



De la Gobernanza Climática a la Resiliencia Aeroportuaria

Implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT)
para la Navegación Aérea en la Región CAR/SAM.

Met. Néstor Santayana | 21-25 Septiembre 2026 | UTP, Ciudad de Panamá

Ciclo de Gestión de Riesgo de Desastres

Fases clave y objetivos



Fase Clave

Objetivo Principal



Prevención

(ej. Mapas de peligros)

Reducir la probabilidad de ocurrencia de desastres o minimizar sus efectos.



Mitigación y Preparación

(ej. Planes de actuación)

Disminuir la vulnerabilidad y la exposición a las amenazas.

Mejorar la capacidad para responder eficazmente a una emergencia.



Respuesta

(ej. importancia de avisos puntuales, claros e inequívocos)

Proteger vidas y bienes antes, durante e inmediatamente después del evento.



Recuperación

Restablecer la normalidad y reconstruir de manera más segura y resiliente.

SAT – Sistema de Alerta Temprana

Un enfoque integral para anticipar, decidir y reducir el riesgo



“Una alerta temprana adquiere valor en la decisión que permite tomar”

SAT-MET: El Escudo Sistémico

Integración de información, decisiones y personas para una aviación más segura y resiliente



Marco Sendai

Comprender el riesgo, fortalecer la gobernanza e invertir en resiliencia.



Doc 8896 OACI

Entrega de información oportuna (SIGMET/TAF) y coordinación con autoridades ATS.



Más información + Mejor coordinación
= **Mayor resiliencia**

SAT – Etapa de Interpelación

Del análisis del evento a la decisión y la acción



Ciclo de Deming (PDCA)

ACTUAR
Analizar
Acciones
Correctivas

PLANEAR
Objetivos
Recursos
Comunicar

VERIFICAR
Medición,
Auditorías,
Verificaciones

HACER
Procesos
Actividades,
Productos / Servicios



Ciclo Deming (PHVA)



Las **simulaciones** de distintos **escenarios adversos** potenciarán el **equipo** y colaborará en mejorar las **herramientas** con las que cuenta el SAT; la interpelación del sistema o sus actores mediante un **FODA** o una **Análisis causa raíz (CAR)** permitirá una **detección de posibles errores o fallos** y así aplicar **mejoras** en cualquiera de sus etapas.



Algo que también colaborará en reforzar la experiencia y el conocimiento del equipo, es realizar un **informe final post evento**; y que cada institución dentro de sus responsabilidades, presente ante los demás integrantes del SAT dicho informe.



Recordar que la **autocrítica** permitirá **mejorar cualquier de las etapas del SAT**, desde el inicio con los pronósticos y las predicciones, continuando con la detección del fenómeno y comunicación del mismo, y posteriormente con la toma de decisiones y la respuesta.

La Iniciativa Global Early Warnings for All y la Estructura del SAT Aeronáutico

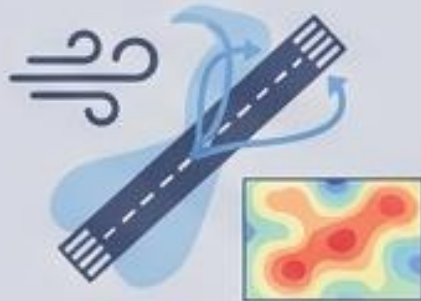


Meta global (ONU/OMM): Proteger a cada persona e infraestructura crítica **antes de 2027**. Para la aviación, un SAT verdaderamente integral requiere cuatro pilares interconectados.

Resiliencia Operativa Aeroportuaria

Conocimiento del Riesgo

Caracterización de microclimas y análisis de vulnerabilidad en rutas de aproximación (SID/STAR).



Detección y Monitoreo

Redes observacionales de alta resolución en aeródromos e integración al sistema WIGOS.



Difusión y Comunicación

Transición digital hacia SWIM y difusión mediante marcos de Toma de Decisiones Colaborativa (A-CDM).



Capacidad de Respuesta

Planes de contingencia tácticos (ej. desvios, suspensión temporal de operaciones en rampa).



La Iniciativa Global Early Warnings for All y la Estructura del SAT Aeronáutico



Meta global (ONU/OMM): Proteger a cada persona e infraestructura crítica antes de 2027. Para la aviación, un SAT verdaderamente integral requiere cuatro pilares interconectados.



SAT-MET

Ejemplos de riesgos que cubre un SAT-MET para aviación



Fenómenos

Eventos meteorológicos que pueden afectar la operación aérea.

- Tormentas severas
- Niebla
- Cizalladura
- Engelamiento
- Turbulencia



Impacto operacional

Cómo afectan la operación del aeropuerto.

