del Estado que conduce la investigación, y los derechos de participación de otros Estados involucrados, como el de matrícula, operador, diseñador y fabricante de la aeronave.
Material Guía	Para facilitar la correcta aplicación del Anexo 13, la OACI publica material guía, que incluye manuales técnicos y directrices sobre la metodología de investigación de accidentes e incidentes. Estas publicaciones proporcionan mejores prácticas y recomendaciones para los investigadores, garantizando un enfoque uniforme y efectivo en la determinación de causas y la formulación de medidas preventivas.

Tabla 1 - Marco normativo investigación de accidentes OACI



Reglamento (UE) 996/2010	Establece un marco común para la investigación de accidentes e incidentes en la aviación civil dentro de la Unión Europea, alineado con el Anexo 13 de la OACI. Su objetivo es mejorar la seguridad aérea a través de investigaciones técnicas independientes que permitan identificar causas y factores contribuyentes, sin atribuir responsabilidades ni culpabilidad. El reglamento garantiza la independencia de los organismos de investigación, la obligación de notificación de sucesos a las autoridades competentes y la cooperación entre Estados miembros en las investigaciones. Además, refuerza la protección de la información sensible, como grabaciones de cabina y testimonios, para fomentar la transparencia y la mejora continua en la seguridad operacional.
Reglamento (UE) 376/2014	Establece los requisitos para la notificación, análisis y seguimiento de sucesos en la aviación civil dentro de la Unión Europea. Este reglamento no regula directamente la investigación de accidentes, es fundamental para la detección temprana de riesgos y tendencias de seguridad, facilitando la adopción de medidas preventivas y complementando el trabajo del Reglamento (UE) 996/2010.

Tabla 2 - Marco normativo investigación de accidentes EASA



Nacional - España

Ley de Seguridad Aérea 21/2003	La Ley 21/2003 de Seguridad Aérea, en su Capítulo II, regula la Investigación Técnica de Accidentes e Incidentes de Aviación Civil en España. Establece la Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes de Aviación Civil (CIAIAC) como organismo independiente encargado de realizar investigaciones con el objetivo de prevenir futuros accidentes. Además, define su composición y funciones, el régimen jurídico de la investigación técnica, y garantiza la publicidad de los informes y recomendaciones, así como su seguimiento por parte de las autoridades competentes. También regula la gestión de costes relacionados con la búsqueda, recuperación y conservación de los restos de aeronaves accidentadas.
Real Decreto 629/2010 CIAIAC	El Real Decreto 629/2010 regula la Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes de Aviación Civil (CIAIAC), estableciendo su organización, funciones y procedimientos. Garantiza la independencia de las investigaciones, alineadas con el Anexo 13 de la OACI, y su finalidad de prevenir futuros accidentes sin asignar responsabilidades. También define la obligación de notificación, la participación de otros Estados y la emisión de recomendaciones de seguridad basadas en los resultados de las investigaciones.

Real Decreto 632/2013 Asistencia a Víctimas	El Real Decreto 632/2013 establece el Protocolo de Asistencia a las Víctimas de Accidentes Aéreos y sus Familiares, asegurando una respuesta coordinada y eficaz ante estos sucesos. Regula la creación de planes de asistencia, la designación de puntos de contacto para familiares y la prestación de apoyo psicológico y logístico. Además, fija la obligación de las aerolíneas de contar con planes específicos de asistencia y garantizar una comunicación rápida y transparente con los afectados.
---	---

Tabla 3 - - Marco normativo investigación de accidentes España

2.2 Marco normativo aplicable a la meteorología aeronáutica

La prestación de servicios meteorológicos está sujeta a un marco normativo específico con el objetivo de asegurar que la información meteorológica suministrada a todos los actores implicados sea precisa, oportuna, coherente y adaptada a las necesidades operativas del sistema aeronáutico.

Desde la entrada en vigor del Convenio de Chicago, el marco normativo ha evolucionado progresivamente para adaptarse a los avances tecnológicos, científicos y operacionales, así como a la creciente complejidad del sistema aeronáutico. En particular, los avances en la observación remota, el desarrollo de modelos numéricos de predicción, la automatización de estaciones meteorológicas y la integración de tecnologías digitales han impulsado la necesidad de actualizar y modernizar los requisitos aplicables a la meteorología en aviación. El **Anexo 3 de la OACI**, principal referencia normativa en este ámbito, ha sido objeto de numerosas enmiendas que han permitido incorporar nuevas capacidades, como los sistemas de observación automatizada, la digitalización de productos meteorológicos, la mejora en la presentación de avisos y pronósticos, o la provisión de servicios centrados en el usuario. Entre los hitos recientes destaca la transición hacia un modelo de información meteorológica digital interoperable, en consonancia con la implantación progresiva del concepto SWIM (*System Wide Information Management*), que requiere una gestión estructurada y accesible de los datos en tiempo real.

En el ámbito internacional, la OACI establece una estructura específica para la prestación de servicios meteorológicos aeronáuticos que incluye dos niveles clave:

- Centros Mundiales de Pronósticos de Área (WAFC), encargados de suministrar información meteorológica esencial a nivel global para planificación y operación segura del vuelo.
- Centros Regionales de Pronósticos de Área (RAFC), responsables de proporcionar información meteorológica específica adaptada a las necesidades operativas regionales.

A **nivel europeo** el marco normativo vigente aplicable a los servicios meteorológicos aeronáuticos está establecido en el **Reglamento (UE) 2017/373**, que define los requisitos comunes para la prestación de servicios de navegación aérea y funciones de red en el ámbito del Cielo Único Europeo.

Este reglamento incluye una parte específica dedicada a los servicios meteorológicos, conocida como **Parte MET**, en la que se recogen los requisitos que deben cumplir los proveedores certificados de servicios meteorológicos aeronáuticos. Entre otros aspectos, la Parte MET regula la provisión de información meteorológica a los usuarios operacionales (aeródromos, dependencias ATS, operadores aéreos, etc.), los requisitos de competencia del personal, la gestión de la calidad, la documentación de los procesos y la interoperabilidad de los datos meteorológicos con otros servicios aeronáuticos.

A continuación, se presenta una síntesis de la normativa específica relativa a la prestación de servicios meteorológicos, así como el resto de normativa que, sin abordarla de manera directa, incide en dicha prestación:



Internacional – OACI

Convenio de Chicago	El <u>artículo 28</u> establece que los Estados contratantes deben proporcionar, en la medida en que lo consideren factible, los servicios necesarios para la navegación aérea internacional, incluidos los servicios meteorológicos.
Anexo 3: Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea Internacional	El Anexo 3 contiene las Normas y Métodos Recomendados (SARPs) relativos a la observación, intercambio y presentación de información meteorológica. Establece los requisitos para los servicios meteorológicos aeronáuticos, incluidos los productos como TAF, METAR, SIGMET y la información sobre fenómenos peligrosos. También aborda la provisión de servicios MET en apoyo al sistema ATM y a las operaciones en aeródromos.
PANS-MET (Doc 10157) Procedimientos para los Servicios de Navegación Aérea: Meteorología	Los PANS-MET complementan y desarrollan el Anexo 3. Mientras que el Anexo 3 establece el marco normativo básico para la prestación de los servicios meteorológicos aeronáuticos, los PANS-MET (Doc 10157) proporcionan los procedimientos detallados para su implementación operativa. Tienen carácter técnico-operacional y, aunque no son de cumplimiento obligatorio, se consideran la referencia internacional estándar para la correcta aplicación del Anexo 3.
Doc 8896 Manual de Servicios Meteorológicos para la Navegación Aérea	Manual técnico que complementa el Anexo 3. Aporta explicaciones detalladas sobre los distintos productos meteorológicos y su uso operativo en aviación. Incluye aspectos sobre observación, pronóstico, difusión y utilización de la información meteorológica.
Doc 9873 Guía del Sistema de Gestión de la Calidad para el Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea Internacional	Proporciona orientación para la implementación de un sistema de gestión de calidad (QMS) en los servicios meteorológicos aeronáuticos, conforme a los requisitos del Anexo 3. Define principios, procedimientos y responsabilidades destinados a asegurar la calidad, coherencia y mejora continua del servicio.

Doc 10088 Manual de Gestión de Calidad para los Servicios Meteorológicos	Desarrolla aspectos específicos del QMS aplicados a los servicios meteorológicos aeronáuticos, ampliando lo establecido en el Doc 9873. Aporta herramientas prácticas para la implementación, seguimiento y mejora del sistema de calidad, en línea con los requisitos del Anexo 3.
--	--

Tabla 4 - Marco normativo meteorología OACI



Internacional – EASA

Reglamento (UE) 2018/1139	Establece el marco general del sistema europeo de aviación civil. Reconoce los servicios meteorológicos como parte del sistema ATM/ANS y somete su prestación y supervisión a los requisitos de seguridad, incluyendo la competencia de los proveedores y la responsabilidad de las autoridades nacionales y de EASA.
Reglamento (UE) 2017/373	Establece los requisitos específicos para la prestación de los servicios meteorológicos aeronáuticos dentro del sistema europeo de navegación aérea. Regula la provisión de productos e información meteorológica (como METAR, TAF, SIGMET), las interfaces operativas con otras funciones ATM/ANS, la competencia y formación del personal, y la implantación de un sistema de gestión de calidad (QMS) conforme a la norma ISO 9001. Asimismo, impone requisitos técnicos y de interoperabilidad para los sistemas empleados, y establece obligaciones de coordinación, documentación y supervisión por parte de la autoridad competente
AMC/GM al Reglamento (UE) 2017/373 – Parte MET	Incluyen directrices técnicas y medidas aceptables de cumplimiento para los requisitos del reglamento, detallando por ejemplo qué productos MET deben proporcionarse (METAR, TAF, SIGMET, etc.), cómo debe ser la coordinación con otras funciones ATM y la implementación del QMS conforme a ISO 9001.
Reglamento (UE) 2023/203 Seguridad de la información	Establece requisitos en materia de gestión de riesgos relacionados con la seguridad de la información para todas las organizaciones del sistema de aviación civil europeo. En el ámbito meteorológico, es aplicable a los proveedores certificados conforme al 2017/373, a los que introduce una nueva obligación: la implantación de medidas específicas de seguridad de la información (<i>Information Security Management</i>) que garanticen la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos y sistemas utilizados para la generación, tratamiento e intercambio de información meteorológica. Esta exigencia amplía el alcance del sistema de gestión existente bajo el 373, incluyendo ahora la protección frente a amenazas de origen deliberado (como ciberataques).
Reglamento (UE) 965/2012 Operaciones aéreas	Establece que los operadores aéreos deben asegurarse de que toda operación se planifica y ejecuta teniendo en cuenta la información meteorológica actual y prevista. Impone la obligación de disponer, antes del inicio del vuelo, de datos adecuados sobre condiciones

	meteorológicas observadas y pronosticadas, procedentes de fuentes oficiales. También exige que el comandante del vuelo verifique que las condiciones meteorológicas en ruta y en destino permiten la operación segura.
Reglamento (UE) 139/2014 Aeródromos	Contiene requisitos para los aeródromos certificados, incluyendo la obligación de garantizar la disponibilidad de información meteorológica relevante (METAR, RVR, informes de viento, etc.) para las operaciones aéreas y para el personal ATS.
Reglamento (UE) 923/2012 SERA	Establece las reglas del aire comunes en Europa. Contiene disposiciones sobre la obligación de los pilotos de disponer de información meteorológica adecuada antes del vuelo, el uso de datos meteorológicos para determinar mínimos de planificación, y la notificación obligatoria en vuelo de condiciones meteorológicas significativas observadas, como turbulencia, cizalladura y cumulonimbos.
Reglamento (UE) 748/2012 Diseño y certificación de aeronaves	Establece los requisitos de certificación para garantizar que las aeronaves estén equipadas con medios adecuados para la recepción, visualización y uso operativo de información meteorológica en cabina, incluyendo sensores embarcados, sistemas de presentación de datos MET y capacidades de enlace de datos.
Reglamento (UE) 1321/2014 Mantenimiento de aeronaves	Incluye requisitos para garantizar que los equipos y sistemas meteorológicos instalados a bordo de las aeronaves (como sensores de temperatura, presión, cizalladura o precipitaciones) se mantengan en condiciones de aeronavegabilidad, conforme a los programas de mantenimiento aprobados y a los requisitos de seguridad aplicables.

Tabla 5 - Marco normativo meteorología EASA



Nacional – España

En España, el marco normativo aplicable a los servicios meteorológicos aeronáuticos integra plenamente la normativa internacional (OACI) y europea (Reglamento (UE) 2017/373 - Parte MET), así como disposiciones nacionales específicas que establecen competencias y responsabilidades. No obstante, cabe señalar que España no dispone actualmente de una normativa técnica específica de ámbito nacional sobre la provisión y supervisión de estos servicios, aplicando directamente los requisitos técnicos establecidos por la normativa europea

La Ley de Navegación Aérea (Ley 48/1960) estableció inicialmente la obligación de proporcionar servicios meteorológicos para la navegación aérea, aunque dicha regulación ha evolucionado significativamente desde entonces.

Actualmente, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), dependiente del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, es el proveedor certificado oficial de estos servicios en España, operando a través de diferentes dependencias especializadas:

- **Oficinas de Vigilancia Meteorológica (OVM)**, responsables de proporcionar vigilancia meteorológica continua y alerta sobre fenómenos significativos.
- **Oficinas Meteorológicas de Aeródromo (OMA)** ubicadas en los principales aeropuertos españoles, encargadas de proporcionar información y asistencia meteorológica específica a nivel local.
- **Oficina Meteorológica Principal de Aeródromo (OMPA)**, que ejerce funciones ampliadas respecto a las oficinas ordinarias, incluyendo responsabilidades adicionales en coordinación y supervisión técnica meteorológica en grandes aeropuertos o nodos aeroportuarios principales.

Además, AEMET gestiona unidades especializadas de predicción meteorológica y el Auto-servicio Meteorológico Aeronáutico (AMA).

La certificación de AEMET como proveedor MET aeronáutico se realizó conforme a la normativa europea (Reglamento (UE) 2017/373 - Parte MET) y los requisitos nacionales establecidos por la Orden MAM/1792/2006, que exige el cumplimiento de los estándares internacionales de OACI (Anexo 3) y la implementación de un sistema de gestión de la calidad.

En cuanto a la supervisión, la autoridad nacional específica para los servicios meteorológicos aeronáuticos (ANSMET) es la Subsecretaría del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, según establece la disposición transitoria cuarta del Real Decreto 500/2020. Esta autoridad supervisa directamente que AEMET y cualquier otro proveedor autorizado cumplan los estándares técnicos y operativos.

Por su parte, AESA, conforme a lo establecido en la **Ley 21/2003 de Seguridad Aérea**, no ejerce supervisión directa sobre los proveedores meteorológicos, pero tiene la responsabilidad de asegurar que los usuarios operacionales (operadores aéreos, aeródromos y proveedores ATM/ANS) utilicen adecuadamente la información meteorológica oficial suministrada por proveedores certificados.

Adicionalmente, España cuenta con normativa específica que complementa este marco general, como el Real Decreto 552/2014, relativo al intercambio de datos meteorológicos en el contexto del Cielo Único Europeo, y el Real Decreto 1180/2018, que actualiza aspectos operativos del tránsito aéreo. La normativa operacional nacional, incluyendo el Reglamento de Circulación Aérea (RCA) y las publicaciones aeronáuticas (AIP), establece requisitos concretos sobre mínimos meteorológicos,

procedimientos de notificación de fenómenos significativos (SIGMET) y decisiones operativas en condiciones meteorológicas adversas.

En síntesis, España posee un marco normativo claramente definido: AEMET proporciona servicios meteorológicos bajo certificación europea y supervisión específica nacional, mientras que AESA asegura la utilización operativa adecuada de dicha información por parte de los usuarios aeronáuticos.

2.3 Factores meteorológicos en la aviación

La aviación se desarrolla dentro de la atmósfera y depende completamente de ella para generar las fuerzas aerodinámicas y el empuje de los motores necesarios para el vuelo. Por ello, las condiciones meteorológicas adversas influyen profundamente en las operaciones aéreas y en la seguridad del vuelo.

El Anexo 3 de la OACI define una serie de fenómenos meteorológicos significativos que pueden afectar de manera directa la seguridad operacional en aviación. Dichos fenómenos aparecen recogidos en esta normativa de la siguiente manera:

 Ciclón tropical	 Llovizna	
 Línea de turbonada fuerte*	 Lluvia	
 Turbulencia moderada	 Nieve	
 Turbulencia fuerte	 Chubasco	 Granizo
 Ondas orográficas	 Ventisca alta de nieve	
 Engelamiento moderado de la aeronave	 Calima fuerte de arena o polvo	
 Engelamiento fuerte de la aeronave	 Tempestad extensa de arena o polvo	
 Niebla extensa	 Calima extensa	
 Materiales radiactivos en la atmósfera**	 Neblina extensa	
 Erupción volcánica***	 Humo extenso	
 Oscurecimiento de las montañas	 Precipitación engelante****	

Tabla 6 - Factores meteorológicos Anexo 3 OACI

En base a esta tabla, se definen a continuación aquellos fenómenos meteorológicos que, por su frecuencia o severidad, poseen mayor relevancia en el contexto del análisis de accidentes aéreos abordado en este trabajo.

2.3.1 Cizalladura del viento (*Wind shear*)

La cizalladura del viento se define como un cambio repentino en la velocidad y/o dirección del viento en una corta distancia, ya sea en el plano horizontal o vertical. Es un fenómeno tridimensional que puede presentarse a cualquier altitud, aunque su impacto es especialmente crítico por debajo de los 2000 ft (600 m), donde puede afectar seriamente las fases de despegue y aterrizaje.

Se distingue principalmente entre:

- Cizalladura de baja altitud (LLWS): la más peligrosa por su proximidad al terreno y su potencial para desestabilizar una aeronave durante el ascenso o la aproximación final.
- Cizalladura en altitud: asociada a zonas de fuerte gradiente de viento, como la corriente en chorro, y relacionada habitualmente con turbulencia en aire claro.

También puede clasificarse según su orientación respecto al avión:

- Longitudinal: el cambio de viento ocurre en la misma dirección del vuelo. Un paso brusco de viento de frente a viento de cola puede provocar una pérdida inmediata de sustentación.
- Lateral: cuando el cambio de viento es transversal a la trayectoria de vuelo, afectando la estabilidad direccional.
- Vertical: el viento varía en función de la altitud, común en situaciones de inversión térmica o capas de fricción.

Las causas más comunes incluyen tormentas convectivas (micro ráfagas), frentes meteorológicos, inversiones térmicas, vientos orográficos y las estelas turbulentas de otras aeronaves. Su detección puede ser difícil, especialmente en zonas con topografía compleja.

La cizalladura de baja altitud representa **uno de los mayores riesgos meteorológicos para la seguridad operacional**, ya que puede producir pérdidas súbitas de sustentación y desviaciones incontroladas cerca del suelo, con escaso margen de recuperación. Este fenómeno ha estado presente en varios accidentes históricos y, aunque su comprensión ha mejorado, sigue siendo una amenaza latente.

2.3.2 Turbulencia atmosférica

La turbulencia atmosférica se refiere a los **movimientos irregulares y caóticos del aire que se superponen al flujo medio del viento**. Se manifiesta mediante remolinos de diferentes tamaños que provocan variaciones bruscas en la actitud o velocidad del avión, y puede afectar tanto el confort

como la seguridad operacional. Desde el punto de vista aeronáutico, se distinguen varios tipos según su origen:

- Turbulencia convectiva: generada por corrientes ascendentes y descendentes en días calurosos o dentro de nubes convectivas (como los cumulonimbos).
- Turbulencia orográfica (mecánica) causada por el viento al fluir sobre terrenos elevados u obstáculos, generando fenómenos como ondas de montaña o rotor.
- Turbulencia en aire claro (CAT – Clear Air Turbulence): no asociada a nubes visibles, frecuente en niveles de crucero, especialmente cerca de la corriente en chorro o zonas de cizalladura fuerte.
- Turbulencia de estela, de origen no meteorológico: producida por vórtices generados por aeronaves pesadas, especialmente peligrosa para aeronaves más ligeras en aproximación o despegue.

La intensidad con que se percibe la turbulencia depende tanto de las condiciones atmosféricas como de las características de la aeronave. Los remolinos cuya escala se aproxima a la envergadura del avión son los más críticos. En aviones ligeros, incluso perturbaciones menores pueden ser peligrosas.

La turbulencia es la principal causa de lesiones en cabina en vuelos comerciales (especialmente en tripulación de cabina). Aunque **rara vez provoca accidentes fatales** en aviación comercial, sí representa una amenaza recurrente que exige preparación y gestión activa. Cabe destacar que, estudios recientes, (Williams & Joshi, 2023) advierten un incremento en la incidencia de turbulencia severa debido al cambio climático. Por ejemplo, entre 1979 y la actualidad se ha medido un aumento del 55% en la frecuencia de turbulencia severa de aire claro sobre el Atlántico Norte y modelos predicen que se pueden hasta triplicar estas incidencias hacia 2050-2080.

2.3.3 Englamiento

El englamiento es la acumulación de hielo sobre las superficies expuestas de una aeronave, originado por el impacto de agua superenfriada (en estado líquido pese a estar por debajo de 0 °C), ya sea en vuelo o en tierra. Este fenómeno es especialmente frecuente en condiciones atmosféricas donde las temperaturas están comprendidas entre 0 °C y –20 °. Al impactar contra la aeronave el agua superenfriada se convierte en hielo, y dependiendo de las condiciones, se forma un tipo de hielo u



otro (claro, escarchado o mixto). La altitud a la que esto ocurre depende de la estación del año y la latitud, pero suele encontrarse en niveles de vuelo bajos a intermedios.

La formación de hielo representa un **riesgo aerodinámico significativo**, ya que altera el perfil aerodinámico del ala, reduce la sustentación, incrementa la resistencia aerodinámica, aumenta el peso y puede afectar críticamente el movimiento de superficies de control (alerones, timones), sensores (tubos Pitot, tomas estáticas) y tomas de aire de motores.

El engelamiento puede producirse en tierra, especialmente bajo condiciones de lluvia helada (*freezing rain*) o formación nocturna de escarcha, siendo crítico antes del despegue por reducir gravemente la sustentación. Por ello, se aplican estrictos procedimientos de deshielo y anti-hielo bajo el principio del "*Clean Aircraft Concept*". Durante el ascenso y crucero, al atravesar nubes con agua superenfriada, el hielo puede acumularse pese a los sistemas anti-hielo activos. En la fase de aproximación y aterrizaje, el hielo acumulado puede alterar las velocidades de pérdida y provocar comportamientos inesperados al desplegar flaps, destacando especialmente el riesgo de pérdida de sustentación (stall) del estabilizador horizontal, que causa un brusco cabeceo hacia abajo, difícil de controlar cerca del suelo.

También puede formarse hielo en tomas de aire de motor, hélices, carburadores (en aeronaves de pistón) y sensores de vuelo (tubos Pitot y tomas estáticas), con consecuencias que van desde la pérdida de potencia hasta indicaciones erróneas de velocidad o altitud.

Actualmente, el engelamiento ya **no es una de las principales causas directas de accidentes fatales en aviación comercial**, debido a avances técnicos y operacionales. Sin embargo, sigue siendo un **factor significativo y frecuente en accidentes de aviación general y regional**, donde las aeronaves suelen tener sistemas anti-hielo menos eficaces o incluso inexistentes, y las tripulaciones menos recursos para evitar condiciones peligrosas. El riesgo radica especialmente en su acumulación gradual y difícil detección, requiriendo constante vigilancia y gestión cuidadosa para garantizar la seguridad del vuelo.

2.3.4 Visibilidad reducida y niebla

La visibilidad es un factor crítico en aviación especialmente para la aviación general y las operaciones visuales. Incluso para vuelos IFR (reglas de vuelo instrumental), durante aproximaciones y aterrizajes se depende en gran medida de referencias visuales. Los principales fenómenos que reducen la visibilidad son la niebla, la neblina, nubes bajas, precipitaciones intensas, tormentas de polvo y humo.



Figura 3 - Visibilidad reducida

La baja visibilidad afecta críticamente todas las fases del vuelo, pero especialmente despegues y aterrizajes. Durante el despegue, una niebla densa puede impedir ver el final de pista, lo que requiere autorizaciones especiales (Despegues de baja visibilidad con procedimientos LVTO). En aproximación y aterrizaje, si la visibilidad o el techo están por debajo de los mínimos de la aproximación (por ejemplo, inferior a 200 m de alcance visual en pista para un ILS CAT III), el aterrizaje automático puede ser la única opción o directamente se deberá alternar a otro aeropuerto. El riesgo de un aterrizaje fallido o desestabilizado aumenta cuando los pilotos adquieren la referencia visual tarde o de forma imprecisa. En aviación general, la entrada inadvertida en condiciones IMC por pilotos no adiestrados es una de las principales causas de accidentes fatales.

No solo en vuelo, la baja visibilidad también afecta movimientos en tierra: rodajes y despegues/aterrizajes en aeropuerto. Con niebla, el control terrestre (Torre/SMGCS) enfrenta mayor dificultad para prevenir incursiones en pista, y los propios pilotos deben rodar muy lentamente siguiendo señales iluminadas. Es común que la niebla intensa provoque demoras y desvíos, de hecho, la niebla es una de las primeras causas de demoras meteorológicas en aeropuertos, así como de cierres temporales de pistas.

Para mitigar estos riesgos, la aviación comercial se apoya en sistemas avanzados como el ILS de categorías II y III, permitiendo aterrizajes seguros con visibilidad mínima (en CAT IIIc hasta 75 metros de RVR, casi nula visibilidad). Sin embargo, no todos los aeropuertos ni todas las aeronaves disponen de tales sistemas, por lo que la niebla intensa sigue imponiendo restricciones operativas importantes. También se han desarrollado sistemas anticollisión en tierra (ASDE-X), procedimientos específicos (*Low Visibility Procedures*, LVP) y señalización mejorada para rodajes seguros en condiciones adversas.

Actualmente, la **visibilidad reducida continúa siendo un factor de riesgo significativo en la seguridad aérea**. Aunque los avances tecnológicos (ILS categoría III, sistemas automáticos de aterrizaje y procedimientos especiales) han disminuido notablemente los accidentes en la aviación comercial, sigue siendo una causa importante de incidentes y graves perturbaciones operativas. **Sin embargo, en la aviación general y ligera, la baja visibilidad aún es una de las principales causas directas de accidentes fatales**, debido a la limitada capacitación instrumental y al menor equipamiento tecnológico de estas aeronaves.

2.3.5 Tormentas eléctricas y fenómenos convectivos

Las tormentas eléctricas son fenómenos meteorológicos caracterizados por la formación de nubes cumulonimbus, generadas por fuertes movimientos verticales del aire (convección) debido a la inestabilidad atmosférica y al calentamiento desigual de la superficie terrestre. Estos procesos convectivos producen simultáneamente diversos fenómenos peligrosos para la aviación, como turbulencias severas, cizalladura del viento, precipitaciones intensas (lluvia abundante y granizo), descargas eléctricas y una reducción significativa de la visibilidad.



Figura 4 - Tormenta

Específicamente, las corrientes ascendentes y descendentes en el interior de una tormenta pueden superar velocidades de 5000 ft/min (1524m/min) provocando importantes variaciones de altitud y dificultando el control de la aeronave. Asimismo, entre los fenómenos convectivos destacan las micro ráfagas descendentes (*microbursts*) y los frentes de racha (*gust fronts*), especialmente peligrosos durante las fases de aproximación y aterrizaje debido a que pueden causar cambios repentinos en la dirección e intensidad del viento a baja altitud.

Por otro lado, el granizo puede generar daños estructurales importantes en el avión, mientras que las precipitaciones intensas no solo reducen notablemente la visibilidad, sino que también degradan la aerodinámica de la aeronave y pueden producir fallos en los motores debido a la ingestión excesiva de agua. Finalmente, aunque los aviones modernos están generalmente diseñados para resistir los impactos de rayos, estas descargas eléctricas pueden causar daños puntuales en sistemas eléctricos o en componentes críticos del avión, provocando interrupciones temporales en su operación.

Durante las fases de **despegue y aproximación, la presencia de una tormenta eléctrica cercana implica un riesgo especialmente elevado**, ya que la cizalladura del viento y las ráfagas convectivas pueden hacer que la aeronave experimente una pérdida repentina de sustentación y velocidad a baja altura, situación altamente crítica. La baja visibilidad por lluvias intensas o la presencia de formaciones nubosas en el área de maniobra complican adicionalmente la operación. En **ascenso y crucero, la atravesar una tormenta está fuertemente desaconsejado**. Por esta razón, se recomienda rodear las células tormentosas activas utilizando el radar meteorológico a bordo para mantener una separación segura de las zonas con alta reflectividad (asociadas a lluvias intensas y granizo).

En resumen, las tormentas eléctricas combinan múltiples peligros atmosféricos y constituyen una de las amenazas meteorológicas más graves para la aviación, siendo responsables de un número considerable de incidentes y accidentes en su historia.

2.4 Tecnologías y herramientas de predicción

Durante gran parte del siglo XX, la aviación operaba con información meteorológica limitada. Antes de los años 50 no existían radares a bordo ni satélites, y los pronósticos se basaban en observaciones aisladas. En esos inicios de la aviación comercial, incidentes y accidentes por clima adverso eran relativamente frecuentes (tormentas inesperadas, engelamiento no pronosticado, etc.).

Un punto de inflexión llegó en 1956 con la llegada del primer radar meteorológico aerotransportado comercial. Bendix presentó el modelo RDR-1, lo suficientemente compacto para instalarse en el morro de un avión de pasajeros. Esto supuso un cambio radical, dado que por primera vez los pilotos podían “ver” las tormentas en su ruta – y fue tal la revolución que las aerolíneas presumían en su publicidad de estar “equipadas con radar”.

En paralelo, se desarrollaron las primeras redes de radares meteorológicos en tierra (mayoritariamente derivados de radares militares adaptados) que permitieron a los servicios meteorológicos vigilar tormentas y avisar a los aeropuertos con antelación. A fines de los 50 y comienzos de los 60 surgieron también los primeros satélites meteorológicos. El satélite TIROS-1 envió en 1960 las primeras imágenes de nubes desde el espacio, dando paso a la era de la observación global.



Figura 5 - Primera imagen desde el espacio radar TIROS-1

Para finales de los 60, ya existían satélites geoestacionarios enviando imágenes periódicas que facilitaron enormemente el seguimiento de huracanes y la cartografía de nubes a escala planetaria – un salto crucial para la aviación intercontinental.

Los **modelos numéricos** iniciaron su andadura operativa en los 60 y 70, de la mano de los avances en computación. Aunque al principio la resolución era muy limitada y solo permitían prever tendencias generales, comenzaron a desarrollarse y ejecutarse en centros meteorológicos nacionales dotados de capacidad computacional, como el UK Met Office, la NOAA en Estados Unidos o Météo-France. Estos ordenadores resolvían sistemas de ecuaciones diferenciales (simplificadas,

hidrostáticas, con mallas muy gruesas) para prever la evolución de variables como presión, temperatura y viento a gran escala. Hacia los años 80, los centros meteorológicos ya disponían de modelos capaces de pronosticar con cierta confiabilidad los sistemas frontales y perturbaciones de latitudes medias con 2-3 días de antelación, lo cual benefició la planificación de vuelos largos.

También en los 70-80 comenzó a masificarse la instalación de sensores automáticos en aeropuertos. Inicialmente se instalaban medidores de viento y termómetros que retransmiten datos a torre y fueron evolucionando a los completos AWOS/ASOS actuales integrados con computadoras.

Ya en 2001, la introducción de sistemas integrados como el ITWS (*Integrated Terminal Weather System*) combinó múltiples fuentes de datos para pronosticar con 30-60 minutos de antelación condiciones peligrosas cerca del aeropuerto

En cuanto a los factores meteorológicos, el **engelamiento** ha visto progresos históricos notables. En los años 80 y 90 hubo accidentes sonados por formación de hielo (como el de un ATR-72 de American Eagle en 1994, entre otros) que impulsaron a autoridades y fabricantes a mejorar tanto los sistemas de a bordo como los métodos predictivos. Se desarrollaron mejores detectores de hielo y se refinaron los procedimientos de activación automática de las protecciones. De hecho, en 2009 la FAA estableció una normativa específica para asegurar que los sistemas anti-hielo de los aviones se activen oportunamente, buscando evitar la acumulación peligrosa aun cuando la tripulación no la haya percibido inmediatamente

Otro ámbito mejorado es la predicción de **turbulencia** en aire claro. En los 90 se introdujeron algoritmos de pronóstico de turbulencia y se comenzó a recopilar reportes automatizados desde aviones, dando lugar a mapas mundiales de turbulencia más precisos. Esto ha reducido la exposición inadvertida a turbulencia severa en rutas de crucero.

En síntesis, la evolución histórica de las tecnologías meteorológicas para la aviación ha sido acelerada en las últimas décadas. Se pasó de depender casi exclusivamente de la pericia del piloto y unos pocos informes, a disponer de herramientas sofisticadas que brindan información precisa y anticipada. Cada nuevo sensor o sistema (radares Doppler, satélites de nueva generación, supercomputadoras, datalinks, etc.) ha ido reduciendo la incertidumbre meteorológica en la operación aérea. Muchas de estas mejoras han sido impulsadas directamente por las lecciones aprendidas tras accidentes graves, que evidenciaron deficiencias en la detección, predicción o comunicación de fenómenos meteorológicos peligrosos.

Actualmente, si bien el clima adverso sigue contribuyendo a incidentes, su peso relativo ha disminuido gracias a mejores predicciones y alertas, convirtiéndose en una variable progresivamente más controlable.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los principales avances en la detección de fenómenos meteorológicos relevantes para la aviación:

Década	Avances clave	Impacto en la seguridad operacional
1950s	◦ Primeros radares meteorológicos embarcados (ej. Bendix RDR-1). ◦ Observaciones visuales y manuales.	+ Mejora en la detección táctica de tormentas. + Inicio del uso de tecnología a bordo.
1960s	◦ Primeros satélites meteorológicos (TIROS-1, 1960). ◦ Inicios de modelos numéricos simples.	+ Observación global del tiempo. + Primeros pronósticos de gran escala.
1970s	◦ Radares meteorológicos en tierra para aviación. ◦ Primeros sensores automáticos en aeropuertos. ◦ Emergencia del concepto de cizalladura.	+ Mejora en vigilancia meteorológica local. + Inicio de la concienciación sobre <i>microburst</i>.
1980s	◦ Introducción del radar Doppler. ◦ Primeros sistemas LLWAS para detección de <i>wind shear</i>. ◦ Satélites geoestacionarios plenamente operativos.	+ Detección de cizalladuras tras accidentes graves. + Primeras alertas automáticas en aeropuertos.
1990s	◦ Generalización de radares TDWR. ◦ Mejora de modelos numéricos (resolución y frecuencia). ◦ Radares embarcados con detección de <i>wind shear</i>.	+ Reducción de accidentes por <i>microburst</i>. + Mejora en la gestión meteorológica en vuelo.
2000s	◦ Extensión de AWOS/ASOS. ◦ Avances en predicción de engelamiento y turbulencia. ◦ Satélites con mayor resolución temporal y espacial.	+ Información más precisa y continua para toma de decisiones. + Mejor cobertura meteorológica de aeropuertos.
2010s	◦ Introducción del datalink meteorológico (ACARS, ADS-B). ◦ Herramientas de visualización para cabina y ATC. ◦ Primeros pasos de integración MET en ATM (SESAR).	+ Mayor conciencia situacional en vuelo. + Mejores decisiones tácticas y estratégicas.
2020s	◦ Modelos de predicción de alta resolución (< 3 km). ◦ <i>Nowcasting</i> y productos probabilísticos avanzados. ◦ Satélites Meteosat de tercera generación (MTG).	+ Predicción localizada casi en tiempo real. + Mayor anticipación ante fenómenos peligrosos.

Tabla 7 - Histórico avances tecnológicos en la detección de meteorología

2.4.1 Sistemas actuales de monitoreo y predicción meteorológica

- **Radares meteorológicos (*weather radar*):** los radares meteorológicos instalados en tierra permiten detectar en tiempo real la ubicación, intensidad y evolución de precipitaciones asociadas a tormentas, granizo o líneas de turbonada, siendo fundamentales para la seguridad operacional. Aunque existen radares convencionales que solo miden la reflectividad (intensidad de la

precipitación), en la actualidad se utilizan mayoritariamente radares Doppler, que permiten además estimar la velocidad del viento dentro de las nubes, facilitando la identificación de turbulencias y cizalladuras. Algunos países, como Alemania, Francia o España, también incorporan radares polarimétricos, que distinguen el tipo de hidrometeoros (lluvia, granizo, nieve) con mayor precisión. En Europa, muchos de estos sistemas están integrados en la red OPERA de EUMETNET, que coordina y comparte los datos de radar entre los servicios meteorológicos nacionales, incluyendo a AEMET en el caso de España, mejorando así la vigilancia regional y la provisión de información para la aviación.



Figura 6 – Radar Doppler en las oficinas NWS en Tampa, Florida.

- **Satélites meteorológicos:** Los satélites en órbita terrestre, tanto geoestacionarios como polares, proporcionan una vigilancia meteorológica global, continua y de alta frecuencia. Permiten monitorizar la cobertura nubosa, la evolución de tormentas y otros fenómenos atmosféricos mediante imágenes en los rangos visible, infrarrojo y de microondas, lo que resulta esencial para observar zonas remotas u oceánicas fuera del alcance de los radares terrestres. Actualmente, existe una red global coordinada de satélites meteorológicos operada por distintas agencias nacionales y regionales (como EUMETSAT en Europa, NOAA en EE.UU., JMA en Japón, entre otras), que comparten datos a través de marcos como el *Global Observing System* (GOS) de la OMM. Esta red garantiza una cobertura casi total del planeta y alimenta los sistemas de predicción meteorológica que utiliza la aviación. Para las operaciones aéreas, estas imágenes permiten anticipar fenómenos peligrosos como tormentas convectivas, turbulencias en ruta, ciclones tropicales o cenizas volcánicas, mejorando la toma de decisiones en todas las fases del vuelo.

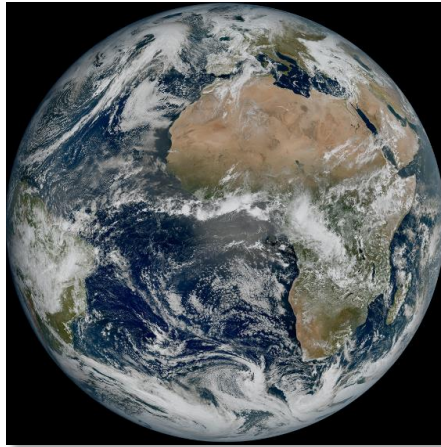


Figura 7 - Primera imagen del disco completo de la Tierra captada por el Meteosat de Tercera Generación

- **Modelos numéricos de predicción (NWP):** Son simulaciones informáticas de la atmósfera basadas en ecuaciones físicas, que se ejecutan en supercomputadoras por centros meteorológicos nacionales e internacionales, como el ECMWF (Europa) o la NOAA (Estados Unidos). Estos modelos proporcionan predicciones con varias horas o días de antelación sobre variables críticas para la aviación, como viento en altitud, nubosidad, turbulencia, tormentas o engelamiento. Los servicios meteorológicos aeronáuticos utilizan sus resultados para elaborar productos operacionales como TAF, SIGMET o mapas de tiempo significativo, combinando modelos globales con otros de alta resolución para zonas cercanas a aeropuertos. En la práctica, estos productos son esenciales para la planificación de vuelos y la toma de decisiones por parte de pilotos, controladores y despachadores.
- **Estaciones meteorológicas automáticas (AWOS/ASOS):** Son sistemas instalados en los aeropuertos que miden de forma continua variables esenciales como dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad, presión atmosférica, visibilidad, altura de nubes y fenómenos presentes (lluvia, tormenta eléctrica, etc.). Estas estaciones están compuestas por sensores distribuidos en el aeródromo, y procesan los datos automáticamente para generar y transmitir informes meteorológicos (METAR y SPECI) en tiempo real.

La información se pone a disposición de los controladores de tránsito aéreo, las oficinas meteorológicas aeronáuticas y las tripulaciones, ya sea por enlace digital o mediante emisiones automáticas por radio (ATIS o mensajes de voz). En la práctica, permite una vigilancia meteorológica continua y precisa, facilitando decisiones inmediatas sobre operaciones críticas, como el uso de pistas, esperas, desvíos o suspensión de aproximaciones ante condiciones como vientos cruzados, cizalladura o visibilidad reducida.

En aeropuertos de mayor tamaño, estas observaciones automáticas suelen complementarse con validación por parte de personal meteorólogo. No obstante, la tendencia general es hacia la

automatización, garantizando cobertura constante y cumplimiento de los estándares internacionales para su integración directa en los sistemas de información aeronáutica.

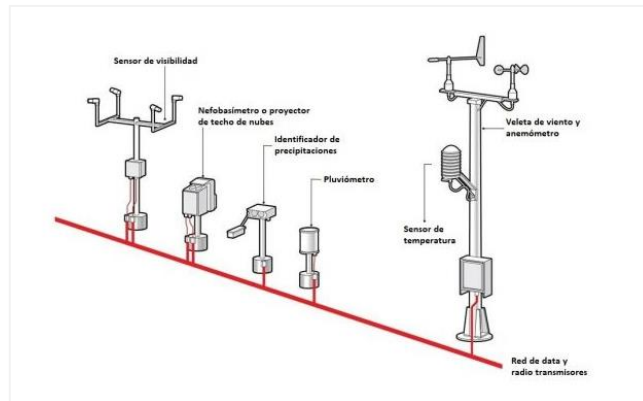


Figura 8 - Ejemplo de estación meteorológica automática con sensores utilizados en observación aeronáutica.

- **Sistemas de detección de cizalladura (*wind shear*):** La cizalladura del viento representa un riesgo significativo durante las fases críticas del vuelo, especialmente en despegues y aterrizajes. Para su detección, se emplean diversos sistemas terrestres instalados en los aeropuertos, diseñados para emitir alertas tempranas que permitan a los controladores y a las tripulaciones tomar decisiones inmediatas.

Uno de los más utilizados es el **LLWAS** (*Low Level Wind Shear Alert System*), basado en una red de anemómetros distribuidos estratégicamente alrededor de las pistas. Este sistema mide la velocidad y dirección del viento en distintos puntos y, mediante algoritmos, identifica variaciones abruptas que puedan indicar la presencia de *microburst* o *wind shear*. Cuando se detectan diferencias significativas (por ejemplo, más de 15 nudos entre sensores), se genera una alerta automática para el control de tránsito aéreo y las aeronaves en aproximación o salida.

Complementariamente, muchos aeropuertos cuentan con **radares Doppler de terminal (TDWR)**, que constituyen una versión especializada de radar Doppler de alta resolución, optimizada para detectar estructuras meteorológicas peligrosas en el entorno inmediato del aeropuerto, como ráfagas descendentes o cizalladura asociada a tormentas. En Europa, aunque los TDWR no están implantados de forma generalizada como en Estados Unidos, algunos aeropuertos cuentan con sistemas equivalentes o complementarios basados en radares Doppler de alta resolución operados por los servicios meteorológicos nacionales.



Figura 9 - Radar Doppler de Terminal (TDWR) - CLT

Asimismo, en aeródromos con condiciones orográficas complejas o donde se requiere una detección más precisa en aire claro (sin precipitación), se han implementado sensores **LIDAR Doppler**, que detectan partículas en suspensión y permiten identificar variaciones de viento incluso sin lluvia presente. El LIDAR Doppler está presente en Europa, aunque su implantación es muy limitada. Por ejemplo, el DWD – Deutscher Wetterdienst (Servicio Meteorológico Alemán) lo tiene implantado y operativo de forma continua en aeropuertos como Fráncfort y Múnich, donde se integra en el sistema de vigilancia meteorológica para la detección de cizalladura en aire claro.

Estas tecnologías representan actualmente algunos de los sistemas más avanzados en el ámbito de la meteorología aeronáutica. Su alto nivel de resolución, su capacidad de integración operativa y su función preventiva han convertido a la detección automatizada de *wind shear* en un componente clave para reforzar la seguridad operacional en aeropuertos expuestos a condiciones atmosféricas severas.

2.4.2 Uso de las herramientas meteorológicas en tierra (torres de control y centros de pronóstico)

En las operaciones diarias, existe un estrecho vínculo entre la información meteorológica y la gestión del tránsito aéreo desde tierra:

- En los aeropuertos, la **torre de control y el centro de aproximación** disponen de pantallas e interfaces que integran muchos de los sistemas descritos: por ejemplo, los controladores observan en tiempo real el viento en pista reportado por las estaciones automáticas (AWOS), reciben alarmas sonoras/visuales de *wind shear* del LLWAS/TDWR, y pueden consultar imágenes radar meteorológicas de la zona terminal para visualizar tormentas cercanas. Con esta información, los controladores pueden tomar decisiones de seguridad inmediatas, como retrasar

despegues si hay un aviso de *microburst*, cambiar la configuración de pistas según la dirección del viento, o guiar a las aeronaves para rodear una celda tormentosa. Los datos de los radares meteorológicos de área terminal también alimentan sistemas informáticos de gestión de flujo.

- Paralelamente, en tierra trabajan los **servicios meteorológicos aeronáuticos** (dependientes de agencias meteorológicas nacionales o de aviación). En cada región aérea existe normalmente una Oficina Meteorológica de Aeródromo (OMA) o una Oficina de Vigilancia Meteorológica (MWO) encargada de preparar los pronósticos TAF para los aeropuertos, difundir informes METAR y avisos SIGMET de fenómenos peligrosos (tormentas severas, turbulencia en montaña, ceniza volcánica, etc.). Estos meteorólogos utilizan todas las herramientas disponibles, modelos numéricos, imágenes de satélite, radar, sondeos, informes de pilotos (PIREP), para elaborar productos específicos para la navegación aérea. Por ejemplo, en España los pilotos consultan a través del sistema AMA de AEMET mapas de tiempo significativo, pronósticos de viento y temperatura en ruta, imágenes radar, satelitales y de descargas eléctricas, todo generado y actualizado por los centros meteorológicos

Esta colaboración tierra-aire es fundamental: los meteorólogos proporcionan la predicción y vigilancia, mientras los controladores y operadores la incorporan a la toma de decisiones operativas. Antes de cada vuelo, la tripulación realiza un briefing meteorológico (frecuentemente vía aplicaciones o portales digitales) donde recibe los últimos TAF, pronósticos de ruta, mapas de viento en altura, y cualquier alerta vigente.

- Durante el vuelo, **los controladores de área (ACC)** también juegan un rol al avisar a los pilotos sobre condiciones adversas en su ruta, usando información integrada en sus radares de vigilancia (muchos radares de control incluyen un canal meteorológico que pinta en la pantalla las zonas de precipitación intensa).

En resumen, desde tierra se monitorea constantemente el tiempo y se comunica a las aeronaves mediante diversos canales: mensajes ATIS (Información Terminal Automatizada), avisos por radio ATC (“hay reporte de cizalladura en final larga”), envíos de datos vía enlace digital, etc. Todo ello con el objetivo de que la tripulación esté informada y pueda actuar proactivamente frente a la meteorología.

2.4.3 Uso de las herramientas meteorológicas a bordo de las aeronaves

- **Radar meteorológico a bordo:** Los radares a bordo permiten a la tripulación detectar tormentas en ruta y estimar su intensidad, representándolas con ecos de colores según la reflectividad (verde: débil, amarillo: moderada, rojo/magenta: muy fuerte). El más destacado es el radar meteorológico de a bordo (conocido como AWR, *Airborne Weather Radar*). Ubicado en el morro del avión detrás del radomo, el AWR escanea mediante radiofrecuencia el espacio frontal al avión, típicamente en

un alcance ajustable de hasta 590 metros en los grandes reactores en busca de precipitaciones y turbulencia. Funciona de forma similar a los radares terrestres: emite pulsos de microondas y recibe el eco devuelto por las gotas de agua en la atmósfera. Con ello, dibuja en las pantallas de navegación del piloto las áreas de precipitación, codificadas por colores según su intensidad (verde-lluvia ligera, amarillo-moderada, rojo-fuerte, magenta-turbulencia severa). Esto permite a los pilotos identificar rápidamente zonas de meteorología adversa y desviarse a tiempo para evitarlas.