- Desvíos y/o cancelaciones
- Cierre de pista por baja visibilidad
- Aterrizaje y despegue riesgoso
- Pérdida de sustentación
- Daños y otros



Producto de alerta

Información que permite tomar decisiones.

- SIGMET, radar, TAF, AMD
- METAR, TAF, informes web
- Avisos por cizalladura, LLWS
- SKEW-T, SIGMET, SAT local
- PIREPs, SIGMET, modelos NWP



Ejemplos de recomendaciones para fortalecer el SAT-MET

De la información a la acción



Área

Dónde y cómo se actúa.

- Marco legal y normativo
- Interoperabilidad
- Capacitación
- Evaluación
- Retroalimentación



Recomendación concreta

Qué se debe implementar.

- Fortalecer acuerdos con actores aeronáuticos (ej. protocolos)
- Integrar SAT-MET con sistemas ATS y de gestión de aeropuertos
- Entrenamiento periódico a usuarios y simulacros conjuntos
- Medir desempeño: acierto de avisos, tiempos de emisión, impacto
- Establecer canales con pilotos/controladores para mejora continua



El Cambio de Paradigma: Del Pronóstico Físico a la Alerta Basada en Impactos (IBFW)

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro (H)} \times \text{Exposición (E)} \times \text{Vulnerabilidad (V)}$$

- **Peligro (H):** El evento meteorológico (Ej. 40 mm de lluvia en 2 horas).

- **Exposición (E):** Activos y tráfico en la zona de influencia.

- **Vulnerabilidad (V):** Capacidad del aeródromo (Ej. estado del drenaje).

Escenario A



Escenario A (Riesgo Verde/Amarillo): Misma tormenta a las 03:00 UTC. Nula exposición de tráfico, drenajes limpios. Monitoreo rutinario.

Escenario B



Escenario B (Riesgo Naranja/Rojo): Misma tormenta a las 18:00 UTC (Hora pico). Alta exposición, suelos previamente saturados. Consecuencia: Anegamiento y gatillo de demoras en tierra (GDP).

Alto Peligro, Baja Exposición/ Vulnerabilidad	Alto Peligro, Alta Exposición/ Vulnerabilidad
Bajo Peligro, Baja Exposición/ Vulnerabilidad	Bajo Peligro, Alta Exposición/ Vulnerabilidad

Alto Peligro, Baja Exposición/ Vulnerabilidad	Alto Peligro, Alta Exposición/ Vulnerabilidad
Bajo Peligro, Baja Exposición/ Vulnerabilidad	Bajo Peligro, Alta Exposición/ Vulnerabilidad



PARADIGMA TRADICIONAL

- Responde a:** "¿QUÉ TIEMPO HARÁ ?" (Variables físicas)
- Ejemplo:** "Se prevén 80 mm de lluvia en 3 horas y rachas de 45 kt"



PARADIGMA MODERNO (IBFW)

- Responde a:** "¿QUÉ HARÁ EL TIEMPO EN LA INFRAESTRUCTURA Y OPERACIÓN?"
- Ejemplo:** "Riesgo ALTO de anegamiento en Pista 06/24 y capacidad de maniobra reducida a 30% por cizalladura severa entre 14-16 UTC"



MATRIZ DE RIESGO DE IMPACTO AERONÁUTICO

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	SEVERIDAD DEL IMPACTO			
	MÍNIMO	MODERADO	ALTO	SEVERO
ALTA	Amarillo	Naranja	Rojo	Rojo
MEDIA	Verde	Amarillo	Naranja	Rojo
BAJA	Verde	Verde	Amarillo	Naranja



Transición de la Arquitectura Digital: El Fin de los Silos de Información



AMHS / TAC

Modelo Histórico: Sistema de Manejo de Mensajes Aeronáuticos.

Formato: Texto plano alfanumérico (TAC), no estructurado.

Limitación: Mensajería punto a punto, rígida y limitada por las fronteras políticas de las Regiones de Información de Vuelo (FIR).

vs.



SWIM / IWXXM

Nuevo Paradigma: Gestión de la Información en Todo el Sistema.

Formato: Estándares web abiertos (XML/GML).

Ventaja: Datos continuos, consumibles dinámicamente por algoritmos ATM y Maletines Electrónicos de Vuelo (EFB) sin fronteras geopolíticas.

Servicios HWIS: La Meteorología Aeronáutica se Vuelve Tridimensional

El Proyecto OACI HWIS (Servicios de Información de Meteorología Peligrosa) rediseña la gestión del riesgo climático migrando de alertas textuales a mallas de datos tridimensionales.