- **Capacidades Doppler y detección de turbulencia:** los radares embarcados modernos miden el desplazamiento de las gotas para detectar corrientes verticales intensas, permitiendo anticipar turbulencia o identificar zonas de fuerte convección. Algunos modelos (como los instalados en Boeing 777 o Airbus A320) ofrecen modos de detección predictiva de *wind shear ahead*, útiles en aproximación, generando alertas automáticas en cabina si se detecta una firma compatible con un *microburst*. Esta capacidad complementa la cobertura terrestre proporcionada por LLWAS, TDWR o LIDAR.
- **Sistemas de detección y protección frente al engelamiento:** las aeronaves disponen de sistemas antihielo y de detección diseñados para prevenir la acumulación de hielo en superficies críticas. Entre los sistemas de protección se encuentran la calefacción eléctrica en los bordes de ataque de las alas y estabilizadores, sistemas neumáticos (botas de deshielo), calefacción de las sondas Pitot y estáticas, ventanas del parabrisas y tomas de aire del motor. En paralelo, muchos aviones comerciales incorporan detectores automáticos de engelamiento, como el ampliamente utilizado sensor de Goodrich, que consiste en un cilindro metálico que vibra a alta frecuencia y, al recubrirse de hielo, cambia su frecuencia y genera una alerta automática en cabina. Estos detectores permiten a la tripulación actuar antes de que el hielo sea visible, activando los sistemas de protección de forma preventiva y segura.
- **Detección indirecta del engelamiento:** la tripulación también puede identificar la formación de hielo mediante indicaciones indirectas, como la pérdida de velocidad indicada (por obstrucción del tubo de Pitot), la acumulación visible en el parabrisas o lecturas anómalas del sensor de ángulo de ataque. Estas indicaciones permiten confirmar la presencia de hielo en vuelo, aunque suelen aparecer una vez que el fenómeno ya se ha iniciado.

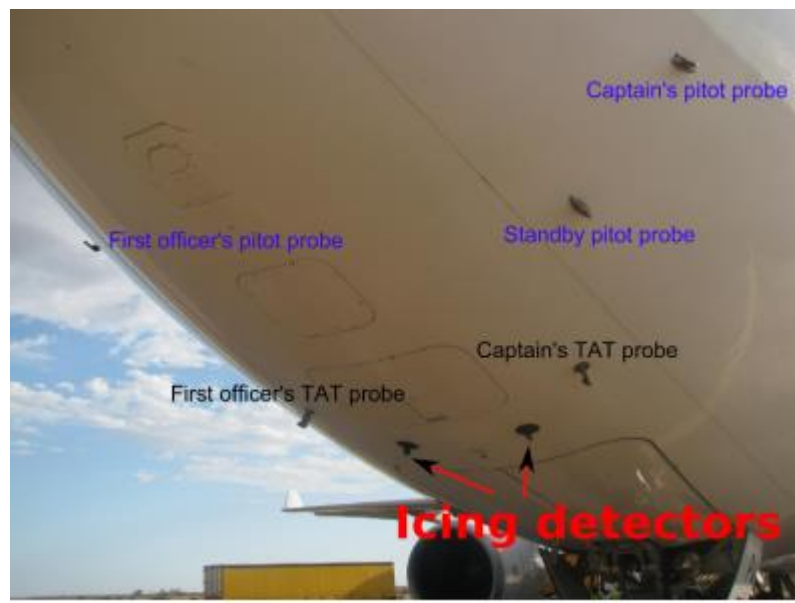


Figura 10 - Sistemas State of the art de detección de la formación de hielo (Fuente Goodrich Aircraft Corporation).

- **Datalink meteorológico en cabina:** mediante sistemas como ACARS, ADS-B o enlaces satelitales, muchas aeronaves transmiten observaciones meteorológicas (temperatura, viento, turbulencia) y reciben información en vuelo. Los pilotos pueden solicitar los últimos METAR y TAF del destino o alternativos, recibir SIGMET actualizados, mapas de tiempo significativo o pronósticos de viento en altitud. Esta información se genera en tierra (por ejemplo, AEMET en el caso de España) y se transmite a la aeronave en tiempo real.
- **Visualización meteorológica remota:** la mayoría de aeronaves ligeras no reciben meteorología actualizada en tiempo real durante el vuelo, salvo aquellas que cuentan con equipos específicos de enlace satelital o suscripciones comerciales. Algunas aeronaves de aviación general avanzada utilizan receptores conectados a servicios satelitales (como Garmin o Iridium) para visualizar radar meteorológico, imágenes satelitales o alertas gráficas directamente en cabina. Sin embargo, estos sistemas son poco comunes en la aviación general básica. Por tanto, la conciencia situacional meteorológica depende en gran medida de la planificación previa al vuelo, de la consulta de productos como METAR, TAF o mapas convectivos mediante plataformas como AEMET, y del contacto por radio con los servicios ATS si se requiere información adicional durante el vuelo.
- **Integración con los sistemas terrestres:** los sistemas meteorológicos embarcados no sustituyen a las herramientas instaladas en tierra (AWOS, radares Doppler, LIDAR, modelos numéricos), sino que las complementan. Mientras los sensores terrestres permiten una vigilancia anticipada, cobertura regional y elaboración de pronósticos, las herramientas a bordo ofrecen una

visión táctica en tiempo real del entorno inmediato de vuelo, actuando como una línea de defensa adicional ante fenómenos no previstos.

2.5 Factores humanos y toma de decisiones

Los factores humanos desempeñan un papel decisivo en la seguridad operacional, especialmente en contextos de meteorología adversa. Según el estudio *Análisis de la influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas* (Publicaciones FAC, 2024), aproximadamente uno de cada cuatro accidentes aéreos está relacionado con fenómenos meteorológicos extremos (tormentas, vientos racheados, cizalladura, baja visibilidad). Sin embargo, no es solo el clima, ya que la toma de decisiones de pilotos y tripulación bajo estas circunstancias suele ser determinante en el desenlace.

En muchos de estos eventos se identifica una constante: errores de juicio por parte de los pilotos al iniciar o continuar un vuelo en condiciones que exceden los márgenes de seguridad operativa. Según el documento *Decision-Making under Meteorological Conditions* (EASA, 2015), elaborado por EASA como parte de su programa de formación en factores humanos, la decisión de proseguir un vuelo en presencia de meteorología inadecuada constituye un factor causal relevante en múltiples accidentes. El informe incluye, entre otros, un análisis de datos de Reino Unido según el cual más del 80 % de los accidentes clasificados como *Controlled Flight Into Terrain* (CFIT) ocurrieron tras la decisión del piloto de continuar el vuelo pese al deterioro meteorológico o sin evaluar correctamente el efecto de las condiciones imperantes. Este fenómeno se conoce coloquialmente como “*get-there-itis*” o sesgo de continuación del plan, donde el deseo de llegar al destino lleva a subestimar el riesgo meteorológico.

Cuando se vuela bajo condiciones meteorológicas peligrosas, la **carga de trabajo** de la tripulación se eleva significativamente. Los pilotos deben monitorizar el radar meteorológico, comunicarse con el control de tráfico, considerar aeropuertos alternos, todo ello mientras pilotan potencialmente en turbulencia, hielo o baja visibilidad. Este incremento de tareas, sumado a la tensión psicológica de lidiar con una amenaza real, genera estrés agudo. Es sabido que el estrés y la fatiga pueden degradar la performance cognitiva y motora, favoreciendo olvidos, percepciones distorsionadas y decisiones apresuradas.

2.5.1 Evolución histórica de los factores humanos en aviación

La consideración de los factores humanos en la aviación ha evolucionado notablemente desde mediados del siglo XX hasta la actualidad. Históricamente, ante un accidente solía atribuirse la causa principal al “error del piloto” sin mayor análisis. Durante décadas prevaleció una cultura de culpa individual: la seguridad dependía casi exclusivamente de la pericia del piloto, y si algo fallaba, se asumía que “alguien no hizo bien su trabajo”. No se examinaban a fondo aspectos como la ergonomía de la cabina, la meteorología, la gestión de la aerolínea o la capacitación recibida. Esta visión comenzó a

cambiar tras varios accidentes sonados en los años 70 que demostraron los límites del enfoque tradicional.

Un punto de inflexión ocurrió con el desastre de Tenerife en 1977, la colisión de dos Boeing 747 en el aeropuerto de Los Rodeos que dejó 583 fallecidos. Si bien múltiples factores convergieron (desvíos por amenaza de bomba, congestión, niebla densa que impedía la visibilidad, frases ambiguas por radio), el detonante fue la decisión de despegar de un capitán sin autorización expresa. Tras este accidente, las autoridades aeronáuticas de todo el mundo se dieron cuenta de que no bastaba con culpar al piloto, había deficiencias en los protocolos y en la dinámica de la cabina que debían corregirse

A finales de los 70 y comienzos de los 80 se introdujeron cambios radicales: se revisó el lenguaje y las frases estándar en las comunicaciones piloto-torre para eliminar ambigüedades (por ejemplo, nunca más responder solo “OK” o “Roger” a una instrucción crítica, sino repetir la orden completa para confirmar entendimiento).

Simultáneamente, se introdujo el concepto de CRM (Crew Resource Management) como una respuesta al accidente de Tenerife. A raíz de este evento, las aerolíneas comenzaron a capacitar a sus tripulaciones en habilidades no técnicas, tales como trabajo en equipo, liderazgo compartido, comunicación efectiva y gestión de riesgos. Este cambio cultural ha demostrado ser fundamental en la mejora de la seguridad operacional, dado que en numerosos incidentes se evitó una catástrofe por el trabajo en equipo.

Desde entonces, cada década ha traído nuevos avances en la incorporación de los factores humanos a la seguridad operacional. En los años 90, las regulaciones comenzaron a exigir formalmente programas de entrenamiento en factores humanos. Se expandió el CRM a prácticamente todas las aerolíneas comerciales y también a la aviación militar y general. Asimismo, surgieron normativas sobre gestión de fatiga de las tripulaciones, límites de horas de vuelo y descanso obligatorio, reconociendo el impacto de estos elementos en la seguridad.

En la década de 2000, la seguridad aérea abrazó un enfoque aún más holístico: se implementaron los Sistemas de Gestión de la Seguridad (SMS) a nivel organizacional, que incluyen la identificación proactiva de peligros (incluidos los humanos) y la gestión de riesgos en todas las operaciones. El ***Threat and Error Management (TEM)*** se incorporó al entrenamiento de vuelo, enseñando a las tripulaciones a anticipar amenazas (como mal tiempo en ruta, fallos técnicos, errores del ATC) y a gestionar los errores de forma que no escalen

El TEM, derivado del CRM, enfatiza mantener siempre una actitud vigilante y una conciencia situacional elevada para detectar desviaciones a tiempo. Además, diferencia entre errores activos y

errores latentes, ayudando a las compañías a buscar y corregir estos últimos antes de que contribuyan a un accidente.

Hoy en día, la industria aérea pone gran énfasis en la capacitación enfocada en factores humanos. La formación CRM es recurrente y obligatoria, con sesiones periódicas donde tripulaciones completas (pilotos y también personal de cabina) practican la toma de decisiones en equipo bajo escenarios de alta presión. Las aerolíneas han integrado en sus simuladores secuencias inspiradas en accidentes reales, para que los pilotos experimenten en un entorno seguro situaciones de meteorología adversa extrema, emergencias concurrentes y alta carga de trabajo, y así desarrollen estrategias adecuadas. Se promueve abiertamente una cultura justa (*Just Culture*) en la que los errores se reportan sin estigmas para aprender de ellos, y donde cualquier miembro del equipo puede señalar un problema de seguridad. En resumen, se ha pasado de subestimar la complejidad humana a entender que la gestión del elemento humano es tan importante como la del elemento técnico en la prevención de accidentes.

2.5.2 Enfoque teórico: modelos SHELL y del queso suizo de Reason

Los accidentes aeronáuticos rara vez obedecen a una sola causa, por el contrario, son el resultado de una combinación de factores humanos, técnicos y organizacionales. Para entender esta multifactorialidad se han desarrollado modelos teóricos en el campo de Factores Humanos. Uno de los más conocidos es el modelo del queso suizo de James Reason. En este modelo, cada capa de queso representa una barrera de seguridad (reglas, procedimientos, tecnología, supervisión, etc.), y los agujeros representan fallos o debilidades en esas defensas. Reason postuló que un accidente ocurre cuando los agujeros de todas las capas se alinean, permitiendo que una cadena de errores atraviese todas las salvaguardas.

The Reason Model and Accident Causal Chain

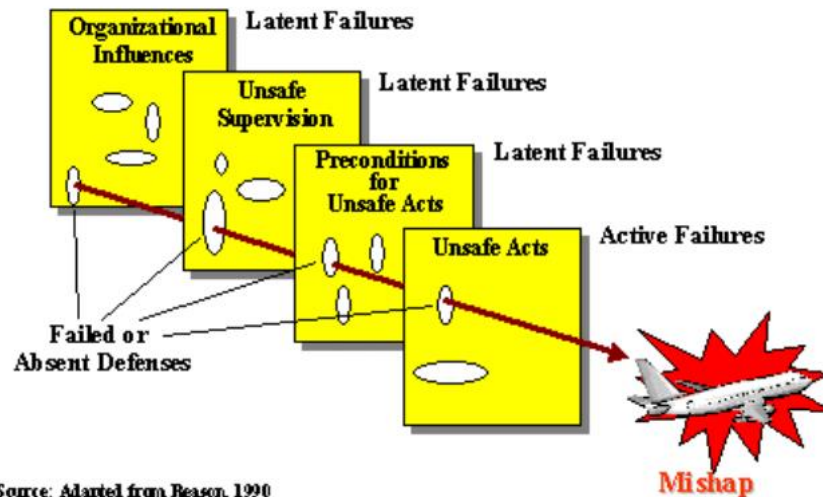


Figura 11 - Modelo de Reason y cadena causal del accidente (Adaptado de Mouw, 2020, a partir de Reason, 1997)

Este enfoque ha sido fundamental para pasar de una visión simplista, culpar únicamente al piloto en última instancia, a una visión sistémica de los accidentes. Así, un error humano en condiciones meteorológicas adversas suele ser *la última pieza* de la cadena, pero dicho error se ve facilitado por fallos latentes: por ejemplo, una instrucción deficiente sobre meteorología, procedimientos inadecuados de empresa, información incompleta por parte del control aéreo, o limitaciones tecnológicas de la aeronave. El modelo de Reason invita a identificar y corregir esas debilidades subyacentes (los “agujeros en el queso”) para evitar que los errores individuales desencadenen tragedias.

Otro marco conceptual ampliamente utilizado en aviación es el **modelo SHELL** (Software-Hardware-Environment-Liveware), propuesto inicialmente por Elwyn Edwards en 1972 y posteriormente ampliado por Hawkins.

Este modelo es ampliamente utilizado para analizar los factores humanos en aviación, ya que proporciona un marco sistemático para identificar posibles desajustes entre el ser humano y los diferentes componentes del sistema operacional.

El modelo parte de la premisa de que el ser humano (Liveware) se encuentra en el centro del sistema, y su desempeño depende directamente de cómo interactúa con el resto de elementos: Software, Hardware, Environment y otros Liveware. Estas interfaces no son siempre perfectas, y los desajustes pueden generar estrés, errores o fallos de coordinación que afectan directamente la seguridad del sistema. Los Componentes del modelo SHELL son:

- **Liveware (L):** El operador humano (por ejemplo, el piloto), con sus capacidades, limitaciones, conocimientos, percepción y toma de decisiones.
- **Software (S):** Elementos intangibles como normativas, manuales, procedimientos, listas de chequeo o instrucciones operativas.
- **Hardware (H):** Equipos físicos, cabina de mando, instrumentos, controles, y en general el diseño ergonómico del entorno técnico.
- **Environment (E):** Condiciones internas y externas del entorno operativo, incluyendo la meteorología, ruido, presión temporal, iluminación o cultura organizacional.
- **Liveware–Liveware (L–L):** La interacción entre personas dentro del sistema (ej. entre piloto y copiloto, o con el control de tráfico aéreo).

El análisis se centra en las interfaces entre estos componentes. Por ejemplo:

- **L–S (Liveware–Software):** Un procedimiento mal redactado o ambiguo puede inducir a errores de ejecución bajo presión.
- **L–H (Liveware–Hardware):** Un diseño de cabina no intuitivo puede generar interpretaciones incorrectas en situaciones críticas.
- **L–E (Liveware–Environment):** Las condiciones meteorológicas extremas, como turbulencia severa o visibilidad reducida, afectan la percepción y la capacidad de decisión.
- **L–L (Liveware–Liveware):** La comunicación deficiente entre tripulantes o con el ATC puede derivar en pérdida de conciencia situacional o decisiones erróneas.

Por ejemplo, el sonado accidente del vuelo Air France 447 (1 de junio de 2009) constituye uno de los casos que marcaron un punto de inflexión en la aviación comercial moderna, al evidenciar cómo una combinación de factores meteorológicos y humanos puede desembocar en un accidente catastrófico incluso en fase de crucero. La aeronave, en ruta entre Río de Janeiro y París, atravesaba una zona de tormentas cuando, como consecuencia del engelamiento de los tubos Pitot, se produjo la pérdida de las indicaciones de velocidad. Esto desencadenó la desconexión del piloto automático y el paso a un régimen de vuelo manual en condiciones degradadas. La tripulación ejecutó maniobras inadecuadas, manteniendo el avión en pérdida durante varios minutos hasta el impacto en el océano Atlántico, con la muerte de los 228 ocupantes (BEA, 2012).

El informe final del BEA puso de manifiesto fallos en la formación específica, la gestión de la automatización y el diseño de interfaz de cabina. Como consecuencia, se promovieron reformas en los programas de entrenamiento, incluyendo el manejo manual a gran altitud, la introducción de indicadores de ángulo de ataque en algunos modelos, y la mejora del enfoque sobre conciencia situacional y gestión del error.

Desde la perspectiva del modelo del queso suizo de Reason, el accidente ilustra la alineación de múltiples barreras fallidas: errores activos por parte de la tripulación y condiciones latentes como carencias en el diseño del sistema y en la preparación para fallos inesperados.

El análisis bajo el modelo SHELL revela desajustes en varias interfaces clave:

- **Hardware–Environment (H–E):** engelamiento de los sensores Pitot (Hardware) en condiciones meteorológicas adversas (*Environment*).
- **Liveware–Software (L–S):** insuficiencia de procedimientos y formación para gestionar la situación.
- **Liveware–Liveware (L–L):** coordinación y comunicación ineficaces entre los pilotos.
- **Liveware–Hardware (L–H):** falta de presentación clara de parámetros críticos como el ángulo de ataque.

En síntesis, los modelos SHELL y Reason no deben considerarse enfoques contrapuestos, sino herramientas complementarias para el análisis de las causas del error humano. El modelo Reason proporciona una perspectiva longitudinal que permite comprender cómo se alinean las deficiencias presentes en distintas capas del sistema, incluidas las interacciones descritas por el modelo SHELL, hasta desembocar en un accidente. Por su parte, el modelo SHELL ofrece un marco conceptual que facilita el análisis detallado de los posibles desajustes en las interacciones humanas dentro del entorno operativo.

3 METODOLOGÍA

3.1 Enfoque del estudio

Este trabajo adopta un enfoque cualitativo y descriptivo, centrado en el análisis de accidentes aéreos en los que las condiciones meteorológicas adversas han desempeñado un papel causal o contribuyente. Para contextualizar el fenómeno, se ha elaborado una base de datos propia a partir de registros obtenidos del portal **Aviation Safety Network (ASN)**, gestionado por la **Flight Safety Foundation (FSF)**.

La Flight Safety Foundation es una organización internacional sin ánimo de lucro, fundada en 1945 con sede en Alexandria, Virginia (Estados Unidos), dedicada exclusivamente a proporcionar orientación y recursos expertos, independientes e imparciales en materia de seguridad operacional en la aviación civil. Su capacidad para identificar riesgos globales, fomentar el intercambio de información y promover soluciones técnicas le ha otorgado un reconocimiento consolidado en el sector. Actualmente, cuenta con más de 1.000 miembros en más de 150 países, y entre sus benefactores se encuentran fabricantes como Airbus, Boeing y Safran, aerolíneas europeas como Aer Lingus, Air France-KLM, British Airways y SWISS y operadores internacionales como Emirates, Delta, United y Korean Air. También forman parte del grupo de benefactores organismos institucionales como EASA o EUROCONTROL, autoridades del sector defensa como la U.S. Air Force y corporaciones industriales vinculadas a la aviación y al transporte, como Thales Group, Honeywell Aerospace o General Electric Aviation.

El portal Aviation Safety Network, desarrollado por la FSF, contiene información sobre más de 23.000 accidentes e incidentes que involucran aeronaves de transporte comercial, militar o ejecutivo, desde el año 1919 hasta la actualidad. Esta base de datos se actualiza diariamente y recoge datos procedentes, en su mayoría, de informes oficiales emitidos por organismos gubernamentales de investigación de accidentes y autoridades de aviación civil. Además, ASN dispone de una *Wikibase* participativa con más de 258.000 registros adicionales de aeronaves ligeras, helicópteros, planeadores, globos aerostáticos y UAVs, y de una base específica para drones. Aunque esta última no se ha utilizado para este estudio.

La base puede consultarse mediante distintos filtros: tipo de aeronave, región geográfica, país, matrícula o categoría del suceso (*occurrence category*). En este estudio, el filtrado se ha realizado utilizando el campo “*occurrence type*”, seleccionando exclusivamente los sucesos clasificados como “**weather**”. Esta categoría incluye todos aquellos eventos en los que las condiciones meteorológicas han estado presentes como factor relevante, y se desglosa en los siguientes fenómenos:

- *Heavy rainfall* – Lluvias intensas
- *Icing* – Englamiento
- *Lightning strike* – Impacto de rayo
- *Snow* – Nieve
- *Thunderstorm* – Tormenta eléctrica
- *Turbulence* – Turbulencia - TURB
- *Visibility (low)* – Visibilidad reducida
- *Wind (crosswind, gusting wind)* – Viento (cruzado, racheado)
- *Wind shear / downdraft* – Cizalladura / descendencia brusca de aire - WSTRW

A partir del total de registros meteorológicos disponibles para el periodo comprendido entre 1990 y febrero de 2025, se ha generado una clasificación según el tipo de fenómeno adverso de la lista anterior. Esto ha permitido obtener una visión panorámica del número de eventos asociados a cada categoría.

Posteriormente, el análisis detallado del trabajo se ha centrado en una muestra de esta base de datos de **diez accidentes representativos**, escogidos por su carácter catastrófico, su relevancia en el ámbito de la aviación comercial y la disponibilidad de información técnica suficiente. La finalidad es identificar patrones comunes que permitan comprender las vulnerabilidades sistémicas de la aviación ante condiciones meteorológicas adversas, prestando especial atención a factores operacionales, humanos y tecnológicos.

3.2 Fuente de datos y análisis

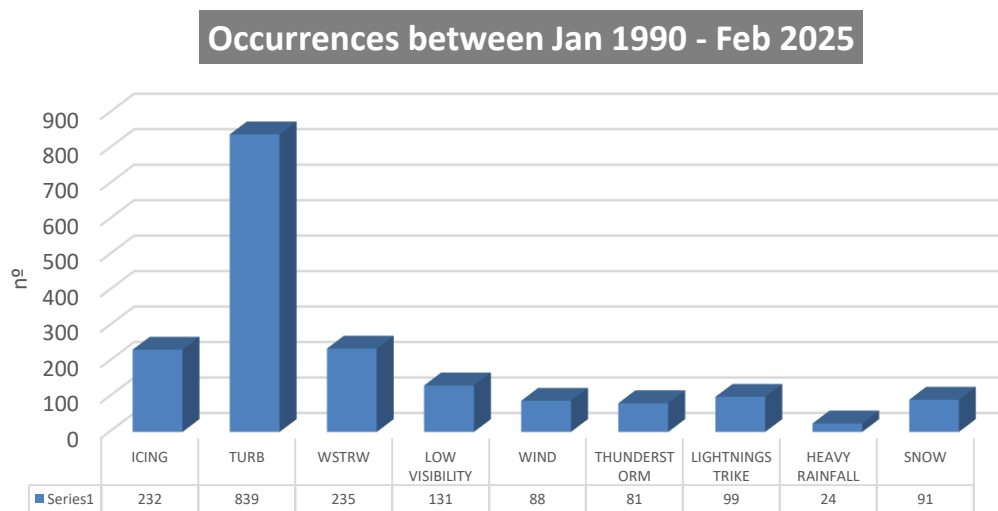
Con el objetivo de contextualizar la magnitud e impacto de los accidentes relacionados con fenómenos meteorológicos adversos, se ha llevado a cabo un análisis cuantitativo sobre una base de datos compuesta por 1.820 accidentes ocurridos entre 1990 y febrero de 2025. Esta información ha sido depurada y clasificada por tipo de fenómeno meteorológico (según la clasificación mencionada arriba) y aquellos con víctimas mortales.

Para cada categoría se contabilizó el número total de eventos registrados y el subconjunto que resultó en víctimas mortales (>1).

El fenómeno más recurrente es el de la turbulencia (839), seguido de la cizalladura (235) y el englamiento (232). Sin embargo, el mayor número de accidentes con víctimas mortales se concentra en los casos de ICING (113) y LOW VISIBILITY (61).

	Nº OCCURRENCES	Nº DE OCCURRENCES CON >1 VÍCTIMA
TURB	839	43
WSTRW	234	69
ICING	232	113
LOW VISIBILITY	131	61
LIGHTNINGSTRIKE	99	5
SNOW	91	2
WIND	88	0
THUNDERSTORM	81	25
HEAVY RAINFALL	23	5

Tabla 8 - Ocurrencias según efecto meteorológico



Posteriormente, para facilitar el análisis comparativo entre distintos tipos de fenómenos meteorológicos, se ha adoptado una clasificación operativa del nivel de severidad de los accidentes en función del número de víctimas mortales. Esta escala, utilizada habitualmente en estudios de seguridad aérea, permite establecer categorías que diferencian entre accidentes sin víctimas, leves, graves, muy graves y catastróficos. Estas serían las categorías definidas según el número de víctimas mortales:

- Catastrófico: más de 50.
- Muy grave: entre 11 y 50.
- Grave: entre 2 y 10.
- Leve: 1.
- Sin víctimas: 0.

	Catastrófico >50	Muy grave 11-50	Grave 2-10	Leve 1	0 Víctimas	Total
TURB	0	1	20	22	796	839
WSTRW	5	5	36	23	166	234
ICING	6	15	62	30	119	232
LOW VISIBILITY	4	12	34	11	70	131
LIGHTNINGSTRIKE	0	1	3	1	94	99
SNOW	0	0	0	2	89	91
WIND	0	0	0	0	88	88
THUNDERSTORM	3	6	13	3	56	81
HEAVY RAINFALL	0	2	2	1	19	17

Tabla 9 - Efectos meteorológicos vs Accidentes

En la tabla se observa la correlación entre los fenómenos meteorológicos y el número de víctimas mortales, permitiendo identificar aquellos eventos con mayor potencial catastrófico:

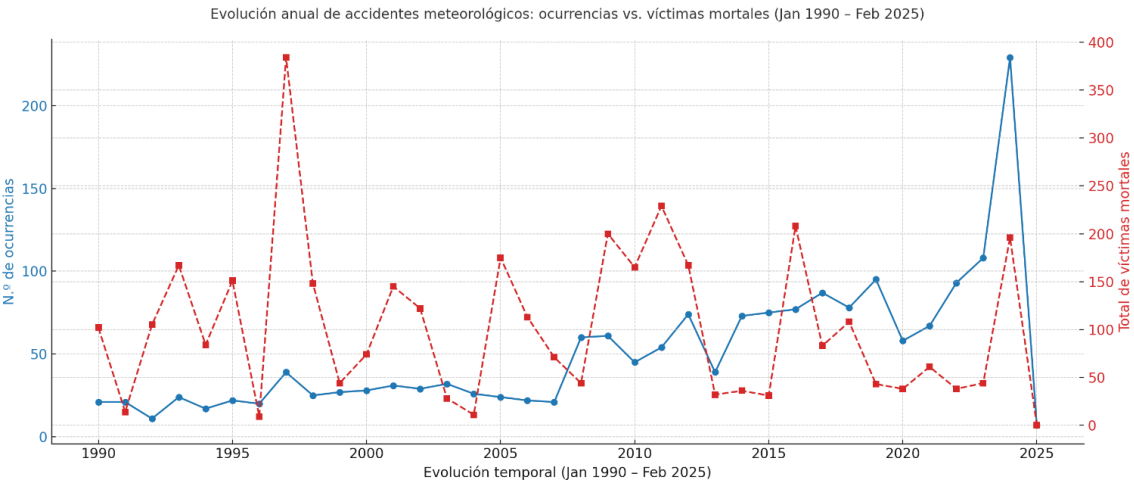
- En primer lugar, el fenómeno **ICING** destaca como el más crítico en términos de severidad acumulada, con 6 accidentes catastróficos (más de 50 víctimas mortales), 15 muy graves, y un total de 107 accidentes con al menos una víctima mortal.
- También resultan especialmente relevantes los casos de cizalladura (**WSTRW**) y baja visibilidad (**LOW VISIBILITY**), ambos con múltiples accidentes catastróficos (5 y 4 respectivamente) y un número elevado de accidentes graves.
- Los fenómenos **THUNDERSTORM** y **HEAVY RAINFALL** presentan una peligrosidad intermedia, con algunos casos graves y catastróficos, aunque menos frecuentes en número total. En el caso específico de **THUNDERSTORM**, se contabilizan 3 accidentes catastróficos y 19 con víctimas.
- Por el contrario, fenómenos como **WIND** y **SNOW**, a pesar de tener una presencia significativa en el total de ocurrencias, no registran ningún accidente con víctimas mortales en esta base de datos, lo que sugiere que su impacto operativo es relevante pero gestionable con procedimientos adecuados.
- Finalmente, **LIGHTNINGSTRIKE**, si bien está presente en 99 registros, solo ha producido 5 accidentes con víctimas, de los cuales uno fue clasificado como “muy grave”, lo que sugiere que el riesgo asociado es bajo, aunque no despreciable.

También se ha analizado la **evolución temporal** de los accidentes meteorológicos registrados entre 1990 y 2025, con el objetivo de identificar posibles patrones o tendencias en cuanto a su frecuencia y severidad. Para ello, se elaboró una tabla con el número anual de ocurrencias y el total de víctimas mortales asociadas a cada ejercicio, y se representaron gráficamente ambos indicadores.

Año	Ocurrences	Fatalities
1990	21	102
1991	21	14
1992	11	105
1993	24	167
1994	17	84
1995	22	151
1996	20	9
1997	39	384
1998	25	148
1999	27	44
2000	28	74
2001	31	145
2002	29	122
2003	32	28
2004	26	11
2005	24	175
2006	22	113
2007	21	71

Año	Ocurrences	Fatalities
2008	60	44
2009	61	200
2010	45	165
2011	54	229
2012	74	167
2013	39	32
2014	73	36
2015	75	31
2016	77	208
2017	87	83
2018	78	108
2019	95	43
2020	58	38
2021	67	61
2022	93	38
2023	108	44
2024	229	196
2025	7	0

Tabla 10 - Ocurrencias vs Año vs Fatalidades



El número de accidentes muestra una tendencia ascendente a partir de la década de 2010, con un incremento progresivo que culmina en un pico máximo en 2024. Este comportamiento podría reflejar una mayor exposición operacional, pero también una mejora en la disponibilidad de datos y en la sistematización del reporte, fruto de avances en los sistemas de registro y transparencia informativa en el ámbito aeronáutico.

En contraste, el número de víctimas mortales por año no sigue una evolución tan lineal, sino que presenta fluctuaciones asociadas a eventos puntuales de alta severidad, como los ocurridos en 1997,

2005 o 2011. Esto sugiere que la severidad de los accidentes meteorológicos está influida por factores específicos de cada suceso, más que por una tendencia general creciente.

3.3 Criterios de análisis de accidentes

La selección de los diez accidentes incluidos en este estudio se ha basado en un criterio cualitativo, fundamentado en el impacto operacional, la representatividad meteorológica y la disponibilidad de información técnica verificable. Estos casos se han elegido a partir del análisis preliminar de los 1.820 sucesos clasificados como “*weather*” en la base de datos de Aviation Safety Network (ASN), para un periodo comprendido entre enero de 1990 y febrero de 2025.

El criterio de elección se ha basado principalmente en:

- **Contexto tecnológico:** A partir de la década de 1990, se generaliza el uso de tecnologías clave como sistemas EGPWS/TAWS, automatización avanzada en cabina, radar meteorológico digital, sensores de engelamiento y software de planificación meteorológica, lo que permite analizar la interacción entre condiciones meteorológicas y herramientas modernas de mitigación.
- **Disponibilidad y calidad de los informes:** A diferencia de décadas anteriores, en este periodo aumenta significativamente la disponibilidad de informes de investigación completos y estructurados conforme al Anexo 13 de la OACI, especialmente tras la consolidación de organismos como la BEA, NTSB, AAIB, entre otros.
- **Homogeneidad normativa y operacional:** A partir de los años 90 se produce una armonización de la normativa internacional (OACI, JAA, EASA, FAA), lo que permite comparar decisiones operacionales, procedimientos y factores humanos en un entorno regulatorio más uniforme.
- **Relevancia actual del análisis:** Centrar el estudio en los últimos 35 años permite abordar patrones vigentes, cuyas lecciones pueden extrapolarse con mayor utilidad a los desafíos presentes y futuros en materia de seguridad operacional ante fenómenos meteorológicos adversos.

A partir de esto, de los 1.820 sucesos registrados como “*weather*” en la base de datos, se ha realizado un análisis orientado a identificar patrones comunes y seleccionar una muestra significativa con diez accidentes representativos

La priorización de los casos seleccionados se ha basado en los siguientes criterios:

- **El carácter catastrófico del accidente** (con múltiples víctimas mortales y pérdida total de la aeronave).

- La **relevancia meteorológica** del fenómeno involucrado.
- El **tipo de operación** aérea, priorizando vuelos comerciales.
- Y la **disponibilidad de informes oficiales** completos y detallados, emitidos por autoridades reconocidas conforme al Anexo 13 de la OACI.

En base a estos criterios, se han incluido tres casos relacionados con cizalladura (WSTRW), dos con engelamiento (ICING) y dos con visibilidad reducida (LOW VISIBILITY), al ser estos fenómenos los que, según los datos analizados, se asocian con mayor frecuencia a accidentes catastróficos o muy graves. A ellos se añaden casos puntuales representativos de otras categorías meteorológicas relevantes, con el fin de aportar diversidad técnica y regional a la muestra final.

	Vuelo	Fecha	Tipo de accidente	Fenómeno meteorológico principal	Víctimas mortales	Región
1	FTL101	10/10/2001	LOC-I	LIGHTNINGSTRIKE	10	Europa (España)
2	TANS Perú ELV204	23/08/2005	CFIT	HEAVY RAINFALL	40	Sudamérica (Perú)
3	Sosoliso Airlines 1145	10/12/2005	LOC-I	WSTRW	108	África (Nigeria)
4	Bhoja Air 213	20/04/2012	LOC-I	WSTRW	127	Asia (Pakistán)
5	N100EQ	08/12/2014	LOC-I	ICING	6	Norteamérica (EE. UU.)
6	Flydubai FZ981	19/03/2016	LOC-I	WSTRW	62	Europa (Rusia)
7	Saratov Airlines 703	11/02/2018	LOC-I	ICING	71	Europa (Rusia)
8	Air India Express 1344	07/08/2020	Runway excursion	LOW VISIBILITY	21	Asia (India)
9	Tara Air 197	29/05/2022	CFIT	LOW VISIBILITY	22	Asia (Nepal)
10	Precision Air 494	06/11/2022	CFIT	THUNDERSTORM	19	África (Tanzania)

Tabla 11 - Accidentes analizados

4 ANÁLISIS DE ACCIDENTES

4.1 Accidente del vuelo 703 de Saratov Airlines – 11 de febrero de 2018 (LOC-I)

El 11 de febrero de 2018, el vuelo 6W703 de Saratov Airlines, operado por un Antonov An-148-100V (matrícula RA-61704), se estrelló cerca de Stepanovskoye, en la región de Moscú, Rusia. La aeronave quedó completamente destruida y murieron los 71 ocupantes a bordo (65 pasajeros y 6 tripulantes).



Figura 12 - Antonov An-148 Moskva-Domodovovo Airport (DME/UUDD); 06 May 2017;

La aeronave despegó del Aeropuerto de Moscú-Domodédovo (DME) a las 14:21 hora local en condiciones meteorológicas adversas, con visibilidad reducida, nieve, **temperaturas bajo cero y alta humedad**, lo que favorecía la formación de hielo en la aeronave. Antes del despegue, la tripulación no activó la calefacción de los tubos pitot, lo que provocó que estos sensores se congelaran, bloqueando la medición de la presión total del aire y generando indicaciones erróneas de velocidad en los instrumentos de la cabina.

El accidente fue investigado por el Comité Interestatal de Aviación (IAC), a través de su Comisión de Investigación de Accidentes Aéreos, con la participación de la Agencia Federal de Transporte Aéreo de Rusia (Rosaviatsia). La investigación se llevó a cabo conforme a las disposiciones del Anexo 13 de la OACI.

Desarrollo del accidente

I. Rodaje y despegue

- Durante la preparación previa al vuelo, la tripulación no activó el sistema de calefacción de las sondas Pitot, acción prevista en la checklist “*Before Takeoff*”. Como resultado, el sistema de indicación y alarma centralizada KISS (Integrated System and Alarm Indicator) mostró seis mensajes de advertencia en cabina, entre los cuales se incluían tres relativos a la ausencia de calefacción en los tubos Pitot.
- De acuerdo con el registro del *Cockpit Voice Recorder* (CVR), no se produjeron comentarios entre los miembros de la tripulación en relación con dichas advertencias, ni se identificó ninguna acción dirigida a su comprobación o corrección durante el rodaje o antes del despegue.
- La aeronave despegó de la pista 14R del aeropuerto de Domodédovo a las 14:21 hora local. El ascenso inicial fue normal y se activó el piloto automático.

II. Ascenso inicial y aparición de discrepancias de velocidad (1300–2000 m)

- A los 2 minutos y 30 segundos del despegue, a aproximadamente 1.300 m de altitud, se registraron las primeras discrepancias entre los indicadores de velocidad:
 - Los instrumentos del comandante (ASI – *Air Speed Indicator*) indicaban una disminución de velocidad
 - El indicador de velocidad de reserva (standby ASI) mostraba valores normales y en aumento (aproximadamente 540–560 km/h).
- En ese momento, la tripulación aún no intercambió comentarios explícitos sobre la discrepancia de velocidades. La progresiva divergencia entre instrumentos no fue verbalizada de forma estructurada.

III. Desconexión del piloto automático y entrada en una actitud inestable (2000–2300 m)

- En respuesta a las anomalías de velocidad el piloto automático fue desconectado manualmente y la tripulación asumió el control del avión
- Por esas discrepancias en la velocidad, el capitán interpretó que la aeronave estaba perdiendo velocidad por lo que tiró de la palanca de control para elevar la nariz del avión (*nose-up*). Esta acción aumentó el ángulo de ataque, reduciendo la sustentación y acercando el avión a una pérdida aerodinámica (*stall*).
- Según el CVR, la tripulación mantuvo intercambios breves, en los que el copiloto comentó la caída de velocidad en el lado izquierdo, y el comandante indicó que su ASI marcaba cero. No se mencionó el uso del indicador de reserva, ni se inició el procedimiento correspondiente para una situación de velocidad no fiable (*unreliable airspeed*).

IV. Pérdida de control y descenso rápido (a partir de 2300 m)

- La aeronave comenzó a adoptar una actitud de morro abajo, con valores de pitch descendiendo progresivamente hasta $-30^{\circ}/-35^{\circ}$.
- El factor de carga (G) se redujo a 0, indicando una situación de caída libre parcial sin sustentación efectiva.
- Según el CVR, el copiloto preguntó: “¿Qué está pasando?”, mientras el comandante respondió: “La velocidad está en cero... no entiendo.” No obstante, no se aplicó el procedimiento para indicación errónea de velocidad, ni se intentó recuperar la actitud de vuelo.

V. Impacto

A las **14:27 hora local**, la aeronave impactó contra un campo nevado en actitud de morro abajo pronunciada, tras una pérdida total de control en vuelo. La aeronave quedó completamente destruida. No se produjeron comunicaciones adicionales ni llamadas de emergencia previas al impacto.



Figura 13 - Foto MAK; Moskva-Domododovo Airport (DME/UUDD); 11 Feb 2018

Conclusiones de la investigación

El accidente del vuelo Saratov Airlines 6W703 fue clasificado como una pérdida de control en vuelo (Loss of Control In-Flight – LOC-I) durante la fase de ascenso, en condiciones meteorológicas instrumentales (IMC), como consecuencia de lecturas erróneas de velocidad generadas por la congelación simultánea de las sondas Pitot, que no habían sido calefactadas antes del despegue. La tripulación reaccionó de forma inadecuada a la información errónea, provocando la entrada del avión en una actitud anómala que derivó en un descenso descontrolado y el posterior impacto contra el terreno.

Entre los factores contribuyentes se identificaron:

- **Omisión de activación del sistema de calefacción de sondas Pitot antes del despegue:** La tripulación no activó manualmente la calefacción de las tres sondas Pitot, a pesar de estar contemplado en la checklist “*Before Takeoff*”, y pese a las condiciones meteorológicas bajo cero.
- **Presencia de advertencias activas en el sistema KISS antes del despegue:** El sistema mostró seis advertencias en cabina, entre ellas tres sobre la ausencia de calefacción Pitot. Sin embargo, el CVR no registró ningún comentario ni acción por parte de la tripulación, lo que indica que dichas advertencias fueron ignoradas.
- **Normalización operativa de despegues con advertencias activas:** La investigación evidenció que en la práctica operativa de la aerolínea era habitual iniciar el despegue con múltiples mensajes activos en el sistema KISS, sin considerar sus implicaciones para la seguridad. Esta tolerancia redujo la sensibilidad de las tripulaciones ante alarmas potencialmente críticas.
- **Falta de diagnóstico ante lecturas anómalas de velocidad:** Al alcanzar los 2.000 metros de altitud, los sistemas de velocidad comenzaron a mostrar discrepancias crecientes. El comandante observó una caída hasta 0 km/h en su ASI, mientras el standby ASI mostraba velocidades superiores a 500 km/h. No se realizó ninguna comprobación cruzada ni se aplicó el procedimiento correspondiente para “*unreliable airspeed*”.
- **Desconexión del piloto automático sin evaluación adecuada de la situación:** La desconexión fue manual y no fue precedida por un análisis coordinado. Esto trasladó el control manual a una fase crítica del vuelo, con indicaciones erróneas y elevada carga de trabajo.
- **Reacción inapropiada del comandante:** El piloto al mando actuó sobre la base de una indicación incorrecta y realizó una entrada de control en dirección morro arriba (*nose-up*), lo que incrementó el ángulo de ataque, redujo la sustentación y facilitó la transición hacia una actitud inestable.
- **Ausencia de uso del indicador de reserva (standby ASI):** Aunque el indicador de reserva ofrecía una referencia válida y coherente de velocidad, no fue considerado por la tripulación durante la gestión de la anomalía.
- **Falta de intervención del copiloto:** El primer oficial expresó verbalmente su desconcierto ante la situación, pero no tomó medidas correctivas ni asumió el control de la aeronave.
- **Deficiencias en la formación sobre fallos de velocidad:** El informe señala que la aerolínea no proporcionaba entrenamiento práctico suficiente para escenarios de discrepancias de velocidad. Además, los simuladores de la compañía no estaban capacitados para reproducir fallos reales del sistema de medición de velocidad, lo que impidió que los pilotos entrenaran cómo validar los datos con el ASI de reserva.

- **Debilidades sistémicas en la cultura de seguridad operacional:** La investigación identificó prácticas estructurales dentro de la organización que comprometían la seguridad, como la tolerancia al despegue con mensajes de advertencia activos, la omisión de anotaciones de fallos en el logbook, la falta de análisis tras incidentes operacionales y la aceptación generalizada de desviaciones respecto a procedimientos establecidos.

4.2 Accidente del vuelo Air India Express 1344 – 7 de agosto de 2020 (Runway Excursion)

El 7 de agosto de 2020, el vuelo Air India Express 1344, operado por un Boeing 737-800, sufrió una excursión de pista en el Aeropuerto de Kozhikode-Calicut, India, y cayó por un terraplén de 35 metros, partiéndose en dos. A bordo viajaban 190 personas, de las cuales 21 fallecieron (incluyendo ambos pilotos) y múltiples ocupantes sufrieron heridas de diversa gravedad.

El accidente ocurrió debido a que el capitán intentó aterrizar en una aproximación inestable, aterrizando demasiado tarde en la pista mojada, lo que impidió que la aeronave se detuviera a tiempo.

En el momento del accidente en la aproximación, las condiciones meteorológicas eran adversas:

- Visibilidad: 2.000 metros con lluvia.
- Viento: 260° a 12 nudos (viento en cola para la pista 10).
- Nubes: Nubosidad dispersa a 300 y 1.200 ft, cumulonimbos a 2.500 ft y cielo cubierto a 8.000 ft.

El Aeropuerto de Kozhikode es un "*tabletop airport*" (aeropuerto construido en una meseta), lo que significa que más allá del final de la pista hay una fuerte pendiente. En este caso, la pista tenía una longitud de 2.850 metros, con una zona de seguridad (RESA) de 93 metros, seguida de un desnivel de 35 metros, lo que aumentó la severidad del accidente.



Figura 14 – FZ981 Informe de investigación – Crash site

Desarrollo del accidente

I. Aproximación inicial y primer intento de aterrizaje

- El vuelo AXB 1344 despegó del Aeropuerto Internacional de Dubái (DXB) a las 10:00 UTC con destino a Kozhikode-Calicut (CCJ), India.
- A las 13:42 UTC, la aeronave inició la primera aproximación a la pista 28 en condiciones meteorológicas adversas: lluvia moderada, visibilidad de 1.500–2.000 metros y presencia de tormentas en las inmediaciones.
- A una altitud de aproximadamente 600 metros, el limpiaparabrisas del lado del comandante (*wiper*) dejó de funcionar, lo que afectó la visibilidad frontal.
- Como no se estableció contacto visual con la pista en mínimos, la tripulación ejecutó un *go-around* conforme al procedimiento publicado, aplicando potencia TOGA y configurando la aeronave para ascenso.
- Sin embargo, tras la maniobra, la tripulación no se desvió a un aeropuerto alternativo, a pesar de que el Manual de Operaciones de la compañía (OM-A) establece que, en condiciones meteorológicas adversas y sin funcionamiento del limpiaparabrisas, la desviación es obligatoria.
- En su lugar, decidieron realizar una segunda aproximación, esta vez a la pista 10, con viento en cola

II. Segundo intento de aterrizaje en la pista 10

- A las 14:08 UTC, la aeronave se estableció en la aproximación ILS a la pista 10, con viento en cola de hasta 14 nudos (26 km/h). Se configuró con flaps 30 y se desconectó el piloto automático.
- Durante los últimos segundos, el descenso se volvió inestable, con tasas de hasta 457 metros por minuto y desvíos laterales. El copiloto informó de que el avión se estaba desviando del *glideslope* (estaba descendiendo por debajo de la trayectoria ideal) y que además la tasa de descenso era excesiva. Después, el sistema EGPWS (*Enhanced Ground Proximity Warning System*) emitió dos alertas de “*glideslope*”.
- A 5 metros de altitud radar, el copiloto dijo “*just check it*”, y a 3 metros, emitió una orden verbal de “*go-around*”. Esta advertencia no fue seguida por el comandante, quien continuó con el aterrizaje.
- La toma de contacto ocurrió a las 14:10 UTC, a 1.352 metros del umbral de pista (más allá del punto óptimo de aterrizaje) y con una velocidad sobre el suelo de 306 km/h, lo que dejó una distancia insuficiente para frenar con seguridad.

- Se aplicó frenado manual y se desplegaron los reversores de empuje, pero el sistema de frenado automático (*autobrake*) se desactivó prematuramente, y la secuencia de frenado fue tardía y poco efectiva.
- El copiloto intentó alertar al comandante de que los *autobrakes* estaban desactivados, pero no recibió respuesta. Durante la carrera de aterrizaje se escucharon expresiones de frustración de ambos pilotos.

III. Excursión de pista y colisión con el terreno

- La aeronave rebasó el extremo de la pista 10 a una velocidad de 156 km/h, sin haber conseguido detenerse.
- Tras atravesar la zona de seguridad (RESA), golpeó la antena del ILS y la valla perimetral, y cayó por un desnivel de aproximadamente 33 metros desde el borde del tabletop runway.
- El impacto final se produjo a 76 km/h contra una carretera perimetral. El fuselaje se partió en tres secciones principales y ambos motores se separaron de las alas.
- Como resultado del accidente, fallecieron 21 personas (incluidos ambos pilotos), y más de 75 sufrieron heridas graves.



Figura 15 - FZ981 Informe de investigación

Conclusiones de la investigación

El accidente fue investigado por la Aircraft Accident Investigation Bureau (AAIB) de la India y fue clasificado como una excursión de pista (*runway overrun*) durante el aterrizaje en condiciones meteorológicas adversas, lo que resultó en la pérdida de control de la aeronave y su colisión con el terreno. Ocurrió debido a la decisión del capitán de continuar con un aterrizaje inestable, aterrizando demasiado tarde en una pista mojada. La falta de una maniobra de escape a tiempo y la excursión de pista fueron las causas directas del desastre.