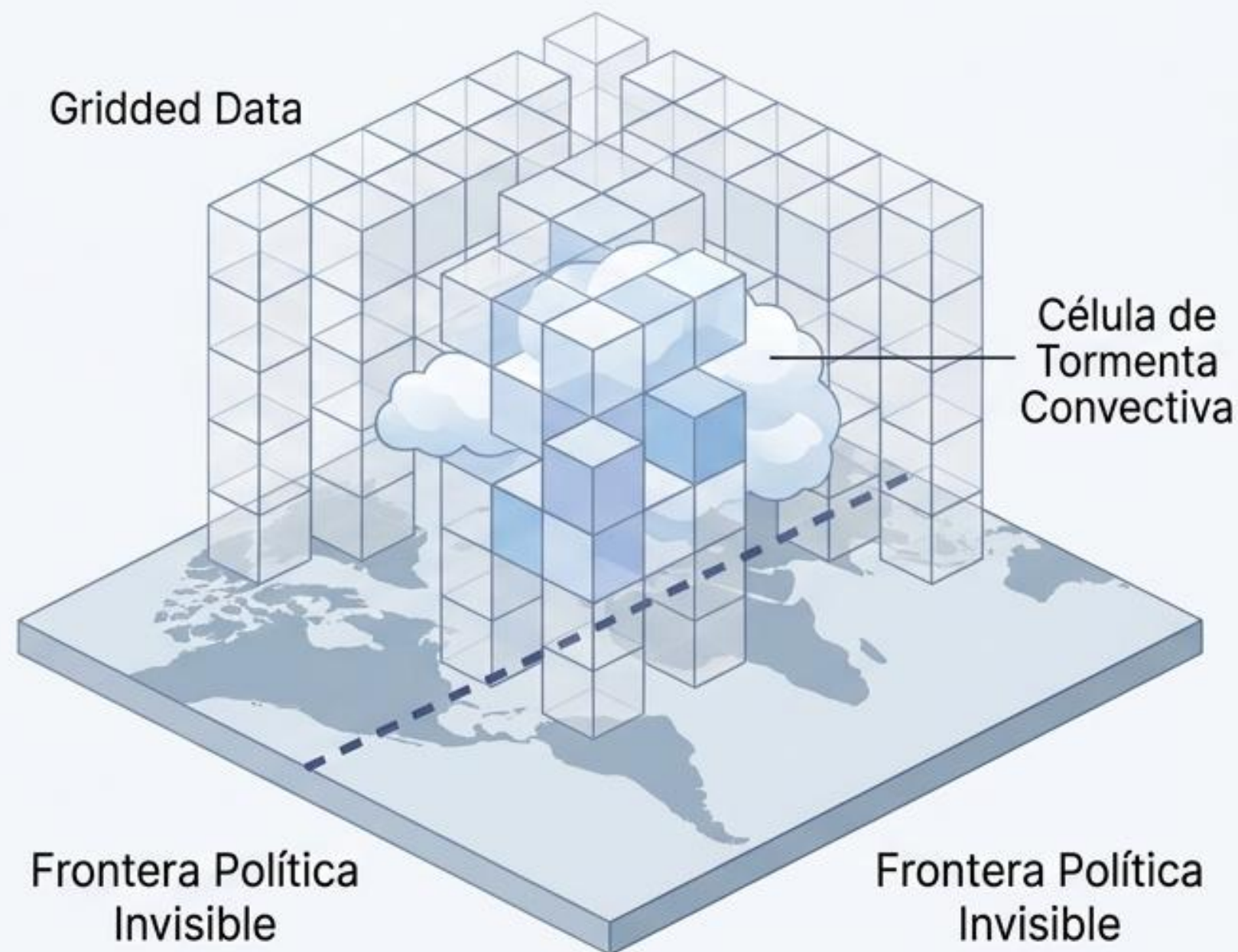
Eliminación de fronteras: Los sistemas convectivos no respetan las FIR. HWIS genera una capa de datos continua e integrada a escala regional.



Capacidad Operativa Inicial (IOC): Priorización absoluta en la detección de Convección Profunda (turbulencia, granizo, cizalladura).



Hito Regulatorio OACI (Noviembre 2026): Consolidación de la Enmienda 81 al Anexo 3 y PANS-MET (Doc 10157) como habilitadores obligatorios del estándar IWXXM.



Los Ojos del Aeropuerto: Redes Observacionales de Alta Resolución como parte de la infraestructura y resiliencia



Pista: AWOS y Transmisómetros RVR

El núcleo de observación en superficie. Críticos para habilitar operaciones ILS en Categorías II y III bajo baja visibilidad.



Área Terminal (TMA): Radar Meteorológico Doppler Polarimétrico

Clasificación cuantitativa de hidrometeoros en tiempo real (lluvia, nieve, granizo).