Entre los factores contribuyentes se identificaron:

- **Factores meteorológicos y operacionales:** Había lluvia intensa, lo que reducía la visibilidad a 2.000 metros y dificultaba la evaluación de la distancia a la pista, y viento en cola de 12 nudos, lo que aumentó la velocidad de aterrizaje y redujo la capacidad de frenado. La combinación de pista mojada y una pendiente descendente aumentó la distancia de frenado necesaria.
- **Errores de la tripulación:** El capitán no respetó los procedimientos estándar (SOP) y continuó con un aterrizaje inestable. El copiloto no tomó el control de la aeronave, a pesar de ser consciente del peligro, manifestado falta de trabajo en equipo en cabina (CRM deficiente) sin una comunicación efectiva que impidió una toma de decisiones correcta bajo presión.
- **Estado del capitán:** Se descubrió que el capitán estaba tomando múltiples medicamentos para la diabetes, lo que pudo haber afectado su capacidad de toma de decisión. Su experiencia previa en el aeropuerto con condiciones similares pudo haberle dado exceso de confianza, afectando su percepción del riesgo.
- **Factores estructurales y organizacionales:** La aerolínea presentaba una falta de supervisión en el entrenamiento de los pilotos y en la seguridad operacional y contribuyó a que las deficiencias en la toma de decisiones de la tripulación no fueran corregidas a tiempo. La política de asignación de pilotos dejó a Kozhikode con solo un capitán disponible lo que pudo haber influido en su decisión de aterrizar en condiciones no seguras con el objetivo de cumplir con el itinerario del día siguiente.

El entrenamiento en gestión de recursos en cabina (CRM) y toma de decisiones bajo presión era insuficiente lo que llevó a que el copiloto no ejerciera su autoridad en una situación crítica y a que el capitán tomara una decisión errónea sin ser cuestionado
- **El informe reveló fallas significativas en el simulador de vuelo** de AIXL, lo que afectó el entrenamiento de los pilotos. No se podían entrenar aterrizajes en pistas contaminadas, una condición crítica en el accidente. Además, el simulador tenía deficiencias técnicas, como por ejemplo indicadores de flaps con lecturas erróneas, extensión manual del tren de aterrizaje inoperativa o falta de resistencia en las palancas de empuje. También se detectó que algunos ejercicios obligatorios no se realizaban en las pruebas de pilotos, pero se reportaban como cumplidos, lo que generó una formación incompleta.

4.3 Accidente del vuelo Flydubai FZ981 – 19 de marzo de 2016 (LOC-I)

El 19 de marzo de 2016, el vuelo FZ981 de Flydubai operado por un Boeing 737-8KN (matrícula A6-FDN) y con origen del Aeropuerto Internacional de Dubai (DXB), se estrelló durante una

maniobra de aproximación frustrada en el Aeropuerto de Rostov del Don (RVI), en Rusia. La aeronave quedó completamente destruida y murieron los 62 ocupantes a bordo (55 pasajeros y 7 tripulantes).

El accidente fue investigado por el Comité Interestatal de Aviación (IAC) de conformidad con el Anexo 13 de la OACI, con la participación de la Administración Federal de Aviación de los EE. UU. (FAA), la Oficina de Investigación y Análisis para la Seguridad de la Aviación Civil de Francia (BEA), la Autoridad General de Aviación Civil de los Emiratos Árabes Unidos (GCAA) y otras entidades internacionales. La investigación concluyó en noviembre de 2019.

Las condiciones meteorológicas eran adversas y jugaron un papel clave en el accidente del vuelo Flydubai FZ981. Durante la aproximación y las maniobras de escape, la aeronave enfrentó cizalladura de viento (*wind shear*), turbulencia severa y lluvia.

- Visibilidad: 6.000 metros con lluvia ligera
- Viento: 240° a 12 m/s con rachas de hasta 19 m/s
- Turbulencia: Moderada a severa, con cizalladura de viento
- Nubosidad: Nubes dispersas a 1.800 ft, cúmulos desarrollados a 3.600 ft y cielo cubierto a 10.000 ft.

Desarrollo del accidente

I. Primer intento de aterrizaje y frustrada

- El vuelo despegó de Dubái a las 18:37 UTC con destino a Rostov del Don en condiciones IFR.
- A las 22:17 UTC inició el descenso hacia el aeropuerto de destino. Durante esta primera aproximación, la tripulación desconectó el piloto automático y el *autothrottle*.
- A las 22:42 UTC, a una altitud de 330 m (1.080 ft) sobre el nivel de pista, se activó el sistema de alerta de cizalladura (*wind shear warning*).
- Siguiendo el procedimiento (*wind shear escape maneuver*), el comandante interrumpió el aterrizaje e inició una maniobra de motor y al aire (*go-around*), ascendiendo hasta un circuito de espera, donde permanecieron casi dos horas.

II. Segundo intento de aterrizaje y maniobra de escape

- A las 00:23 UTC la tripulación solicitó iniciar una nueva aproximación.
- A las 00:40 UTC, la aeronave, en aproximación manual, recibió nuevamente una alerta de cizalladura de viento a 220 metros (721 ft), a 4,5 km de la pista.

- La tripulación decidió realizar un nuevo go-around, aplicando máxima potencia (TOGA - Takeoff/Go Around Thrust).
- Se configuraron flaps a 15° y se retrajo el tren de aterrizaje,

III. Pérdida de control y colisión con el terreno

- Durante la segunda maniobra de go-around, al alcanzar los 600 metros de altitud, el comandante aplicó una actitud de morro arriba de hasta 18°, mayor a la recomendada, que es entre 10° - 15° para este tipo de maniobra.
- Al superar los 200 nudos, el sistema automático redujo los flaps de 15° a 10° (función *load relief*) para proteger la estructura.
- La combinación de potencia máxima, actitud de nariz arriba y reducción de flaps de la aeronave creó una aceleración positiva que, unida a condiciones de baja visibilidad, probablemente generó en el comandante la ilusión de que el avión se estaba cayendo o entrando en pérdida (ilusión somatogravítica).
- Para corregir la inclinación excesiva, el comandante empujó la columna de control hacia adelante, intentando bajar la nariz del avión, y además mantuvo presionado el interruptor del trim manual del estabilizador en dirección de nariz abajo durante 12 segundos.
- Aunque el avión siguió subiendo un poco más por inercia (hasta aproximadamente 1.000 metros), estas acciones hicieron que el estabilizador continuara bajando el morro del avión, de forma irreversible.
- A partir de ese punto, el avión entró en un descenso extremadamente rápido, con aceleración negativa de -1G. Era como una caída libre.
- El primer oficial se dio cuenta de la situación e intentó advertir al comandante, pero no tomó el control del avión.
- Nadie detuvo la acción del trim ni intentó revertir la actitud con eficacia.
- En menos de un minuto, la aeronave impactó el terreno con una inclinación de nariz abajo de -50°, a una velocidad de 600 km/h (la velocidad de aterrizaje normal para un Boeing 737-800 está entre 240 - 270 km/h) aproximadamente 120 metros antes del umbral de la pista.
- La aeronave quedó completamente desintegrada como consecuencia del impacto a alta velocidad y con una actitud extremadamente pronunciada de nariz abajo, y no hubo supervivientes.



Figura 16 - Impacto aeronave - Informe investigación accidente FZ981

Conclusiones de la investigación

El accidente del vuelo Flydubai FZ981 fue clasificado como una pérdida de control en vuelo (LOC-I) tras una segunda maniobra de escape (go-around) en condiciones meteorológicas adversas.

Se identificaron los siguientes factores contribuyentes en la investigación:

- **Factores meteorológicos y operacionales:** Las condiciones meteorológicas eran adversas, con viento racheado de hasta 19 m/s, cizalladura de viento y turbulencia severa, lo que obligó a la tripulación a realizar dos go-arounds. Además, el vuelo se realizaba en horario nocturno y en IMC, con baja visibilidad y lluvia, lo que afectó la percepción espacial del comandante durante la maniobra de escape
- **Errores de la tripulación en el segundo go-around:** Durante la maniobra, el comandante aplicó potencia máxima con la configuración estándar de escape de cizalladura (*Wind shear Escape Maneuver*), pero al mismo tiempo retrajo el tren de aterrizaje y los flaps, lo que generó un fuerte momento de nariz arriba. Para contrarrestar este ascenso brusco, aplicó una presión sostenida en el control de vuelo hacia adelante y mantuvo presionado el trim del estabilizador en nariz abajo durante 12 segundos, lo que generó un grave desequilibrio y una posterior pérdida de control.
- **Desorientación espacial del comandante:** La combinación de factores como el vuelo nocturno, la falta de referencias visuales y la posible ilusión somatográfica (*pitch-up illusion*) contribuyó a que el comandante aplicara una entrada excesiva de nariz abajo, sin darse cuenta de la aceleración negativa y la caída incontrolada del avión.
- **Falta de coordinación en la cabina (CRM deficiente):** El comandante mostró confusión y una pérdida de liderazgo durante la segunda maniobra de escape. El copiloto no tomó medidas correctivas decisivas a tiempo, lo que refleja una falta de entrenamiento efectivo en CRM para gestionar una situación de pérdida de control.

- **Fatiga operativa:** La tripulación llevaba más de seis horas en servicio, con dos de ellas bajo una alta carga de trabajo debido a las aproximaciones frustradas, lo que pudo haber afectado su capacidad de toma de decisiones y respuesta a la emergencia.
- **Deficiencias en la formación y procedimientos:** El informe identificó deficiencias en la formación de los pilotos y en los procedimientos operativos de la aerolínea, lo que contribuyó a la incorrecta ejecución del go-around y a la pérdida de control del avión. No había instrucciones claras en los manuales de Boeing ni de la aerolínea sobre cómo realizar esta maniobra en condiciones adversas, lo que llevó a la tripulación a combinar acciones inadecuadas, como aplicar potencia máxima TOGA mientras retraían los flaps y el tren de aterrizaje simultáneamente, generando un fuerte cabeceo hacia arriba. Además, el comandante no tenía suficiente entrenamiento en el uso del trim manual del estabilizador, lo que llevó a que mantuviera presionado el interruptor en nariz abajo durante 12 segundos, inclinando el avión de forma progresiva e incontrolada. La falta de formación adecuada sobre el estabilizador y la ausencia de procedimientos claros impidieron que la tripulación respondiera correctamente, resultando en el accidente.

4.4 Accidente del vuelo Precision Air 494 – 6 de noviembre de 2022 (CFIT)

El 6 de noviembre de 2022, el vuelo 494 de Precision Air, operado por un ATR 42-500 (matrícula 5H-PWF), realizaba un trayecto regular de transporte de pasajeros desde el Aeropuerto Internacional Julius Nyerere de Dar es Salaam (DAR) con destino al Aeropuerto de Bukoba (BKZ), en Tanzania. A bordo se encontraban 43 personas: 4 tripulantes (2 pilotos y 2 TCP) y 39 pasajeros (incluido un infante). La aeronave despegó a las 06:10 hora local y el tiempo estimado de llegada a Bukoba era a las 08:25, para un tiempo de vuelo previsto de aproximadamente 2 horas y 15 minutos.

Durante la aproximación final a la pista 31 de Bukoba, la aeronave impactó en la superficie del Lago Victoria, quedando parcialmente sumergida. El accidente causó el fallecimiento de 17 pasajeros y los 2 pilotos. La aeronave fue declarada pérdida total.

El accidente fue investigado por la *Aircraft Accident Investigation Branch* (AAIB) de Tanzania, con la colaboración de la BEA (Francia), ATR (fabricante de la aeronave), TSB (Canadá), AAIB (Reino Unido) y la autoridad de aviación civil de Tanzania (TCAA).

Las condiciones meteorológicas eran adversas y cambiaron de forma súbita poco antes de la llegada del vuelo a Bukoba. Durante la aproximación final, la aeronave se enfrentó a lluvia intensa, tormentas eléctricas, viento cruzado racheado y turbulencia severa.

- Visibilidad: reducida a 2.000 metros (mínimo en VFR 4.800 m)
- Viento: variable, entre 19 y 28 kt, vientos cruzados y racheados
- Nubosidad: Nubes rotas (BKN) a 1.000 ft que cubren gran parte del cielo, presencia de cúmulos tormentosos (CB) aislados a 1.200 ft y cielo completamente cubierto (OVC) a 8.000 ft.
- Turbulencia: moderada a severa
- Sin servicio de control aéreo en destino (Bukoba)

Desarrollo del accidente

I. Inicio del descenso y evaluación meteorológica

- El vuelo PW494 despegó del aeropuerto de Dar es Salaam (DAR) a las 06:10 hora local, con destino Bukoba (BKZ). El vuelo, operado bajo reglas IFR, transcurrió sin incidentes hasta el inicio del descenso.
- A las 08:13 LT, el centro de control de Mwanza (vía frecuencia 122.8 MHz) informó condiciones meteorológicas favorables en Bukoba: visibilidad superior a 10 km, viento en calma y presencia de nubes dispersas y CBs.
- Sin embargo, entre las 08:13 y 08:19 LT, las condiciones meteorológicas cambiaron bruscamente, un SPECI (*Special Weather Report*) reportó las condiciones desfavorables mencionadas
- La tripulación no fue advertida de este cambio, ya que en ese momento ya habían cambiado a la frecuencia no controlada de 118.2 MHz, dado que el aeropuerto de Bukoba no dispone de torre de control ni servicios ATS. Esto les impidió recibir el SPECI actualizado.

II. Primer intento de aproximación frustrado

- A las 08:25 LT, el vuelo se aproximó a Bukoba. El comandante pidió repetidamente al copiloto que localizara la pista, pero esta no era visible debido a la lluvia y la nubosidad baja.
- La tripulación desplegó flaps a 15° y el tren de aterrizaje. Tras no identificar visualmente la pista, ascendieron a 5.500 ft (1.676 m), abortando la aproximación y reconfigurando la aeronave en configuración de crucero.

III. Segundo intento de aproximación frustrado

- Durante el patrón de espera visual, el copiloto sugirió desviar a Mwanza (a 215 km) por razones de combustible y meteorología, pero el piloto decidió continuar en circuito, esperando mejora de condiciones. Se inició una nueva aproximación, esta vez desde la zona de Kemondo.

- A 1.100 ft (335 m), el EGPWS (*Enhanced Ground Proximity Warning System* - Sistema Mejorado de Alerta de Proximidad al Terreno) emitió una alerta de “TERRAIN, TERRAIN, PULL UP”, que no fue seguida de acción inmediata. Se confirmó que la pista seguía sin ser visible.

IV. Tercer intento de aproximación (final y colisión)

- A las 08:42 LT, el copiloto informó tener la pista a la vista, aunque parcialmente obstruida por la lluvia. El comandante retomó el control y configuró la aeronave para el aterrizaje: flaps full (35°), tren extendido, velocidad 189 km/h.
- A 500 ft AGL, el EGPWS emitió la alerta “SINK RATE”. Pocos segundos después, con solo 300 ft de altitud, se registraron más comandos de descenso (*nose-down*). La aeronave volaba a unos 1,700 ft/min (518 m/min) de descenso.
- A 100 ft AGL, el copiloto gritó “*Lift up, Captain*”. Luego, sonó la alerta crítica “PULL UP”, pero no hubo reacción inmediata del comandante. Solo un segundo antes del impacto se detectó un input *nose-up*, pero ya era demasiado tarde.
- Impacto: a las 08:43 LT la aeronave impactó la superficie del Lago Victoria en actitud de 2° nariz abajo, con alabeo de 10° a la izquierda, aproximadamente 500 metros antes del umbral de la pista 31. La velocidad vertical era de 1.500 ft/min (457.2m/min). El impacto separó el tren principal izquierdo y abrió parte del piso de cabina, permitiendo una rápida inundación.



Figura 17 - Foto accidente PW494. AAIB Tanzania

Conclusiones de la investigación

El accidente del vuelo Precision Air PW494 fue clasificado como un Impacto Controlado contra el Terreno (*Controlled Flight Into Terrain – CFIT*), ocurrido durante una aproximación final no estabilizada.

Dicha aproximación se realizó en condiciones meteorológicas adversas que impedían el contacto visual continuo con el terreno, lo que llevó a que la aeronave impactara con la superficie del Lago Victoria.

La investigación identificó los siguientes factores contribuyentes:

- **Decisión operacional del comandante** de continuar con la aproximación en condiciones meteorológicas inferiores a los mínimos requeridos, en lugar de proceder al desvío al aeropuerto alternativo (Mwanza), a pesar de la falta de contacto visual estable con la pista.
- **Presencia de viento cruzado racheado en la fase final de la aproximación**, que afectó la estabilidad de vuelo y el control direccional de la aeronave.
- **Precipitación intensa, turbulencia y actividad convectiva** (CBs) en las inmediaciones del aeropuerto en el momento de la aproximación, que deterioraron rápidamente las condiciones visuales y aumentaron la carga de trabajo.
- **Ausencia de servicios de tránsito aéreo** (ATS) en el Aeropuerto de Bukoba, lo que limitó la provisión de información meteorológica actualizada y la asistencia durante la aproximación en condiciones adversas.
- **Tasa de descenso excesiva a baja altitud**, sin acción correctiva adecuada por parte de la tripulación, contraviniendo los criterios de aproximación estabilizada.
- **Inobservancia de las alertas generadas por el sistema EGPWS**, incluidas “TERRAIN”, “SINK RATE” y “PULL UP”, sin que se ejecutaran maniobras de escape (*go-around*) conforme a los procedimientos establecidos.
- **Carga de trabajo elevada en cabina durante la fase final del vuelo**, derivada de las condiciones meteorológicas adversas, la falta de referencias visuales y la gestión autónoma de la aproximación en un entorno no controlado.
- **Deficiente conciencia situacional del comandante**, evidenciada por la persistencia de inputs de control en dirección morro abajo (*nose-down*) en altitudes críticas, lo que agravó el perfil de descenso y comprometió la recuperación.

4.5 Accidente del vuelo Bhoja Air 213 – 20 de abril de 2012 (LOC-I)

El 20 de abril de 2012, el vuelo BHO213 de Bhoja Air, operado por un Boeing 737-236A (matrícula AP-BKC), realizaba un trayecto desde el Aeropuerto Internacional Jinnah de Karachi (KHI) hacia el Aeropuerto Internacional Benazir Bhutto de Islamabad (ISB). Siendo el vuelo de este día la inauguración de la ruta. A bordo viajaban 127 personas (121 pasajeros y 6 tripulantes). La aeronave despegó a las 17:05 hora local.



Figura 18 - B737-236A Bhoja Air

Durante la aproximación a la pista 30 de Islamabad, el avión ingresó en una línea de tormentas severas (squall line) que incluía turbulencia extrema, vientos racheados y precipitaciones intensas. A pesar de que las condiciones meteorológicas estaban por debajo de los mínimos requeridos y de que el radar meteorológico mostraba claramente la presencia de actividad convectiva intensa, la tripulación decidió continuar la aproximación.

- Visibilidad: reducida a menos de 1.000 metros en precipitación intensa (mínimo VFR: 4.800 m).
- Viento: variable, entre 37 y 74 km/h (20–40 kt), con ráfagas superiores a 120 km/h (65 kt), asociadas a tormenta convectiva.
- Nubosidad: cúmulos tormentosos (CB) a 2.500–3.000 ft (762-914 m), cubriendo gran parte del área terminal.
- Precipitación: lluvia intensa y descargas eléctricas (rayos en cercanías del aeropuerto).
- Turbulencia: moderada a severa, con presencia de corrientes descendentes intensas (*downdrafts*) y cizalladura del viento (*wind shear*) confirmadas.

La investigación fue dirigida por la Autoridad de Aviación Civil de Pakistán, con la participación de la NTSB (EE.UU.), Boeing, la FAA y Pratt & Whitney.

Desarrollo del accidente

I. Vuelo en crucero y preparación para la aproximación

- El vuelo BHO213 despegó del Aeropuerto Internacional Jinnah de Karachi (KHI) a las 17:05 hora local, con destino al Aeropuerto Internacional Benazir Bhutto de Islamabad (ISB), con 121 pasajeros y 6 tripulantes a bordo.
- La aeronave alcanzó su altitud de crucero (FL340) y el vuelo transcurrió normalmente hasta el inicio del descenso hacia Islamabad.
- Durante la aproximación, el comandante ejercía funciones como Pilot Flying (PF), mientras que el primer oficial asumía el rol de Pilot Monitoring (PM).

II. Ingreso en condiciones meteorológicas adversas

- A las 18:34 LT, el centro de control ATC autorizó a la tripulación a iniciar la aproximación ILS a la pista 30 del Aeropuerto Internacional de Islamabad.
- El controlador informó de actividad convectiva en el área de aproximación final, con tormentas eléctricas activas, lluvia intensa y visibilidad variable.
- A pesar de las condiciones meteorológicas adversas, la tripulación continuó con la aproximación sin declarar emergencia ni considerar el desvío a un aeropuerto alternativo.
- Al descender por debajo de 7.000 ft (2.130 m), la aeronave ingresó en una célula de tormenta activa, con precipitación intensa, ráfagas de viento, turbulencia severa y cizalladura (*wind shear*).
- El radar meteorológico a bordo mostraba una célula claramente definida en el eje de aproximación, pero no se realizó maniobra evasiva.
- A las 18:39:00, el FDR registró la entrada en una zona de corrientes descendentes intensas (*downdrafts*) con una tasa de descenso vertical de hasta -40 ft/s (-12 m/s).
- A partir de ese momento, se sucedieron múltiples alertas del EGPWS, incluyendo “WIND SHEAR”, “SINK RATE” y finalmente “PULL UP”.
- A las 18:39:28, el comandante expresó verbalmente “*no... no*” en tono de alarma. Un segundo después, el copiloto pronunció la orden “*Go around, go around*”.
- No se registró respuesta verbal por parte del comandante ni acciones de recuperación.

III. Pérdida de control y colisión con el terreno

- A las 18:39:33, ambos canales del piloto automático se desconectaron. A partir de ese momento, el FDR no registró movimientos significativos en los mandos de vuelo durante al menos 6 a 8 segundos.
- La aeronave continuó descendiendo rápidamente, con una actitud de morro abajo de hasta -25°, sin evidencia de maniobras correctivas por parte de la tripulación.
- La velocidad vertical superó los 5.000 ft/minuto (1.524 m/min), y la velocidad horizontal alcanzó los 520 km/h.
- El sistema EGPWS continuó emitiendo alertas críticas, incluida “PULL UP”, sin que se ejecutaran maniobras de escape.
- A las 18:40 hora local, la aeronave impactó contra el terreno en la localidad de Hussainabad, situada a aproximadamente 9 kilómetros al sureste del aeropuerto de Islamabad.
- El impacto se produjo con actitud de nariz abajo y un alabeo a la izquierda superior a 50°, lo que provocó la desintegración total del fuselaje.
- La energía del impacto fue incompatible con la supervivencia. Fallecieron los 127 ocupantes a bordo.

- Se produjo un incendio posterior al impacto, aunque no hubo fuego en vuelo.



Figura 19 - BHO213 Bureau of Aircraft Accidents Archive

Conclusiones de la investigación

El accidente del vuelo Bhoja Air BHO213 fue clasificado como una **pérdida de control en vuelo (Loss of Control – In Flight, LOC-I)**, ocurrida durante una aproximación en condiciones meteorológicas severas. La aeronave ingresó en una célula convectiva activa con presencia de cizalladura, ráfagas de viento y corrientes descendentes intensas, lo que provocó una pérdida de estabilidad que no fue recuperada por la tripulación.

La investigación identificó los siguientes factores contribuyentes:

- **Decisión de la tripulación de continuar con la aproximación** a pesar de los informes meteorológicos que advertían de tormentas severas en la zona de destino, sin considerar el desvío a un aeropuerto alternativo ni declarar emergencia.
- **Ingreso voluntario en una célula de tormenta activa**, claramente visible en el radar meteorológico de a bordo y señalada por el control de tránsito aéreo, sin solicitar vectores de evasión ni ejecutar una maniobra de escape. El informe destaca que la tripulación continuó deliberadamente con la aproximación por una trayectoria afectada por actividad convectiva severa, contraviniendo los procedimientos operacionales establecidos. Conforme a las recomendaciones del Anexo 6 de OACI, los manuales de operación (FCOM/FCTM) y la doctrina operativa estándar de la industria, las tripulaciones están obligadas a evitar de forma proactiva las zonas de fuerte actividad convectiva, especialmente en fase de aproximación, mediante desvío, go-around o coordinación táctica con el ATC. La omisión de esta acción

constituyó un incumplimiento de las prácticas internacionales reconocidas de gestión del riesgo meteorológico.