Aproximación vertical: Perfiladores (RWP) y LIDAR Doppler

Medición de cizalladura de viento en aire claro (clean air windshear) y turbulencia con precisión métrica en la senda de planeo.



Periferia: Sensores LLWAS y Redes de Rayos

Detección de divergencia del vector viento en baja altura e incrementos repentinos de descargas intra-nube (Lightning Jump).

Necesidad operacional:

Qué variable necesitamos? Dónde debemos medirla?
Con qué frecuencia? Qué decisión ayudará a tomar?

Reduciendo la Brecha: Detección y Nowcasting

Más datos, mejor integración, mayor tiempo para decidir



WIGOS / AWOS

Sensores in situ de alta resolución en pista.



Procesamiento IA

Algoritmos para detección convectiva y LLWS.



Sinergia Aérea

Datos AMDAR (aeronaves) + Radares + LIDAR.

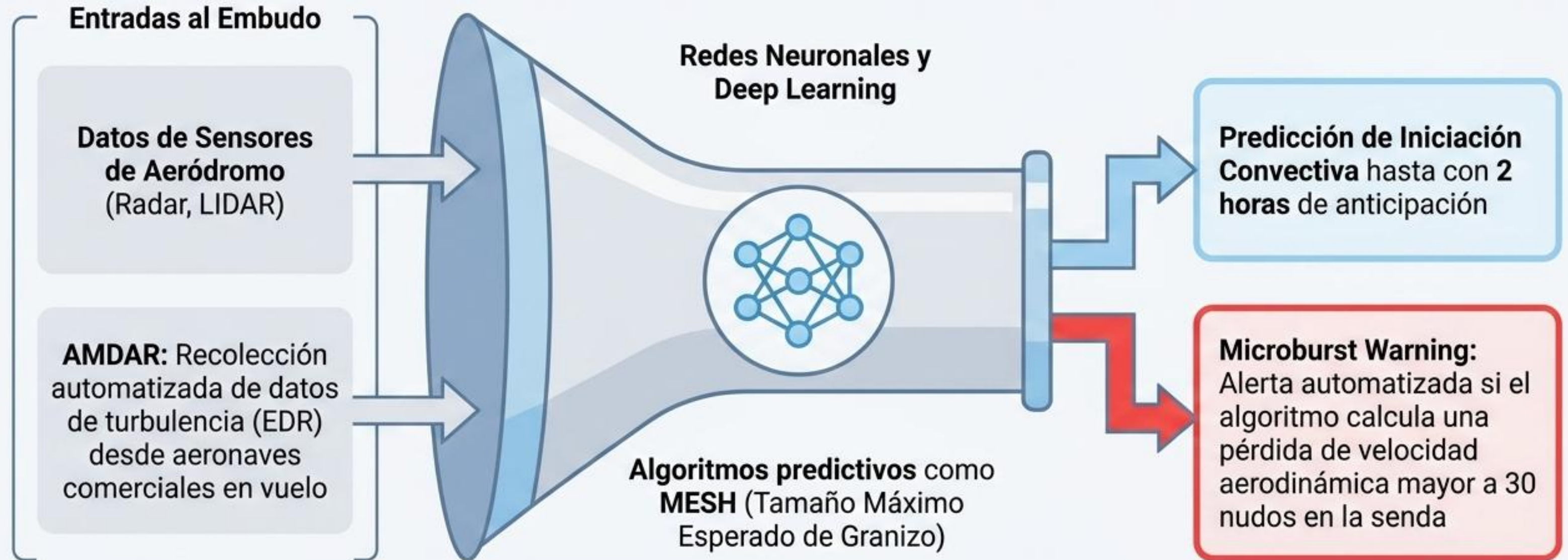


Nowcasting

Pronóstico a muy corto plazo (< 2h).



El Cerebro del SAT: Nowcasting y Aprendizaje Profundo (0-6 Horas)



Predicción de turbulencia usando técnicas AI

El ABI y el AHI tienen suficiente resolución temporal y espacial para detectar muchos episodios turbulentos.

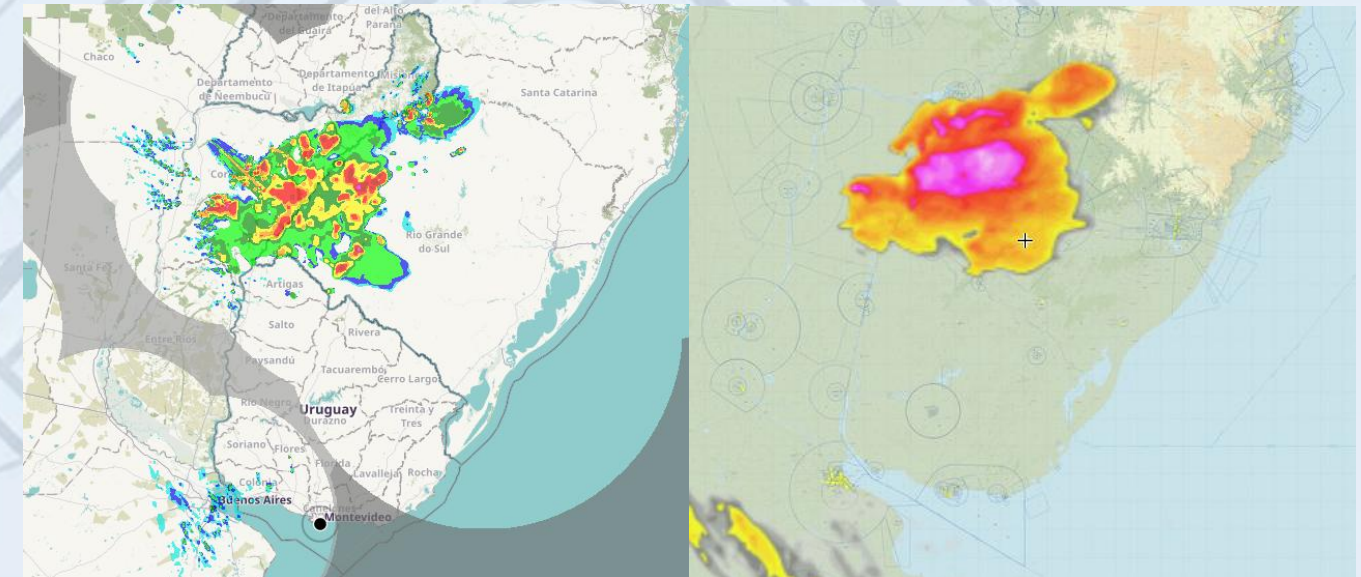
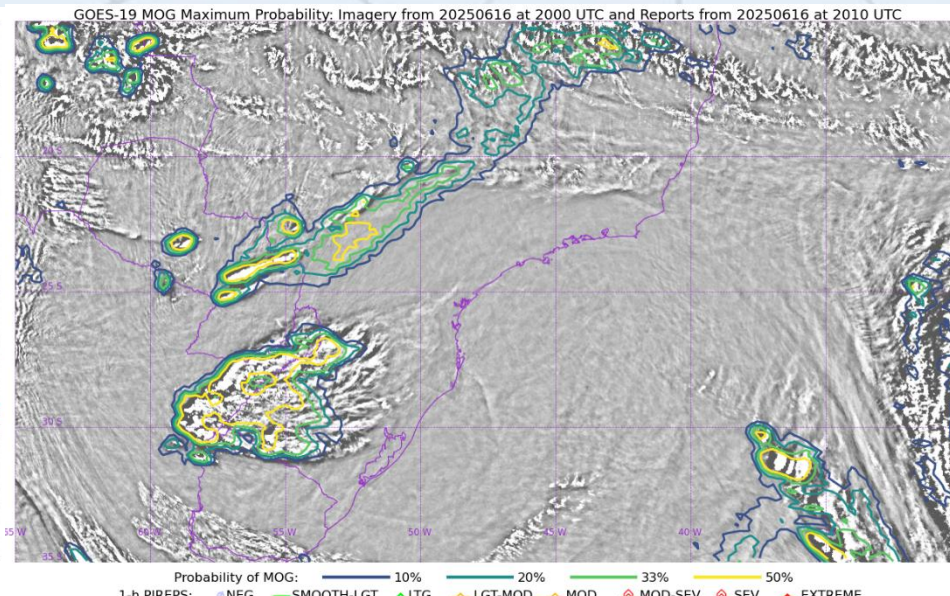
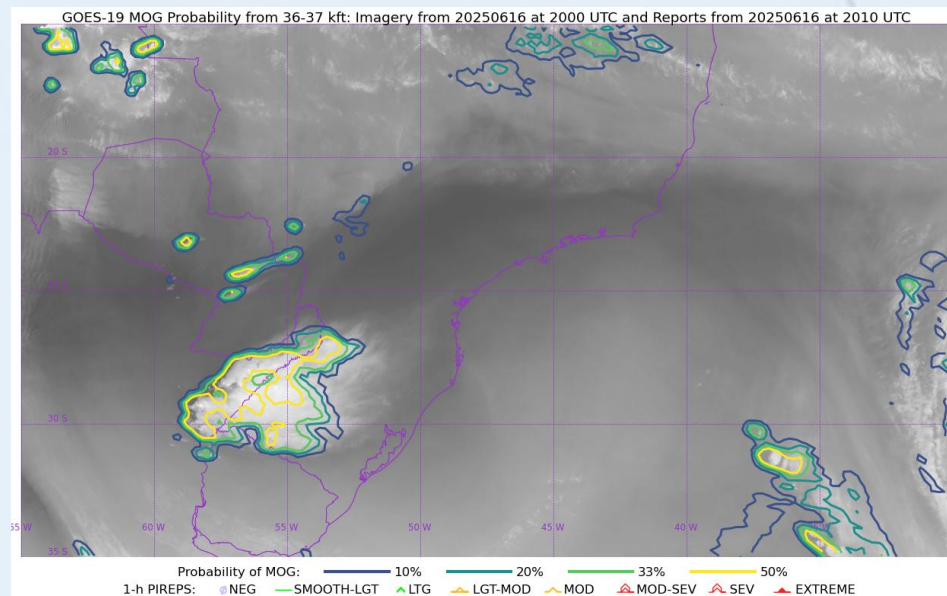
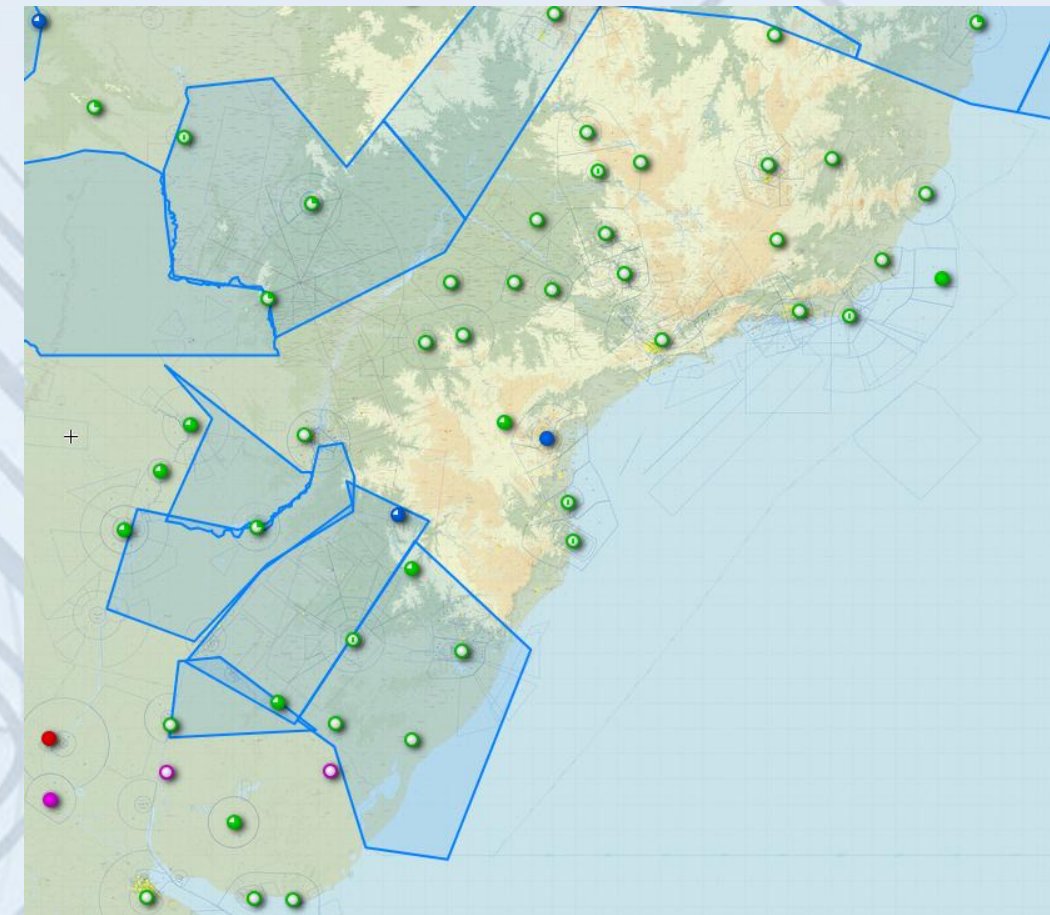
El aprendizaje profundo se usa para relacionar las observaciones satelitales con la probabilidad de turbulencia moderada o mayor (MOG en inglés).