- **Presencia de condiciones meteorológicas adversas extremas:** lluvia intensa, cumulonimbos desarrollados, viento racheado, turbulencia severa, cizalladura del viento (*wind shear*) y corrientes descendentes (*downdrafts*), incompatibles con una aproximación estabilizada.
- **Respuesta inadecuada ante las alertas del sistema EGPWS,** incluyendo “WIND SHEAR”, “SINK RATE” y “PULL UP”, sin que se ejecutara una maniobra de escape conforme a los procedimientos establecidos.
- **Ausencia de acciones de recuperación** tras la desconexión del piloto automático, sin inputs significativos en los mandos de vuelo durante un intervalo crítico de 6 a 8 segundos.
- **Retraso en la intervención del copiloto,** cuya orden verbal de “*Go around*” no fue ejecutada, y que no asumió el control de la aeronave ante la inacción del comandante.
- **Gestión de recursos de cabina (CRM) ineficiente,** reflejada en la falta de coordinación, la comunicación limitada entre los pilotos en la fase final del vuelo, y la ausencia de actuación decisiva por parte del copiloto.
- **Deficiente cultura de seguridad operacional en la compañía aérea,** evidenciada por la ausencia de un Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional (SMS) funcional, así como la falta de procedimientos específicos para la desviación meteorológica. Se evidenció que los pilotos no habían recibido entrenamiento práctico en simulador para maniobras de evasión en condiciones meteorológicas severas, ni para la gestión de aproximaciones desestabilizadas con cizalladura o turbulencia, lo que limitó su capacidad de respuesta durante la fase crítica del vuelo.

4.6 Accidente del vuelo TANS Perú ELV204 – 23 de agosto de 2005 (CFIT)

El 23 de agosto de 2005, el vuelo ELV204 de TANS Perú, operado por un Boeing 737-244 ADV (matrícula OB-1809-P) y con origen en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez de Lima (LIM), se estrelló durante una aproximación visual al Aeropuerto David Abenzur Rengifo de Pucallpa (PCI). La aeronave impactó con árboles y posteriormente con el terreno. Murieron 40 de los 98 ocupantes (91 pasajeros y 7 tripulantes), y la aeronave fue completamente destruida por el impacto y el fuego posterior.

La investigación fue llevada a cabo por la Comisión de Investigación de Accidentes de Aviación (CIAA) de Perú, con participación de la NTSB, FAA, Boeing y Pratt & Whitney. Concluyó en julio de 2006.



Figura 20 - B737-244 ADV Informe final de investigación

A bordo se encontraban tres pilotos: un comandante (*pilot instructor*), un copiloto en instrucción (IOE, *Pilot Flying*) y un copiloto titular.

Las condiciones meteorológicas eran adversas y jugaron un papel clave en el accidente del vuelo ELV204. La aeronave se encontró con un frente tormentoso de gran desarrollo vertical durante la fase final de aproximación, con intensa precipitación, granizo, visibilidad reducida y cumulonimbos:

- Visibilidad: 2.000 metros (insuficiente para una aproximación visual segura en ese entorno).
- Viento: 3 kt (aprox. 6 km/h), sin impacto operacional significativo.
- Nubosidad: Nubes rotas a 1.300 ft (396 m) y cumulonimbos aislados a 1.500 ft (450 m).
- Fenómenos: Tormenta eléctrica (TS), humo (FU), fuerte precipitación, granizo.
- Topes de la tormenta: 45.000 ft (13.716 m) intensa convección vertical.

Desarrollo del accidente

I. Preparativos previos y descenso hacia destino

- Durante el briefing previo al vuelo, la tripulación fue informada del NOTAM vigente (A1607/C2391), que indicaba que el aeropuerto de Pucallpa operaba únicamente en condiciones VFR, debido a la inoperatividad de las luces de borde de pista, luces de aproximación y sistema PAPI.
- Además del NOTAM, el personal de despacho en tierra proporcionó a la tripulación información meteorológica actualizada, que incluía nubosidad baja, tormentas eléctricas y visibilidad reducida en la zona de destino.

- El vuelo despegó de Lima a las 19:24 UTC y alcanzó el nivel de crucero FL330 a las 19:41 UTC.
- A las 19:52 UTC inició el descenso hacia Pucallpa con intención de realizar una aproximación visual conforme a lo establecido en el NOTAM.
- Según el contenido del CVR, a unos 37 kilómetros del aeropuerto, la tripulación comentó con tono dubitativo la posibilidad de desviarse a un aeropuerto alternativo, tras observar condiciones meteorológicas desfavorables. Sin embargo, poco después, decidieron continuar con la aproximación final, sin registrar fallos técnicos en la aeronave.

II. Aproximación final bajo condiciones meteorológicas severas

- A las 20:04 UTC, el comandante indicó al piloto en instrucción que descendiera “por debajo del cúmulo nimbo”, lo cual contravenía los procedimientos operativos de la compañía, que prohíben sobrevolar o penetrar zonas de tormenta desarrollada.
- A las 20:08:03 UTC se desconectó el piloto automático, iniciando la fase final del descenso en vuelo manual, en busca de referencias visuales en un entorno de fuerte precipitación y escasa visibilidad.
- A las 20:08:13 UTC, la aeronave alcanzó la altitud mínima autorizada para aproximación visual, a unos 11 kilómetros del aeropuerto, conforme a lo establecido por el NOTAM.
- A las 20:08:23 UTC, la tripulación continuó el descenso por debajo de dicha altitud sin contacto visual con la pista, atravesando una zona de tormenta eléctrica con granizo.
- En los siguientes 34 segundos, la aeronave descendió aproximadamente 300 metros adicionales, con un régimen superior a 520 metros por minuto, sin que se ejecutara ninguna maniobra de escape ni se emitiera comunicación de emergencia.

III. Impacto con el terreno y colisión final

- A las 20:08:51 UTC, la aeronave impactó con árboles a unos 7 kilómetros del umbral de la pista.
- En los segundos previos al impacto, el sistema de advertencia de proximidad al terreno (GPWS) funcionó correctamente y emitió las alertas sonoras “SINK RATE” y “PULL UP”. Sin embargo, la tripulación no respondió a estas advertencias ni ejecutó maniobra de escape alguna.
- A las 20:08:57 UTC, la aeronave colisionó con el terreno en una zona pantanosa, con una actitud de viraje a la derecha y una inclinación lateral entre 18° y 23°.
- En el momento del accidente, el copiloto titular no se encontraba en la cabina de vuelo.
- La aeronave fue completamente destruida por el impacto y el fuego posterior.

- En los últimos segundos registrados por el CVR no se encontraron advertencias verbales ni comandos de escape por parte de la tripulación. Tampoco se registraron llamadas de emergencia.



Figura 21 - Accidente OB1809P Informe de investigación

Conclusiones de la investigación

El accidente fue clasificado como un vuelo controlado contra el terreno (*Controlled Flight Into Terrain* – CFIT) durante una aproximación visual en condiciones meteorológicas adversas. La aeronave descendió por debajo de la altitud mínima autorizada sin contacto visual con la pista, sin ejecutar maniobra de escape y sin reaccionar ante las alertas del sistema GPWS. No se identificaron fallos técnicos en la aeronave.

La investigación identificó los siguientes factores contribuyentes:

- **Condiciones meteorológicas adversas y entorno operativo:** La aeronave enfrentó una tormenta severa en la fase final del vuelo, con cumulonimbos, visibilidad reducida (2.000 m), lluvia intensa y granizo. Estas condiciones no eran compatibles con una aproximación visual segura, especialmente teniendo en cuenta que el aeropuerto operaba sin luces de aproximación, luces de borde de pista ni sistema PAPI, conforme al NOTAM vigente.
- **Errores en la toma de decisiones y ejecución de la aproximación:** La tripulación decidió continuar con la aproximación visual, pese a no contar con referencias visuales adecuadas y tras discutir de forma dubitativa la posibilidad de alternar. Esta decisión implicó descender por debajo de la altitud mínima autorizada sin ejecutar maniobra de escape. El comandante ordenó al piloto en instrucción volar por debajo de una célula convectiva, lo que contravenía los procedimientos establecidos.

- **Deficiencias en la gestión operativa de cabina:** No se realizaron las listas de comprobación ni el briefing de aproximación. Además, en el momento del accidente, el copiloto titular no se encontraba en la cabina, lo que redujo la capacidad operativa y la supervisión cruzada, y vulneró los principios de redundancia en la gestión del vuelo.
- **Falta de reacción ante las alertas del GPWS:** El sistema de advertencia de proximidad al terreno (GPWS) funcionó correctamente y emitió las alertas “SINK RATE” y “PULL UP” en los segundos previos al impacto. No se registraron maniobras evasivas ni verbalización de las advertencias por parte de la tripulación, lo que indica una pérdida crítica de conciencia situacional.
- **Deficiencias organizacionales y estructurales:** El informe evidenció carencias en la cultura de seguridad de la aerolínea, incluyendo deficiencias en la formación en gestión de recursos de cabina (CRM) y en la supervisión de operaciones en condiciones meteorológicas límite. Además, un mensaje AFTN emitido por CORPAC el 21 de abril de 2004 limitó la potestad del controlador de tránsito aéreo para suspender operaciones en condiciones peligrosas, en contradicción con lo previsto en la sección 7.12 del Doc 4444 de OACI.

4.7 Accidente del vuelo FTL101 – 10 de octubre de 2001 (LOC-I)

El 10 de octubre de 2001, el vuelo FTL101 de la compañía Flightline, operado por un Fairchild SA-226-AT “Metro II” (matrícula EC-GDV), realizaba un trayecto internacional no regular entre el Aeropuerto de Barcelona-El Prat (BCN) y el Aeropuerto de Orán Es Sénia (ORN), con 10 personas a bordo (8 pasajeros y 2 tripulantes). El vuelo tenía carácter no regular, ya que se trataba de un transporte puntual contratado por una empresa privada (ENDESA) para desplazar a personal corporativo a un acto conmemorativo. No formaba parte de una ruta comercial programada ni de un itinerario regular.



Figura 22 - Fairchild SA-226-AT ("Metro II")

Durante el trayecto, la aeronave volaba en una zona afectada por una tormenta de tipo frente frío, típica del Mediterráneo en otoño, con actividad eléctrica intensa, lluvia, turbulencia y formación de hielo en niveles bajos.

- Visibilidad: reducida a menos de 1.000 metros en áreas con precipitaciones
- Nubosidad: cumulonimbos (CB) con base a 2.000 ft (610 m) y desarrollo vertical hasta 33.000 ft (10.060 m),
- Precipitación: lluvia intensa, con pérdida de visibilidad local,
- Turbulencia: moderada a severa, con riesgo de engelamiento por encima de 14.000 ft (4.270 m).
- Fenómenos eléctricos: tormentas activas con gran actividad de rayos.

La investigación fue realizada por la Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes de Aviación Civil (CIAIAC) de España. No participaron autoridades extranjeras dado que la aeronave era española y el accidente ocurrió en espacio aéreo nacional.

Desarrollo del accidente

I. Vuelo en crucero y aproximación a la zona de tormentas

- El vuelo FTL101 despegó del Aeropuerto de Barcelona (BCN) a las 10:18 LT con destino a Orán (ORN) Argelia, con 2 tripulantes y 8 pasajeros a bordo.
- El vuelo transcurrió con normalidad hasta su paso por la región de Valencia.
- A las 10:38 LT, la tripulación solicitó al centro de control aéreo de Valencia autorización para virar 20° a la izquierda “para evitar” (según sus propias palabras). El motivo no fue especificado, pero el contexto meteorológico sugiere que se trataba de condiciones adversas en ruta.
- El controlador autorizó la maniobra, indicando que debían “volver otra vez hacia Valencia cuanto está libre de nubes”.
- La aeronave confirmó con un “recibido”, siendo esta la última comunicación registrada.

II. Pérdida de contacto y desintegración en el mar

- A las 10:41:59 LT se perdió la señal del transpondedor en pantalla radar. La aeronave ya había completado el viraje autorizado.
- No hubo llamadas de emergencia ni mensajes adicionales tras la autorización.
- Según los datos de radar y la distribución del fuselaje recuperado, el impacto se produjo poco después, en una zona marítima a unos 82 NM del radar de Valencia.
- El análisis posterior descartó una explosión en vuelo o pérdida estructural previa.

- La desintegración del fuselaje se produjo presumiblemente al impactar contra el mar, con actitud invertida o gran ángulo de cabeceo, como indican los restos deformados de los asientos de cabina y la deriva vertical.
- No se recuperaron restos humanos ni se hallaron supervivientes, y los restos de la aeronave aparecieron dispersos en el mar, lo que indica una colisión a gran velocidad y con elevada energía de impacto.

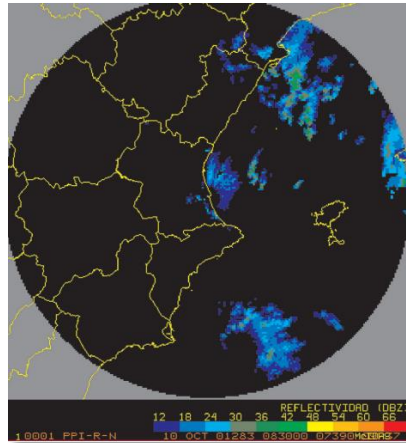


Figura 23 - Radar de reflectividad del 10 de octubre de 2001 a las 08:30 UTC (10:30 hora local)

La imagen muestra núcleos de precipitación sobre el Mediterráneo occidental, al este de la Comunidad Valenciana, con intensidades de hasta 36 dBZ. En el área correspondiente a la trayectoria prevista del vuelo FTL101, se observa reflectividad moderada (24–36 dBZ), indicativa de precipitaciones intensas asociadas a convección activa. Esta situación corrobora la presencia de condiciones meteorológicas adversas en el momento y la zona donde se perdió el contacto con la aeronave, en línea con la hipótesis de impacto de rayo y pérdida de control en vuelo descrita en la investigación.

Conclusiones de la investigación

El accidente fue clasificado como una **pérdida de control en vuelo (Loss of Control – In Flight, LOC-I)** ocurrida durante la fase de crucero, mientras la aeronave atravesaba una zona con condiciones meteorológicas adversas. La última comunicación registrada se produjo a las 10:38 hora local, cuando la tripulación solicitó al control aéreo un viraje de 20° a la izquierda “para evitar”, sin especificar el motivo. No hubo comunicaciones posteriores. Tres minutos después, la aeronave desapareció de la pantalla radar y posteriormente se confirmó el impacto contra el mar.

La investigación identificó los siguientes factores contribuyentes:

- **Pérdida total del sistema eléctrico durante el vuelo:** La causa probable del accidente fue una pérdida total del sistema eléctrico, presuntamente provocada por el impacto de un rayo

mientras la aeronave atravesaba una tormenta. Esta avería impidió a la tripulación mantener el control del aparato.

- **Condiciones meteorológicas adversas:** La aeronave se encontraba volando en medio de una tormenta, con fuertes lluvias, turbulencia significativa y visibilidad nula, lo que agravó la situación de emergencia y dificultó cualquier intento de recuperación.
- **Posibles daños inducidos por la descarga eléctrica:** Es posible que el impacto del rayo causara daños adicionales en otros sistemas de a bordo, contribuyendo a la pérdida de control.
- **Falta de registradores de vuelo:** La ausencia de grabadoras de datos de vuelo (FDR) y de voz en cabina (CVR) impidió reconstruir la secuencia final del vuelo y evaluar el comportamiento de la tripulación ante la emergencia. En la fecha del accidente, la instalación de estos equipos no era obligatoria para aeronaves de este tipo operando vuelos no regulares, conforme a la normativa vigente en España.
- **Limitaciones normativas previas:** La normativa JAR-OPS 1.700, que estableció la obligatoriedad de instalar FDR y CVR en aeronaves con peso máximo superior a 5.700 kg como el Metro II, no había entrado aún en vigor en el momento del suceso (entró en vigor el 1 de enero de 2005).

4.8 Accidente del vuelo N100EQ – 8 de diciembre de 2014 (LOC-I)

El 8 de diciembre de 2014, el vuelo N100EQ, operado por una aeronave ejecutiva Embraer EMB-500 Phenom 100 (matrícula N100EQ), realizaba un trayecto privado bajo reglas IFR entre el Aeropuerto Horace Williams de Chapel Hill (IGX), en Carolina del Norte, y el Aeropuerto de Montgomery County (GAI), en Gaithersburg, Maryland. A bordo se encontraban tres personas: el piloto y dos pasajeros. La aeronave despegó a las 09:45 hora local y el vuelo transcurrió sin incidentes hasta la fase de aproximación a destino.



Figura 24 - Embraer EMB-500 Phenom 100

Durante la aproximación final a la pista 14 de Gaithersburg, la aeronave sufrió una pérdida de sustentación inducida por formación de hielo no mitigada, lo que provocó una pérdida de control aerodinámico a baja altitud. El accidente causó el fallecimiento de todos los ocupantes y de tres personas en tierra. La aeronave fue destruida por el impacto y el posterior incendio.

El accidente fue investigado por la NTSB (*National Transportation Safety Board*), con participación de la FAA y del fabricante Embraer. El suceso fue clasificado como un accidente relacionado con condiciones meteorológicas adversas, en concreto, con la operación en condiciones de engelamiento estructural.

Las condiciones meteorológicas reportadas por el sistema AWOS del aeropuerto indicaban visibilidad superior a 16.000 metros, viento suave y nubosidad dispersa, pero **la situación real durante la aproximación fue notablemente más severa**: la aeronave voló dentro de nubes con temperatura negativa y humedad visible, condiciones típicas de engelamiento, y se confirmó la presencia de nieve ligera a moderada en el tramo final.

- Visibilidad: superior a 16.000 metros
- Viento: 040° a 6 kt (11 km/h)
- Nubosidad: dispersa a 2.100 ft (640 m), cubierta a 3.200 ft (975 m)
- Temperatura: -1 °C; punto de rocío -7 °C
- Precipitación: nieve ligera en la fase final de aproximación
- Condiciones de engelamiento: entre FL230 (7.000 m) y 5.000 ft (1.500 m)

Desarrollo del accidente

I. Vuelo en crucero y primeras señales de engelamiento

- La aeronave despegó a las 09:45 hora local desde Chapel Hill (IGX) y ascendió hasta 7.000 metros. A las 10:00, el pasajero en el asiento derecho comentó: “*Looks like we’re in the clouds?*”, y el piloto respondió: “*Yeah?*”.

- El piloto activó brevemente los sistemas de deshielo (anti-ice y deice), pero los desconectó tras solo 2 minutos, cuando aún se encontraba en condiciones de engelamiento (-10°).
- A partir de ese momento, el sistema de deshielo no volvió a activarse, ni siquiera durante el descenso a través de nubes con temperatura bajo cero.

II. Descenso y preparación de la aproximación

- Al descender por debajo de 10.000 ft (3.000 m), el piloto configuró la velocidad de referencia de aterrizaje (V_{ref}) en 92 kt (170 km/h), valor correspondiente a condiciones sin hielo y a un peso inferior al real.
- No obstante, las condiciones reales de vuelo cumplían con los criterios técnicos definidos como “*Normal Icing Conditions*” en el Manual de Vuelo: presencia de nubes (vuelo IMC), temperatura exterior inferior a $+5^{\circ}\text{C}$, humedad visible, y posteriormente precipitación en forma de nieve. Estas condiciones requerían, según los procedimientos del fabricante, la activación del sistema de deshielo (ala y estabilizador horizontal), el uso de la checklist de hielo y una V_{ref} corregida de 126 kt (233 km/h) para el peso real estimado (8.700 lbs-3.948 kg).
- A pesar de esta situación, la tripulación no activó el sistema de deshielo ni adaptó la configuración de la aproximación. La aeronave continuó su descenso hacia Gaithersburg en configuración de aterrizaje, con flaps extendidos y el tren bajado.
- Poco antes del tramo final, el piloto dijo al pasajero en el asiento derecho (quien no era piloto habilitado): “*So your job is to find the airport... just look straight ahead and say airport in sight*”, reflejando una posible falta de conciencia situacional ante el entorno meteorológico y operativo adverso.

III. Aproximación final y advertencias de pérdida

- A 5.200 m del umbral de pista y a unos 440 m de altitud, el pasajero alertó: “*Snow*”, y el piloto respondió: “*Wow, there’s snow*”. La aeronave volaba con flaps completamente extendidos, sin sistema de deshielo activado, y en régimen de velocidad por debajo del mínimo requerido.
- La velocidad continuó descendiendo hasta 170 km/h, mientras el ángulo de ataque se incrementaba progresivamente hasta superar los 16° . Este aumento del AOA se debió a los intentos del piloto por mantener la trayectoria de planeo en una configuración aerodinámicamente degradada por el hielo acumulado.
- Sin embargo, en lugar de ganar sustentación, el aumento del AOA deterioró aún más la eficiencia del ala, que ya no era capaz de generar sustentación suficiente. Así, aunque el piloto elevó el morro, la aeronave siguió perdiendo altitud, entrando progresivamente en un estado de pérdida aerodinámica.

- A las 10:41:35, con un AOA de 21° , se activó la alarma sonora “STALL”. De forma inmediata, el piloto automático se desconectó y la aeronave entró en pérdida aerodinámica, iniciando oscilaciones de alabeo con ángulos de hasta 100° , sin que se registraran maniobras de recuperación efectivas.

IV. Pérdida de control y colisión con el terreno

- Tras la entrada en pérdida y la desconexión del piloto automático, la aeronave comenzó a oscilar en alabeo con ángulos de hasta 100° , manteniéndose en actitud inestable y con un ángulo de morro descendente.
- Durante los últimos segundos del vuelo, no se registraron nuevas comunicaciones entre el piloto y el pasajero. A pesar de que se aplicó potencia máxima, la aeronave continuó perdiendo altitud sin respuesta efectiva en los controles.
- A las 10:41:55, la aeronave impactó contra una zona residencial situada a aproximadamente 1.200 metros del umbral de la pista 14, en una actitud de -30° de morro abajo y 110° de alabeo izquierdo.
- El impacto generó un incendio que afectó a tres viviendas. Fallecieron los tres ocupantes de la aeronave y tres personas en tierra.



Figura 25 – Accidente Embraer EMB-500 Phenom 100 (Fuselaje)

Conclusiones de la investigación

El accidente fue clasificado como una **pérdida de control en vuelo (Loss of Control – In Flight, LOC-I)**, ocurrida durante una aproximación en condiciones meteorológicas favorables en superficie, pero con presencia de **engramiento estructural en la fase final**. La aeronave experimentó una pérdida de sustentación inducida por hielo, no reconocida ni corregida, lo que derivó en una pérdida aerodinámica no recuperada a baja altitud.

La investigación identificó los siguientes factores contribuyentes:

- **Decisión del piloto de continuar con la aproximación** sin activar el sistema de deshielo, a pesar de volar en condiciones de temperatura negativa y humedad visible, contraviniendo los procedimientos operativos estándar.
- **Selección de velocidades de aproximación inadecuadas** para el peso real de la aeronave y para condiciones de engelamiento, lo que redujo significativamente el margen de seguridad frente a una pérdida.
- **Desatención a indicios claros de engelamiento estructural**, incluyendo el comentario del pasajero (“snow”) y la presencia visible de nieve en la trayectoria final.
- **Ausencia de indicaciones adecuadas de baja velocidad** en el sistema de presentación de datos de vuelo, debido a la no activación del sistema de deshielo, que impidió mostrar correctamente las advertencias de pérdida.
- **Altitud insuficiente** para realizar maniobras de recuperación tras la entrada en pérdida, una vez que el sistema “STALL” se activó.
- **Alta carga de trabajo del piloto** durante una operación en solitario, sin copiloto para supervisar o corregir errores críticos durante la fase final del vuelo.
- Limitaciones **en la gestión del riesgo meteorológico**, y ausencia de automatismos que alertaran de la necesidad de activar el sistema de deshielo en condiciones propicias para formación de hielo estructural.
- Deficiencias **en el entrenamiento operativo**, incluyendo el manejo de aproximaciones en condiciones de engelamiento y recuperación ante pérdida a baja altitud.

4.9 Accidente del vuelo Sosoliso Airlines 1145 – 10 de diciembre de 2005 (LOC-I)

El 10 de diciembre de 2005, el vuelo 1145 de Sosoliso Airlines, operado por un McDonnell Douglas DC-9-32 (matrícula 5N-BFD), realizaba un trayecto regular de transporte de pasajeros entre el Aeropuerto Internacional Nnamdi Azikiwe de Abuya (ABV) y el Aeropuerto Internacional de Port Harcourt (PHC), en Nigeria. A bordo se encontraban 110 personas: 7 tripulantes (2 pilotos y 5 TCP) y 103 pasajeros. La aeronave despegó a las 13:25 hora local, con una duración prevista de aproximadamente 50 minutos.



Figura 26 - McDonnell Douglas DC-9-32 (operado por JAT)

Durante la aproximación final a la pista 21 de Port Harcourt, la aeronave impactó en el terreno a 540 metros antes del umbral y 70 metros a la izquierda del eje de pista, desintegrándose tras colisionar con una estructura de drenaje no protegida. El accidente provocó 108 fallecidos. Dos personas sobrevivieron con heridas graves.