Miles de casos turbulentos o no turbulentos se usan para crear el modelo predictivo.

- ✓ El canal de la ventana del infrarrojo ($10.3\ \mu\text{m}$ - Banda 13) y las imágenes (en altura) del vapor de agua ($6.2\ \mu\text{m}$ - Banda 8).
- ✓ Observaciones de turbulencia de las aeronaves (en 30,000 - 40,000 pies) se usan para entrenar y validar el modelo.

El producto de turbulencia es probabilístico (%). Fue hecho para ser interpretado como la probabilidad de MOG.

- ✓ En cualquier nivel dentro de una altitud de crucero típica (30,000 - 40,000 pies).
- ✓ Para aviones grandes (ej: de pasajeros comercial).
- ✓ Al menos una vez durante un período de 10-minutos.



El Entorno Operacional: La Vulnerabilidad Aérea

La navegación aérea moderna depende estrechamente de la información meteorológica.



Vulnerabilidad operacional

Procedimientos, capacidad, dependencia de equipos, congestión, exposición del personal, necesidad de coordinación entre múltiples actores, entre otros.

La navegación aérea depende estrechamente de la información meteorológica. Los fenómenos atmosféricos severos no son solo inclemencias; son amenazas directas que causan **desvíos, emergencias o accidentes** si no se gestionan a tiempo.



El fenómeno es atmosférico; el riesgo es sistémico"



Fenómenos Críticos:



Tormentas eléctricas (TS)
y nubes convectivas (CB)



Turbulencia severa



Engelamiento severo

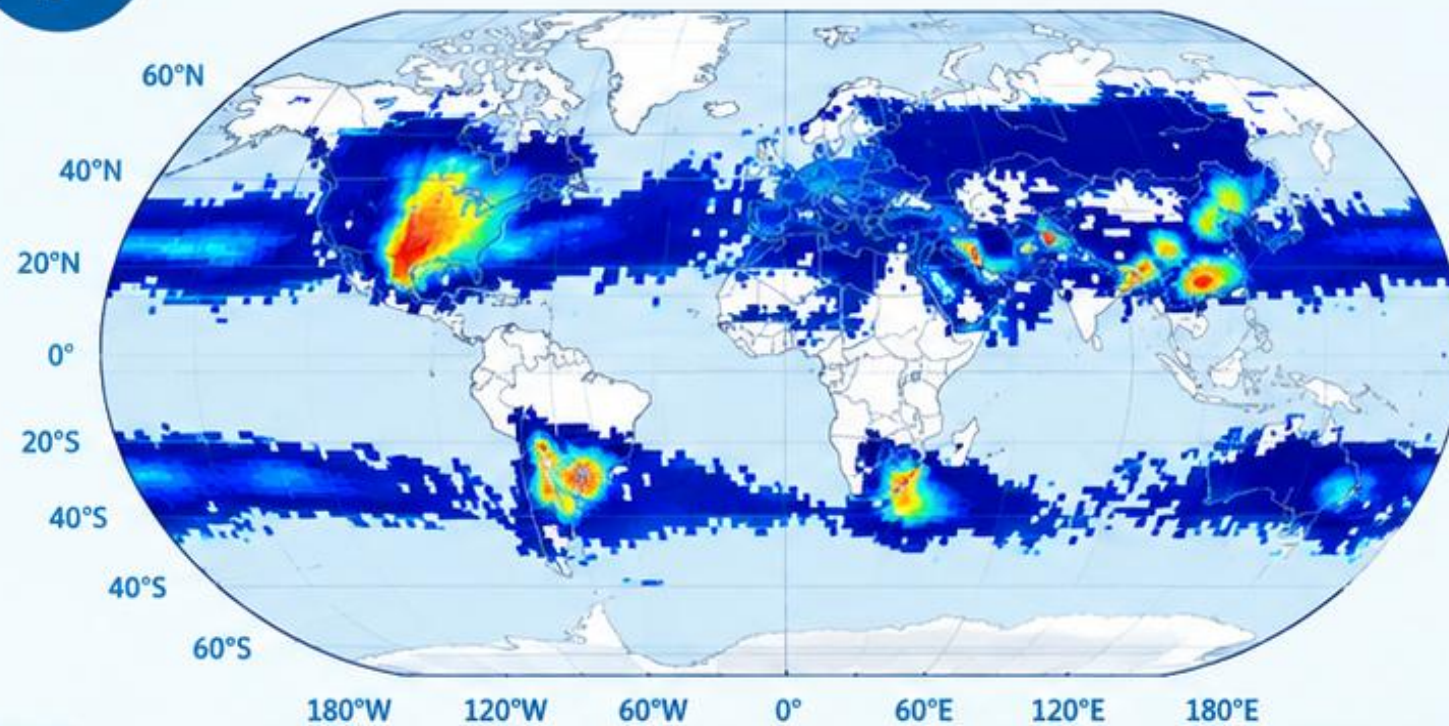
Distribución mundial de los fenómenos convectivos severos



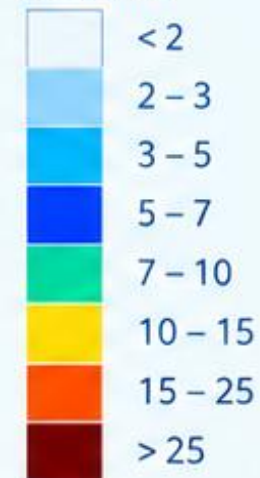
Tiempo severo en el mundo asociado a tormentas, tornados y descargas eléctricas...
...Y donde hay tormentas, también habrá granizo, engelamiento, turbulencia, cizalla, lluvia.