La investigación fue realizada por la autoridad nigeriana AIPB, con apoyo del NTSB (Estados Unidos) y la AAIB (Reino Unido).

- Visibilidad: reducida a 2.000 metros por lluvia intensa (valor inferior al mínimo operativo sin contacto visual con la pista).
- Viento: cambió de 220° a 17 km/h a 360° a 9 km/h, generando viento en cola en la fase final.
- Nubosidad: nubes rotas a 360 metros, con presencia de formaciones tormentosas activas.
- Precipitación: lluvia intensa y desplazamiento de células tormentosas sobre la trayectoria de aproximación.
- Turbulencia: asociada a la entrada en zona convectiva, sin ser comunicada a la tripulación.

I. Vuelo de crucero y planificación inicial

- El vuelo 1145 despegó de Abuya a las 13:25 hora local. Fue autorizado para aproximación ILS a la pista 21 de Port Harcourt.
- La información meteorológica inicial, basada en un parte anterior, indicaba condiciones visuales adecuadas: visibilidad 12 km y nubes a 420 metros.
- Sin embargo, entre las 13:00 y 13:08 hora local, las condiciones se deterioraron bruscamente: se formaron tormentas activas sobre el eje de pista y la visibilidad se redujo por debajo de los mínimos requeridos.
- El nuevo parte (SPECI), que reportaba visibilidad de solo 2.000 metros y viento cambiante, no fue transmitido por el servicio de control aéreo a la tripulación.

II. Aproximación y contacto con condiciones adversas

- La aeronave se estableció en senda de planeo a unos 11 km del umbral. A 6 km, el controlador autorizó el aterrizaje y mencionó pista mojada, pero no informó de la reducción de visibilidad ni del cambio de viento.
- A los 4 km de la pista, la aeronave comenzó a atravesar una zona de lluvia intensa, con pérdida progresiva del contacto visual con el terreno.
- La tripulación preguntó: *“Is it raining there now?”* y el controlador respondió: *“No rain at the airport”*, a pesar de que la precipitación ya había alcanzado la zona de umbral.
- La visibilidad era insuficiente para continuar la aproximación en condiciones visuales

III. Continuación por debajo de mínimos y maniobra de escape tardía

- La aeronave descendió por debajo de la altitud mínima de decisión (93 metros) sin contacto visual con la pista. Las condiciones meteorológicas ya no permitían una aproximación visual segura, pero la tripulación no inició una maniobra de escape en ese momento.
- A solo 35 metros sobre el terreno, el comandante ordenó la maniobra de escape (*“Go around!”*), a lo que el primer oficial respondió: *“We’re gone!”*.
- La aeronave no fue reconfigurada adecuadamente: los flaps permanecieron en posición de aterrizaje, el tren seguía extendido y no se aplicó potencia de forma efectiva.
- A continuación, el sistema de advertencia de proximidad al terreno (GPWS) emitió varias alertas, incluyendo *“Too low, gear”* y *“Whoop whoop, pull up”*. El copiloto exclamó: *“No more power!”*, lo que indica la ausencia de una respuesta propulsora suficiente para detener el descenso.
- La aeronave continuó perdiendo altitud hasta el impacto, sin que se observaran maniobras efectivas de recuperación.

IV. Impacto y consecuencias

- La aeronave impactó en una franja de terreno situada a 540 metros antes del umbral de la pista 21 y 70 metros a la izquierda del eje.
- Inmediatamente después colisionó con una estructura de drenaje de hormigón sin protección, situada dentro del área de aproximación. El fuselaje se rompió y se produjo un incendio severo.
- Los restos quedaron dispersos a lo largo de más de 1.000 metros. La cabina se separó por completo del resto del fuselaje.
- Fallecieron 108 personas. Dos pasajeros sobrevivieron con lesiones graves.



Figura 27 - Accidente Sosoliso Airlines

Conclusiones de la investigación

El accidente del vuelo Sosoliso Airlines 1145 fue clasificado como una **pérdida de control en vuelo (Loss of Control – In Flight, LOC-I)**, ocurrida durante una aproximación final no estabilizada en condiciones meteorológicas adversas. La aeronave descendió por debajo de la altitud mínima sin contacto visual con la pista, y la maniobra de escape se ejecutó de forma tardía e ineficaz, lo que llevó al impacto con el terreno.

La investigación identificó los siguientes factores contribuyentes:

- **Descenso por debajo de mínimos sin referencias visuales:** el informe indica claramente que la aeronave descendió por debajo de la altitud de decisión (307 ft - 93 m) sin tener contacto visual con la pista.
- **Maniobra de escape ordenada a solo 35 m:** el informe especifica ese momento exacto como demasiado tardío para recuperarse.
- **Condiciones meteorológicas degradadas:** visibilidad de 2.000 m, lluvia intensa, y viento variable con cambio de dirección a viento en cola. Todo esto está documentado en los partes SPECI y en la descripción del entorno.
- **Falta de transmisión del parte meteorológico SPECI:** el controlador no comunicó el cambio de visibilidad y viento a la tripulación. Esto está claramente indicado en el informe.
- **Ausencia de iluminación de pista:** el informe señala que la pista no estaba iluminada, y que eso pudo haber impedido el contacto visual en condiciones marginales.
- **Impacto con una estructura de drenaje no protegida:** el informe identifica la presencia de un drenaje de hormigón como un obstáculo crítico que agravó el resultado del impacto.

- **Alertas del GPWS sin respuesta:** se detalla la activación de alertas como “*Too low, gear*” y “*Whoop whoop, pull up*”, sin maniobras correctivas posteriores

4.10 Accidente del vuelo Tara Air 197 – 29 de mayo de 2022 (CFIT)

El 29 de mayo de 2022, el vuelo 197 de Tara Air, operado por una aeronave DHC-6 Twin Otter 300 (matrícula 9N-AET), realizaba un trayecto doméstico entre el Aeropuerto de Pokhara (PKR) y el Aeropuerto de Jomsom (JMO), en Nepal. A bordo se encontraban 22 personas: 3 tripulantes (2 pilotos y 1 TCP) y 19 pasajeros. La salida se retrasó por condiciones meteorológicas adversas en ruta, y la aeronave despegó finalmente a las 09:55 hora local.



Figura 28 - DHC-6 Twin Otter 300 Tara Air

Durante el vuelo, mientras se intentaba mantener navegación visual bajo condiciones de meteorología adversa, la aeronave impactó contra el monte Sanusare a una altitud de 4.050 metros, aproximadamente a 14 km al suroeste de Jomsom. El accidente provocó la muerte de todos los ocupantes. Fue investigado por la Aircraft Accident Investigation Commission (AAIC) de Nepal, con asistencia del NTSB.

- Visibilidad: nula en la zona de impacto, con niebla densa y nubes en contacto con el terreno.
- Nubosidad: cielo cubierto con niebla orográfica persistente sobre el paso de Lete.
- Precipitación: llovizna ligera.
- Viento: del suroeste con rachas de hasta 57 km/h, reportado desde Jomsom.
- Condiciones generales: meteorología IMC (*Instrument Meteorological Conditions*), incompatibles con el vuelo VFR. No había posibilidad de navegación visual.

Desarrollo del accidente

I. Planificación del vuelo y despegue desde Pokhara

- El vuelo 197 de Tara Air estaba programado para operar la ruta desde Pokhara (PKR) hasta Jomsom (JMO) el 29 de mayo de 2022. La salida estaba prevista inicialmente para las 06:15 hora local, pero debido a las condiciones meteorológicas adversas en ruta, especialmente en la zona del paso de Lete y Tatopani, el vuelo experimentó un retraso.
- A las 09:06 hora local, el Aeropuerto de Jomsom reanudó sus operaciones, permitiendo que los vuelos pudieran continuar. El primer vuelo de Summit Air 9N-AKZ, que partió antes que el vuelo 197, reportó condiciones de vuelo complicadas, específicamente en la zona del paso de Lete y Tatopani, donde la visibilidad era muy limitada debido a la presencia de nubes bajas y niebla.
- El comandante mostró inicialmente dudas sobre la viabilidad de la operación, pero fue presionado por una persona externa a la operación, posiblemente un pasajero o personal de tierra. Según el CVR, esta persona instó al comandante a seguir adelante con el vuelo: *“someone, either ground staff or some intimate passenger to the crew, advising strongly to the PIC to conduct the flight”*.
- Después de una revisión rápida de la situación, el vuelo fue finalmente autorizado a despegar a las 09:55 hora local desde la pista 04 del Aeropuerto de Pokhara, y comenzó su ruta hacia Jomsom.

II. Ascenso y primer contacto con Jomsom

- Tras el despegue, la aeronave mantuvo un rumbo hacia Ghodepani, un punto de referencia habitual para vuelos en la región. A las 10:21 hora local, la tripulación reportó estar a 3.660 metros de altitud, ascendiendo para alcanzar los 4.200 metros mientras se acercaban a la zona de Jomsom.
- A las 10:25 hora local, la aeronave realizó el primer contacto con el servicio AFIS de Jomsom, que informó sobre las condiciones meteorológicas en la zona: viento del suroeste, con rachas de hasta 30 nudos (aproximadamente 55 km/h), temperatura de 18°C, y presión atmosférica QNH 1019.
- El comandante solicitó reconfirmar la intensidad del viento, y se expresó preocupado por las condiciones en ruta. En las grabaciones del CVR, se escuchó al comandante cuestionar la seguridad de la operación en tales condiciones meteorológicas adversas, pero continuó el vuelo. La tripulación discutió que los pilotos de Summit Air estaban realizando vuelos en

esas condiciones sin problemas. El comandante mostró su disconformidad con la situación, mencionando que no es seguro volar VFR (bajo reglas de vuelo visual) en tales condiciones.

III. Vuelo en condiciones meteorológicas adversas y ascenso hacia la zona de impacto

- Después de pasar Ghodepani, la aeronave continuó hacia Jomsom. La aeronave ingresó a una zona de nube densa y condiciones meteorológicas de IMC), lo que comprometió aún más las condiciones de visibilidad para el vuelo visual.
- El Sistema de Alerta de Proximidad al Terreno (TAWS) estaba inhibido debido a la frecuencia de alertas falsas durante vuelos previos. Como resultado, el sistema no emitió ninguna advertencia preventiva sobre la proximidad al terreno.
- En el CVR, se puede escuchar al comandante expresar su frustración con la falta de visibilidad y la imposibilidad de encontrar zonas más claras. El copiloto, que tenía poca experiencia en la región, no intervino activamente en la toma de decisiones durante esta fase crítica del vuelo.
- La aeronave continuó en ascenso, buscando zonas más despejadas, pero sin una adecuada referencia visual. A las 10:30 hora local, la tripulación reportó que la aeronave estaba a 3.800 metros de altitud en una actitud ascendente mientras trataba de encontrar una ruta segura a través de las nubes.

IV. Impacto con el terreno y consecuencias

- A las 10:33 hora local, la aeronave impactó contra una ladera rocosa del monte Sanusare, a una altitud de 4.050 metros, aproximadamente a 14 km al suroeste de Jomsom. El impacto fue inmediato, destruyendo la aeronave completamente.
- La aeronave sufrió daños catastróficos en el fuselaje y la estructura, y no hubo supervivientes. Todos los ocupantes murieron debido a traumatismos múltiples.
- A pesar de las alertas emitidas por el sistema GPWS (“*Pull up*”), la tripulación no pudo evitar el impacto debido a la falta de visibilidad, la inhibición del TAWS, y el mal tiempo en la región montañosa.
-

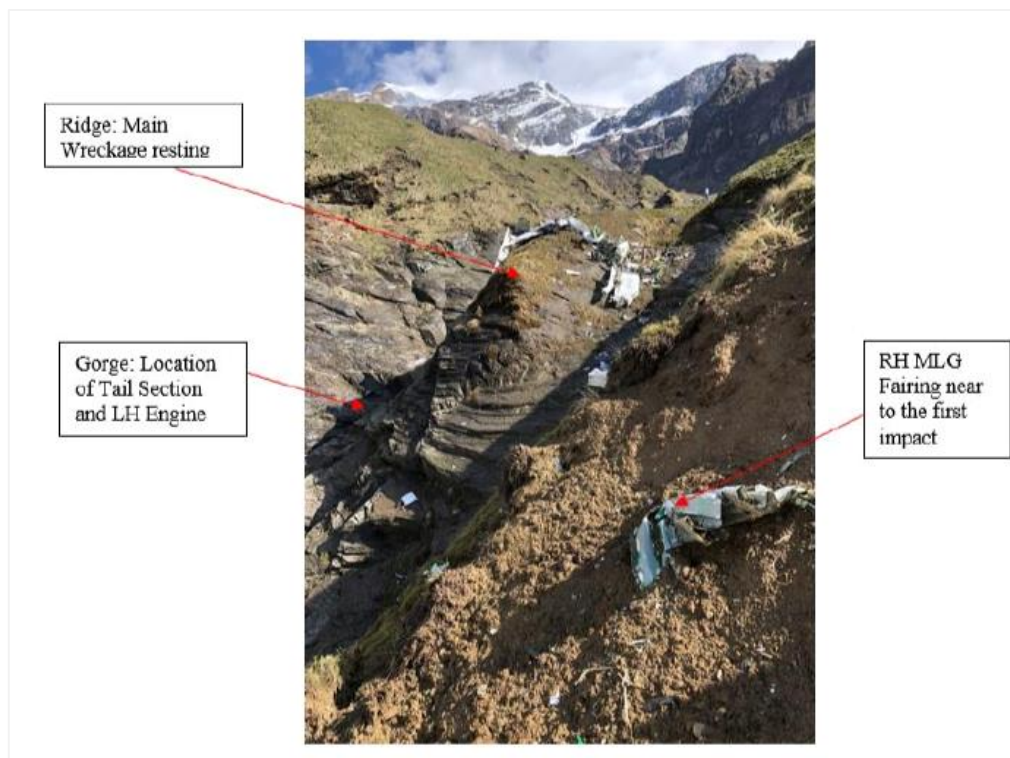


Figura 29 - Accidente Tara Air 197

Conclusiones del accidente

El accidente del vuelo Tara Air 197 fue clasificado como un Impacto Controlado contra el Terreno (CFIT), ocurrido durante un vuelo en condiciones meteorológicas IMC bajo reglas VFR, lo que llevó a una pérdida de conciencia situacional por parte de la tripulación y a la colisión con el terreno.

La investigación identificó los siguientes factores contribuyentes:

- **Operación del vuelo bajo reglas VFR en condiciones IMC:** La aeronave fue operada bajo reglas de vuelo visual VFR en condiciones meteorológicas de vuelo por instrumentos IMC. Las condiciones de visibilidad en ruta no eran adecuadas para el vuelo visual, pero el vuelo se continuó sin cambiar a reglas IFR (*Instrument Flight Rules*), lo que constituyó una violación de las normas operacionales establecidas para condiciones de IMC.
- **Falta de cambio a reglas IFR:** La tripulación no solicitó un cambio a reglas IFR a pesar de las condiciones IMC. Esto refleja una falta de juicio operativo ya que, bajo las condiciones de visibilidad reducida y nube densa, los vuelos deben ser realizados con reglas IFR para garantizar la seguridad del vuelo.
- **Presión externa para realizar el vuelo:** Según las grabaciones del CVR, una persona externa a la operación (probablemente personal de tierra o un pasajero cercano) presionó al

comandante para que realizara el vuelo, a pesar de los informes meteorológicos negativos y las dudas del comandante. Esta presión externa contribuyó a la toma de decisiones que resultaron en el accidente.

- **Pérdida de conciencia situacional:** A medida que el vuelo avanzaba, las condiciones meteorológicas empeoraron considerablemente, pero la tripulación no reaccionó adecuadamente a los cambios en las condiciones de vuelo. El comandante continuó operando bajo VFR en condiciones IMC, lo que resultó en una pérdida de conciencia situacional. La tripulación no reconoció los riesgos asociados a las malas condiciones y no se adoptaron medidas correctivas a tiempo.
- **Falta de uso de los sistemas de alerta:** El TAWS (*Terrain Awareness and Warning System*) estaba inhibido, lo que impidió que el sistema generara alertas de proximidad al terreno durante el vuelo. La tripulación no fue alertada de manera oportuna sobre el riesgo de impacto, lo que contribuyó a la falta de reacción ante el terreno.
- **Decisión de continuar el vuelo a pesar de las malas condiciones:** El comandante decidió continuar el vuelo a pesar de las condiciones meteorológicas adversas, cuando podría haberse desviado a un aeropuerto alternativo o haber solicitado un *go-around*.

4.11 Patrones comunes y conclusiones clave del análisis de los accidentes

A continuación, se presentan los elementos coincidentes más relevantes extraídos del estudio específico de cada uno de los casos:

1. Presencia recurrente de fenómenos convectivos severos: En seis de los diez accidentes analizados se identificó la presencia directa de fenómenos convectivos severos (tormentas eléctricas, *microbursts*, cizalladura), que afectaron críticamente la estabilidad del vuelo durante la aproximación o el aterrizaje. En los cuatro casos restantes, aunque también hubo condiciones meteorológicas adversas, no se trató de fenómenos convectivos intensos.

2. Gestión deficiente de la información meteorológica disponible: En siete de los diez casos se constató una gestión inadecuada por parte de las tripulaciones de la información meteorológica disponible. Específicamente, esto implicó subestimación de las alertas meteorológicas previas al vuelo (Tara Air 197, 2022), interpretación incorrecta o insuficiente de los datos radar durante el vuelo (Sosoliso Airlines OSL1145, 2005), o falta de consideración adecuada a avisos explícitos de fenómenos meteorológicos adversos reportados en ruta (Flydubai FZ981, 2016).

3. Errores humanos asociados a situaciones de alta carga de trabajo y estrés operacional: en los diez accidentes se concluye, sin excepción, una clara influencia de factores humanos relacionados con la alta carga cognitiva y el estrés operacional inducido por las condiciones meteorológicas adversas. La consecuencia recurrente en todos los accidentes fue una notable degradación en la toma de decisiones técnicas y operacionales.

4. Problemas en la comunicación interna (CRM) y con los servicios ATS: En cuatro accidentes se identificaron claramente deficiencias graves en la comunicación tanto interna entre miembros de la tripulación como con los servicios de tránsito aéreo (ATS).

5. Infrautilización o desactivación de sistemas tecnológicos críticos: En tres accidentes específicos (Tara Air 197, Bhoja Air 213 y Sosoliso Airlines OSL 1145), se constató explícitamente la infrautilización o desactivación de sistemas críticos de seguridad.

6. Inadecuada aplicación de los procedimientos operacionales estandarizados (SOP): En seis de los diez casos analizados, quedó demostrado que las tripulaciones no aplicaron rigurosamente los procedimientos operacionales establecidos para condiciones meteorológicas adversas. Ejemplos específicos incluyen la realización de aproximaciones desestabilizadas (accidentes de Sosoliso Airlines OSL1145 y Bhoja Air 213), decisiones tardías o no ejecutadas de motor y al aire (Flydubai FZ981).

5 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

A partir de los análisis anteriores, se evidencia que, si bien las limitaciones tecnológicas son un factor contribuyente en la aviación, principalmente en sus inicios, la gestión de los recursos de la tripulación (CRM) ha desempeñado un papel igualmente determinante en el desenlace de varios de ellos. En particular, se han identificado deficiencias en la toma de decisiones bajo presión, en la comunicación entre miembros de la tripulación y en la correcta interpretación de la información meteorológica disponible.

Esto indica, que más allá del desarrollo e incorporación de mejoras tecnológicas, el factor humano sigue siendo un punto crítico en contextos operacionales con condiciones meteorológicas adversas.

Por ello en este apartado se presentan dos propuestas de desarrollo futuro, complementarias:

- Una primera, de carácter tecnológico, centrada en la incorporación de sensores LIDAR y sistemas de inteligencia artificial para mejorar la detección y anticipación de fenómenos meteorológicos peligrosos.
- Y una segunda, orientada al fortalecimiento del CRM, con énfasis en escenarios de vuelo bajo condiciones adversas y en la toma de decisiones en cabina.

Ambas iniciativas se plantean como medidas viables y coherentes con el entorno operativo actual, susceptibles de implementación progresiva por operadores y autoridades aeronáuticas.

5.1 Propuesta tecnológica – CASO DE USO

Actualmente, aeronaves comerciales modernas como el Airbus A320neo, sobre el que se basará este caso de uso, cuentan con equipamiento avanzado en materia de navegación y gestión de vuelo, pero limitado en cuanto a la detección y/o anticipación de ciertos fenómenos meteorológicos. Entre los sistemas meteorológicos embarcados del A320 se encuentran:

- **Radar meteorológico (WX):** como el Honeywell RDR-4000, que detecta precipitaciones e identificar células convectivas con anticipación. No obstante, se trata de un sistema reactivo, y no permite detectar con anticipación fenómenos como la turbulencia en aire claro (CAT) o la cizalladura si no hay precipitación.
- **EGPWS/TAWS:** que proporciona alertas de proximidad con el terreno, pero no incorpora variables meteorológicas ni interactúa con información atmosférica en tiempo real.
- **ACARS:** que permite recibir informes meteorológicos (METAR, TAF, SIGMET), pero se trata de información estática, basada en datos de superficie y actualizada a baja frecuencia,

sin capacidad de predicción localizada en altitud ni integración directa en los sistemas de navegación.

En conjunto, podría decirse que estos sistemas ofrecen una capacidad limitada de conciencia situacional meteorológica anticipada, ya que la mayoría de ellos informan sobre lo que está ocurriendo en el momento o lo que ha ocurrido recientemente, pero no predicen lo que ocurrirá en los próximos minutos de vuelo. Esto representa una limitación crítica en escenarios de meteorología adversa dinámica.

5.1.1 Propuesta: incorporación de un sistema predictivo embarcado

Con el objetivo de reducir la exposición de las aeronaves a fenómenos adversos, particularmente los no visibles ni anticipables con los medios actuales, se propone la integración de un sistema predictivo embarcado, formado por los tres siguientes componentes:

I. Sensor LIDAR Doppler frontal: Se trata de un sensor óptico de detección remota que emite pulsos de luz láser hacia la masa de aire situada frente a la aeronave y analiza el reflejo de estas señales para medir directamente la velocidad y dirección del viento en aire claro (reflectividad). A diferencia del radar meteorológico convencional, que requiere precipitaciones para obtener una señal útil, el LIDAR permite detectar variaciones del viento en zonas sin nubosidad ni humedad, lo que lo hace entonces eficaz para anticipar cizalladura, turbulencia en aire claro (CAT) y microburst secos.

Esta tecnología ha sido probada en situaciones reales a través de programas experimentales de vuelo llevados a cabo por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) y la agencia espacial de Japón JAXA, empleando aeronaves como el Falcon 20E y el Airbus A340. En estas pruebas se evidenció la habilidad del sistema para identificar patrones de viento irregulares hasta 10 km antes de la aeronave, lo que permite prever fenómenos de riesgo con varios segundos de margen.

Además, NASA y Boeing están llevando a cabo estudios sobre el uso de sensores LIDAR Doppler embarcados en futuras generaciones de aeronaves comerciales, con el objetivo de mitigar el impacto de la turbulencia en aire claro (cuya frecuencia e intensidad se prevé que aumenten debido al cambio climático). Estas investigaciones se encuentran todavía en fase preliminar, pero son un ejemplo de la viabilidad del LIDAR Doppler como una herramienta futura para mejorar la seguridad operacional.

II. Módulo de inteligencia artificial meteorológica embarcada: Sistema integrado para procesar en tiempo real los datos del LIDAR Doppler y el radar meteorológico con el fin de predecir la evolución inmediata de las condiciones atmosféricas en la ruta prevista.

En este caso, se utilizarían algoritmos de *machine learning* entrenados con datos históricos y reales de vuelo, capaces de identificar patrones. También se producirían alertas predictivas automáticas con

una ventana de 5 a 10 minutos de antelación, que se mostrarían en la cabina a través del Bagaje Electrónico de Avión (EFB) o la interfaz de navegación, acompañadas de sugerencias operativas (alteración de altitud, desviación preventiva, periodos de espera).

III. Conectividad satelital con tierra/ centro de operaciones: En contraposición al sistema actual basado en ACARS, que ofrece mensajes meteorológicos de escasa resolución temporal y sin interacción dinámica, el sistema sugerido incluiría una conexión constante vía satélite que facilitaría el intercambio de información en tiempo real entre el avión y el centro de operaciones.

Esta interconexión posibilitaría el envío de los datos climáticos recogidos por los sensores embarcados (como el LIDAR Doppler) y la recepción de alertas más sofisticadas desde tierra, producidas a través de modelos de predicción y datos compartidos por otras aeronaves. Estas alertas complementan las producidas por el módulo de inteligencia artificial a bordo, proporcionando una perspectiva más extensa del ambiente climático y fortaleciendo la habilidad de la tripulación para prever tácticas.

Funcionalidad	A320Neo	Sistema predictivo embarcado propuesto
Tipo de sistema	Reactivo	Predictivo
Sensor principal	Radar meteorológico (WX)	LIDAR Doppler + WX
Detección wind shear y microburst	Solo con precipitación intensa	Sí, incluso en aire claro mediante medición directa del viento
Detección de turbulencia de aire claro (CAT)	No	Sí, mediante IA y análisis de patrones en tiempo real
Predicción táctica	No	Sí, con anticipación de 5–10 minutos
Alertas automáticas	No (excepto alertas de terreno – no meteorológicas)	Sí, integradas en el EFB o sistema de navegación
Información meteorológica desde tierra	ACARS (baja frecuencia)	Enlace satelital dinámico en tiempo real
Visualización de fenómenos meteorológicos	Imagen radar WX convencional	Mapa predictivo con zonas de riesgo y sugerencias operativas
Capacidad de compartir datos con la red (operador)	No	Sí, con envío y recepción de datos en tiempo real a red operativa

Tabla 12 - Sistema predictivo embarcado vs sistema actual A320Neo

5.1.2 Estimación costes de implantación

A continuación, se presenta una estimación de los costes de implantación de la solución tecnológica propuesta (LIDAR Doppler, inteligencia artificial y conectividad satelital) para un Airbus A320Neo de nueva construcción (*forward-fit*), tomando como referencia precios actuales del sector y configuraciones operativas realistas:

Componente	Coste estimado (EUR)	Descripción
Sensor LIDAR Doppler embarcado	100.000 – 120.000 €	Referencia orientativa basada en sensores LIDAR de alta resolución utilizados en aplicaciones industriales y de teledetección, según análisis publicado por Neuvition. Aunque no están certificados para aviación, permiten estimar el coste base de una versión adaptada al entorno aeronáutico. <i>Fuente: Neuvition – ¿Cuánto cuesta un LIDAR?</i>
Módulo de inteligencia artificial	50.000 – 75.000 €	Incluiría unidad de procesamiento embarcado certificada para uso aeronáutico, integración con la aviónica o EFB, y desarrollo de software predictivo basado en IA entrenada con datos meteorológicos. El rango se basa en precios de sistemas embarcados comparables, como los utilizados en procesamiento de datos para visión sintética, gestión de sensores o sistemas de análisis embarcado como los de Curtiss-Wright o Collins Aerospace.
Conectividad satelital (instalación inicial)	30.000 – 50.000 €	Instalación del sistema de enlace satelital para transmisión de datos en vuelo. Basado en configuraciones utilizadas por operadores con Viasat o Inmarsat.
Servicio de transmisión de datos satelital – coste anual	15.000 – 20.000 €	Contrato de servicio con proveedores como Inmarsat o Viasat para transmisión de datos meteorológicos y operativos en tiempo real.
Certificación aeronáutica del sistema	120.000 – 150.000 €	Incluiría pruebas en vuelo, validación técnica, gestión del proceso de certificación (STC) conforme a normativa EASA (Part-21 y CS-25), y desarrollo de documentación operativa: suplemento del AFM, procedimientos en el OM Parte B, inclusión en el MEL, manuales de mantenimiento y redacción de procedimientos específicos para la tripulación y el centro de operaciones.

Tabla 13 - Estimación costes solución tecnológica

Considerando la integración de todos los elementos que conforman la solución tecnológica propuesta, incluyendo el sensor LIDAR Doppler embarcado, el módulo de inteligencia artificial, la conectividad satelital y el proceso de certificación aplicable a un sistema nuevo conforme a la normativa EASA, junto con su correspondiente documentación operativa, el coste total estimado de implantación inicial para una aeronave Airbus A320neo se situaría entre **315.000 y 415.000 euros**.

5.2 Propuesta CRM – CASO DE USO

Actualmente, las aerolíneas comerciales que operan aeronaves modernas como el Airbus A320neo cuentan con programas de *Crew Resource Management* (CRM) centrados principalmente en comunicación, liderazgo y trabajo en equipo, pero con limitaciones importantes en situaciones meteorológicas adversas dinámicas, debido a la falta de información predictiva integrada en cabina.

5.2.1 Propuesta: Integración del CRM con soporte predictivo meteorológico embarcado

Con respecto al sistema tecnológico ya propuesto (sensor LIDAR Doppler embarcado), la innovación de este CRM reside en incorporar directamente las alertas meteorológicas predictivas en un procedimiento CRM específico y organizado en cabina. Esto posibilitaría una administración anticipada, brindando a la tripulación entre 5 y 10 minutos de antelación para preparar la respuesta operativa antes de lidiar directamente con el fenómeno climático desfavorable.

El nuevo procedimiento CRM se activaría automáticamente después de la emisión de una **alerta anticipativa** en cabina, y consta de los siguientes pasos:

a) **Alerta recibida:** La tripulación recibe un aviso visual y/o sonoro en el EFB o en las pantallas multifunción, señalando la cercanía de un fenómeno meteorológico adverso (por ejemplo, turbulencia a 8 km). Se lleva a cabo un breve cross-check verbal entre el piloto y el copiloto para validar la situación prevista con anticipación.

b) **Evaluación inmediata y colaborativa:** Inmediatamente después, piloto y copiloto validan juntos la táctica sugerida automáticamente por el sistema de predicción (como un cambio de altitud, un nuevo camino, o una breve espera táctica), garantizando así que ambos tienen la misma comprensión de la situación.

c) **Asignación anticipada de tareas:** Finalmente, ambos tripulantes concuerdan de manera ágil sobre cómo repartir las tareas en la cabina antes de tiempo. Esto disminuye considerablemente la presión mental y el estrés en la operación cuando se enfrentan a la situación adversa prevista y así se reducen posibles errores por parte de los humanos.

La siguiente tabla resume brevemente la mejora del CRM anticipativo frente al CRM actual:

Funcionalidad	A320Neo	Sistema predictivo embarcado propuesto
Momento de gestión del fenómeno adverso	Reactiva (durante el fenómeno)	Proactiva (antes del fenómeno)
Anticipación en distribución de tareas	No, distribución reactiva	Sí, distribución anticipada y específica
Uso de información meteorológica predictiva	No (solo radar WX o informes estáticos)	Sí, con integración directa del sistema LIDAR Doppler
Generación de alertas automáticas en cabina	No, sólo radar WX (reactivo) y mensajes ACARS	Sí, alertas visuales/sonoras anticipativas integradas
Procedimiento CRM vinculado a alertas	No estructurado. Depende de la experiencia o del juicio de la tripulación.	Sí, protocolo estructurado de tres pasos (alerta, evaluación, asignación)
Reducción de carga cognitiva operacional	Limitada	Alta, mediante preparación anticipada

Tabla 14 - CRM A320 Neo vs CRM predictivo propuesto

En resumen, esta propuesta de CRM anticipativo no introduce un nuevo concepto de gestión de recursos de cabina, sino una evolución operativa del modelo existente. Su novedad radica en la integración estructurada de alertas predictivas meteorológicas generadas por sistemas embarcados en un protocolo CRM específico, sencillo y aplicable en tiempo real, diseñado para condiciones meteorológicas adversas.

5.2.2 Estimación costes de implantación

A continuación, se presenta una estimación de los costes de implantación de la solución CRM anticipativa propuesta para un operador que utilice Airbus A320neo, basada en la introducción del nuevo procedimiento vinculado a la gestión de alertas meteorológicas predictivas en cabina. La estimación considera una flota de referencia compuesta por diez aeronaves, con aproximadamente 40–50 tripulantes (pilotos), y contempla tanto el diseño del protocolo como su validación, formación inicial e integración operativa, tomando como base prácticas habituales en operadores europeos y configuraciones realistas del sector:

Componente	Coste estimado (EUR)	Descripción
Desarrollo del nuevo procedimiento CRM	15.000 – 20.000 €	Diseño completo de un procedimiento CRM anticipativo estructurado, activado por alertas meteorológicas predictivas en cabina. Contempla la definición operativa (alerta–evaluación–asignación), su integración formal en el OM Parte B conforme a normativa EASA, la revisión de compatibilidad con SOP y manuales existentes (MEL, FCOM, QRH), la elaboración de materiales de briefing, y la validación interna por parte de los departamentos de Operaciones, Instrucción y Safety.
Formación inicial de instructores	5.000 – 7.500 €	Formación específica para un grupo reducido de instructores de CRM (3 a 5), responsables de implantar y supervisar el nuevo procedimiento anticipativo vinculado a alertas meteorológicas. Incluye una sesión técnica de 1 a 2 días con facilitador especializado, documentación operativa adaptada, y coordinación con los departamentos de Formación, Operaciones y Safety. El coste cubre honorarios del facilitador, preparación de contenidos y soporte técnico necesario para su integración en el programa de formación continua conforme a normativa EASA.
Formación inicial de tripulaciones	30.000 – 35.000 €	Formación operativa en aula para tripulaciones técnicas (pilotos), centrada en la aplicación del nuevo procedimiento CRM anticipativo activado por alertas meteorológicas embarcadas. Incluye una jornada presencial con análisis de escenarios, dinámica de roles en cabina (PF/PM), revisión de casos reales y preparación táctica. El coste contempla los

		honorarios del facilitador, la preparación de contenidos específicos y la coordinación con el área de formación del operador. No requiere simulador, lo que permite una implantación más eficiente y económica.
Adaptación documental y validación operativa interna	5.000 – 7.500 €	Revisión y validación de los procedimientos en el sistema documental: OM Parte A y B, inclusión en briefings y checklist, e integración en el sistema de gestión de seguridad (SMS).

Tabla 15 - Estimación de costes CRM

La implantación del nuevo protocolo de CRM anticipativo vinculado a alertas meteorológicas predictivas en cabina supone un coste total estimado de entre **55.000 y 70.000 euros**.

5.3 Proyección evolutiva

La propuesta tecnológica se ha centrado en la integración de sensores embarcados, inteligencia artificial y conectividad operativa interna dentro de una misma aerolínea, pero podrían explorarse líneas de desarrollo futuras para ampliar su integración en el sistema aeronáutico global (red de datos compartida). Propuestas de investigación futuras podrían ser:

- **Integración con ANSP:** el sistema propuesto comparte en tiempo real las alertas meteorológicas generadas por el sistema predictivo dentro del propio operador (aeronaves de la aerolínea y centro de operaciones). Como línea futura, podría desarrollarse una interfaz que permita enviar esas alertas también al ANSP, incluyendo información estructurada como tipo de fenómeno, posición, altitud, intensidad y duración estimada. Esta transmisión se podría realizar a través de canales ya utilizados en el entorno aeronáutico, como la red ATN (*Aeronautical Telecommunication Network*), que permite el intercambio de datos entre operadores, aeronaves y servicios de navegación aérea, o mediante enlaces CPDLC (*Controller–Pilot Data Link Communications*), que permiten la comunicación entre piloto y controlador por mensajes digitales. También podrían utilizarse pasarelas compatibles con el modelo SWIM (*System Wide Information Management*), una arquitectura promovida por Eurocontrol y OACI para el intercambio de información aeronáutica de forma estandarizada. El objetivo sería que el controlador aéreo pudiera visualizar la alerta en su interfaz táctica como una zona afectada, anticipar su impacto en el tráfico y aplicar medidas preventivas como cambios de nivel, desviaciones o ajustes de secuencia con aeronaves de otros operadores.
- **Integración con ATFM:** los datos generados por el sistema predictivo embarcado podrían integrarse en herramientas de gestión táctica del flujo utilizadas por el Network Manager de Eurocontrol, como el NOP (*Network Operations Plan*). Esto permitiría incorporar información meteorológica real y anticipada, detectada por aeronaves en vuelo, en la planificación de

rutas, capacidad de sectores o gestión de slots. A través de los servicios B2B del Network Manager (NM), o mediante conexión con el AOP (*Airport Operations Plan*), los centros de red podrían adaptar el flujo de tráfico antes de que el fenómeno meteorológico afecte a la operación. El objetivo sería anticipar y planificar mejor la gestión de la capacidad y demanda del espacio aéreo o de los aeropuertos en un horizonte temporal de corto plazo.

- **Adaptación del sistema a la aviación general:** Aunque la propuesta está centrada en aeronaves comerciales, una línea futura de desarrollo sería adaptar esta tecnología a aeronaves ligeras. En lugar de instalar un sistema completo embarcado, se podría diseñar un sistema simplificado basado en una EFB que reciba las alertas meteorológicas predictivas generadas desde tierra o desde otras aeronaves. En este caso, no se instalaría un sensor embarcado, sino que la aeronave actuaría únicamente como receptora de la información meteorológica compartida a través de la red operativa.

6 CONCLUSIONES

- ➔ **La meteorología adversa sigue siendo un factor crítico en la seguridad aérea**, con un impacto directo y contribuyente en un número relevante de accidentes. A día de hoy muchos de los riesgos son parcialmente mitigables, pero se evidencia que, en ciertas situaciones críticas, requieren una incorporación efectiva de la información climática dinámica en la toma de decisiones operativas.
- ➔ **Los fenómenos más peligrosos no siempre son los más frecuentes.** Aunque la turbulencia es el fenómeno con mayor número de ocurrencias, es el engelamiento el que presenta la mayor proporción de accidentes con víctimas mortales, seguido de la cizalladura del viento y la baja visibilidad. Este patrón evidencia que algunos fenómenos, aunque menos visibles, suponen riesgos estructurales y aerodinámicos de gran severidad.
- ➔ **El componente humano es un factor determinante en el desenlace de todos los sucesos estudiados.** La toma de decisiones en situaciones climáticas desfavorables, afectada por prejuicios cognitivos como el "*get-there-itis*" o la excesiva confianza, contribuye a que una amenaza climática manejable se transforme en una circunstancia crítica. El estrés laboral, la fatiga y la presión del tiempo aumentan la posibilidad de equivocaciones cuando el clima es desfavorable.
- ➔ **El cambio climático está modificando el patrón de los riesgos meteorológicos en aviación.** Estudios recientes indican un aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos como la turbulencia en aire claro (CAT). Este nuevo escenario requerirá adaptar tanto los modelos predictivos como las infraestructuras operativas y los procedimientos de gestión de la meteorología.
- ➔ **Existen oportunidades reales y viables de mejora tecnológica** para anticipar y mitigar los efectos de la meteorología adversa (o el cambio climático mencionado). La integración de sensores avanzados, como el LIDAR Doppler embarcado, junto con módulos de predicción en tiempo real basados en inteligencia artificial, permitirían pasar de un enfoque reactivo a uno predictivo, lo cual se presenta como una necesidad real si se quieren reducir las ocurrencias.
- ➔ **El CRM tradicional necesita evolucionar para incorporar información meteorológica predictiva.** La propuesta de CRM anticipativo presentada introduce una novedad al estructurar un procedimiento específico que se activa a partir de alertas meteorológicas generadas automáticamente (en línea con el punto anterior). Una mejora en el enfoque tecnología-humanos reforzaría la toma de decisiones proactiva, reduciría la carga cognitiva y contribuiría a evitar decisiones erróneas bajo condiciones meteorológicas adversas.

REFERENCES

Accident Investigation Bureau (AIB Nigeria). (2006). Final report on the accident to Sosoliso Airlines DC-9-32 aircraft registered 5N-BFD at Port Harcourt International Airport on 10th December 2005. https://asn.flightsafety.org/reports/2005/20051210_DC93_5N-BFD%20.pdf

Aircraft Accident Investigation Bureau (AAIB India). (2021). Final investigation report: Accident involving M/s Air India Express Limited B737-800 aircraft VT-AXH on 07 August 2020 at Kozhikode. Ministry of Civil Aviation, Government of India. <https://aaib.gov.in/Reports/2020/accident/Final%20Report%20AXH.pdf>

Aircraft Accident Investigation Commission (AAIC Nepal). (2023). Final accident investigation report: DHC-6/300 Twin Otter, registration 9N-AET, Tara Air flight 197, near Sanosware, Mustang, Nepal, on 29 May 2022. Ministry of Culture, Tourism and Civil Aviation, Government of Nepal. https://www.tourism.gov.np/files/publication_files/346.pdf

Amzajerdian, F., Hines, G. D., Pierrottet, D. F., Barnes, B. W., Petway, L. B., & Carson, J. M. III. (s. f.). *Navigation Doppler Lidar for autonomous ground, aerial, and space vehicles*. NASA Langley Research Center.

Besson, C., Dollé-Boutryre, A., Canet, G., Cluzel, N., Augère, B., Durecu, A., Lombard, S., Valla, M., & Hattenberger, A. (2016). *Doppler LIDAR developments for aeronautics*. Aerospace Lab, 2016(12), 1–16. <https://hal.science/hal-01512655v1>

Civil Aviation Authority (CAA) Pakistan. (2015). Final report: Aircraft accident investigation into M/s Bhoja Air Flight BHO-213, Boeing 737-236A, registration AP-BKC, crashed on 20th April 2012 near BBIAP, Islamabad. <https://caapakistan.com.pk/Upload/SIBReports/SIB-350.pdf>

Comisión de Investigación de Accidentes de Aviación (CIAA) Perú. (2006). Informe final CIAA-ACCID-007-2005: Accidente de la aeronave Boeing 737-244ADV, matrícula OB-1809-P, ocurrido el 23 de agosto de 2005 cerca de Pucallpa, Perú. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/356853-informe-final-ciaa-accid-007-2005-matricula-ob-1809-p-fecha-23-08-2005>

Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes de Aviación Civil (CIAIAC). (2001). Accident involving the aircraft Beechcraft King Air C90, registration EC-GSJ, at Vitoria (Álava), on 29 August 2001 (Report A-055/2001). Ministerio de Fomento, Gobierno de España. https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/2001_055_a_eng_0.pdf

Divulgameteo. (n.d.). Englamiento. <https://www.divulgameteo.es/uploads/Englamiento.pdf>

European Union. (n.d.). *Civil aviation accidents and incidents*. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/civil-aviation-accidents-and-incidents.html>

European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2023). Easy Access Rules for Air Traffic Management/Air Navigation Services (Regulation (EU) 2017/373). <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-air-traffic-managementair-navigation-services>

European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2024). *Annual Safety Review 2024*. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/annual-safety-review-2024>

Flight Safety Foundation. (s.f.). Accident description: Air India Express flight 1344, Boeing 737-8HG VT-AXH — 7 August 2020. Aviation Safety Network. <https://asn.flightsafety.org/asndb/322216>

Flight Safety Foundation. (s.f.). Accident description: Beechcraft C90 King Air EC-GSJ — 29 August 2001. Aviation Safety Network. <https://asn.flightsafety.org/asndb/319272>

Flight Safety Foundation. (s.f.). Accident description: Bhoja Air flight 213, Boeing 737-236A AP-BKC — 20 April 2012. Aviation Safety Network. <https://asn.flightsafety.org/asndb/320952>

Flight Safety Foundation. (s.f.). Accident description: Embraer EMB-500 Phenom 100 N100EQ — 8 December 2014. Aviation Safety Network. <https://asn.flightsafety.org/asndb/320395>

Flight Safety Foundation. (s.f.). Accident description: Flydubai flight 981, Boeing 737-8KN A6-FDN — 19 March 2016. Aviation Safety Network. <https://asn.flightsafety.org/asndb/319139>

Flight Safety Foundation. (s.f.). Accident description: Precision Air flight 494, ATR 42-500 5H-PWF — 6 November 2022. Aviation Safety Network. <https://asn.flightsafety.org/asndb/324754>

Flight Safety Foundation. (s.f.). Accident description: Saratov Airlines flight 703, Antonov An-148-100B RA-61704 — 11 February 2018. Aviation Safety Network. <https://asn.flightsafety.org/asndb/319726>

Flight Safety Foundation. (s.f.). Accident description: Sosoliso Airlines flight 1145, McDonnell Douglas DC-9-32 5N-BFD — 10 December 2005. Aviation Safety Network. <https://asn.flightsafety.org/asndb/327476>

Flight Safety Foundation. (s.f.). Accident description: TANS Perú flight 204, Boeing 737-244 OB-1809-P — 23 August 2005. Aviation Safety Network. <https://asn.flightsafety.org/asndb/318601>

Flight Safety Foundation. (s.f.). Accident description: Tara Air flight 197, de Havilland Canada DHC-6-300 Twin Otter 9N-AET — 29 May 2022. Aviation Safety Network. <https://asn.flightsafety.org/asndb/327263>

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2018). Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation – Meteorological service for international air navigation (20th ed.). <https://store.icao.int/en/annex-3-meteorological-service-for-international-air-navigation>

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2024). Safety Report 2024 Edition. https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO_SR_2024.pdf

International Civil Aviation Organization (ICAO). (s. f.). *Manual on low-level wind shear and turbulence: Proposed changes to the 1st edition (Appendix E)*. ICAO.

International Civil Aviation Organization (OACI). (2018). ECCAIRS: Base de datos OACI. Volumen 2. European Co-ordination Centre for Accident and Incident Reporting Systems.

Interstate Aviation Committee (IAC). (2019). Final report on the accident involving Antonov An-148-100B, registration RA-61704, operated by Saratov Airlines near Stepanovskoye, Russia, on 11 February 2018. https://mak-iac.org/upload/iblock/fbc/report_ra-61704.pdf

Journal of Airline Operations and Aviation Management. (s.f.). Editorial. Journal of Airline Operations and Aviation Management, 2(1), 9. <https://doi.org/10.56801/jaoam.v2i1.1>

Knecht, W. R., & Lenz, M. (2010). *Causes of general aviation weather-related, non-fatal incidents: Analysis using NASA Aviation Safety Reporting System data* (DOT/FAA/AM-10/13). Federal Aviation Administration, Civil Aerospace Medical Institute. https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/2010s/media/201013.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (n.d.). Radares meteorológicos de AEMET. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/formacion/02_radares_aemet_tcm30-561569.pdf

Mouw, T. (2020). Assertiveness and aggressiveness as predictors of aviation safety attitudes in military pilots [Tesis de maestría]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15923.99369>

Nechaj, P., Gaál, L., Bartok, J., Vorobyeva, O., Gera, M., Kelemen, M., & Polishchuk, V. (2019). Monitoring of low-level wind shear by ground-based 3D Lidar for increased flight safety, protection of human lives and health. *Sensors*, 19(23), 5178. <https://doi.org/10.3390/s19235178>

Orlando, E. (2024, noviembre 20). La cizalladura del viento, el enemigo mortal de la aviación. Radares mirando al Sur. <https://meteoradares.wordpress.com/2024/11/20/la-cizalladura-del-viento-el-enemigo-mortal-de-la-aviacion/>

Orlando, E. (2024, noviembre 20). La lluvia y el granizo: efectos en los motores y la sustentación. Radares mirando al Sur. <https://meteoradares.wordpress.com/2024/11/20/la-lluvia-y-el-granizo-efectos-en-los-motores-y-la-sustentacion/>

Orlando, E. (2024, noviembre 20). La turbulencia y otros villanos atmosféricos. Radares mirando al Sur. <https://meteoradares.wordpress.com/2024/11/20/la-turbulencia-y-otros-villanos-atmosfericos/>

Orlando, E. (2024, noviembre 20). ¿Qué factores meteorológicos afectan a la aviación?. Radares mirando al Sur. <https://meteoradares.wordpress.com/2024/11/20/que-factores-meteorologicos-afectan-a-la-aviacion/>

Peláez, A. (2024). Gestión de la seguridad aérea e investigación de accidentes. Tema 2: Principios básicos de la investigación. Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica, Universidad Europea de Madrid.

Peláez, A. (2024). Gestión de la seguridad aérea e investigación de accidentes. Tema 7: Modelos de investigación. Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica, Universidad Europea de Madrid.

Peláez, A. (2024). Gestión de la seguridad aérea e investigación de accidentes. Tema 8: Factores humanos. Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica, Universidad Europea de Madrid.

Peláez, A. (2024). Módulo 5: Causalidad. Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica, Universidad Europea de Madrid.

Peláez, A. (2024). Módulo 6: Análisis. Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica, Universidad Europea de Madrid.

Peláez, A. (2024). Sistemas avanzados de navegación y control inercial y por satélite. Tema 6: Servicios de ayudas a la navegación aérea. Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica, Universidad Europea de Madrid.

Peláez, A. (2024). Sistemas avanzados de navegación y control inercial y por satélite. Tema 8: Servicios AIS/MET. Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica, Universidad Europea de Madrid.

Williams, P. D., & Joshi, M. M. (2023). Tendencias de la turbulencia en aire despejado sobre el Atlántico Norte en modelos climáticos de alta resolución. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06819-0>