Ambientes favorables a tornados



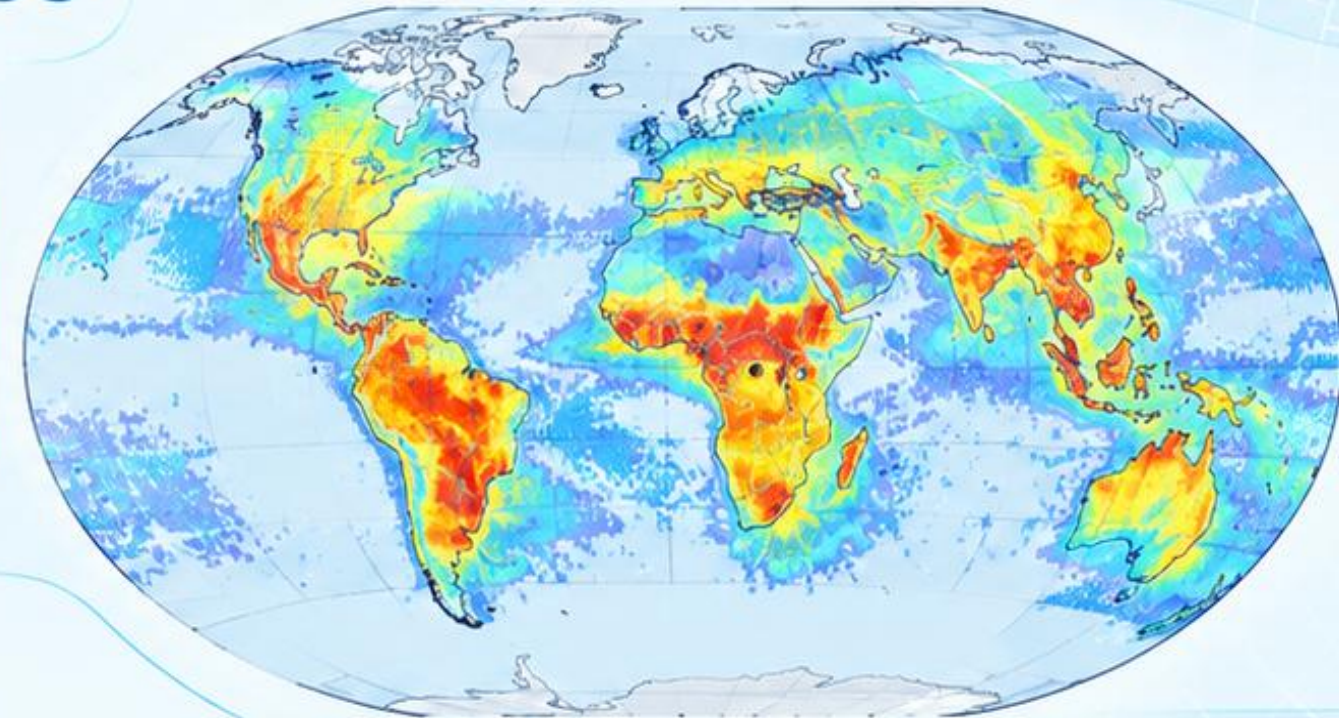
Entornos de tornados (días/año)



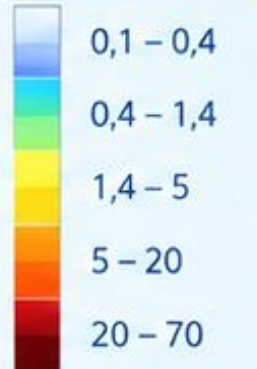
Fuente: NOAA



Densidad de descargas eléctricas (rayos)



Destellos/km²/año



Graphic courtesy NASA





Compendio OMM AeM SERIES Nº 9

Efectos del cambio climático en los peligros meteorológicos y análisis de los impactos en las operaciones de la aviación

Señala hallazgos sobre los efectos del cambio climático en los peligros meteorológicos y sus impactos en la aviación.



Caribe

- **Huracanes y tormentas tropicales:** incremento en intensidad y duración, con más interrupciones aéreas y efectos en la infraestructura aeroportuaria.
- **Aumento del nivel del mar:** amenaza a aeropuertos insulares y costeros.



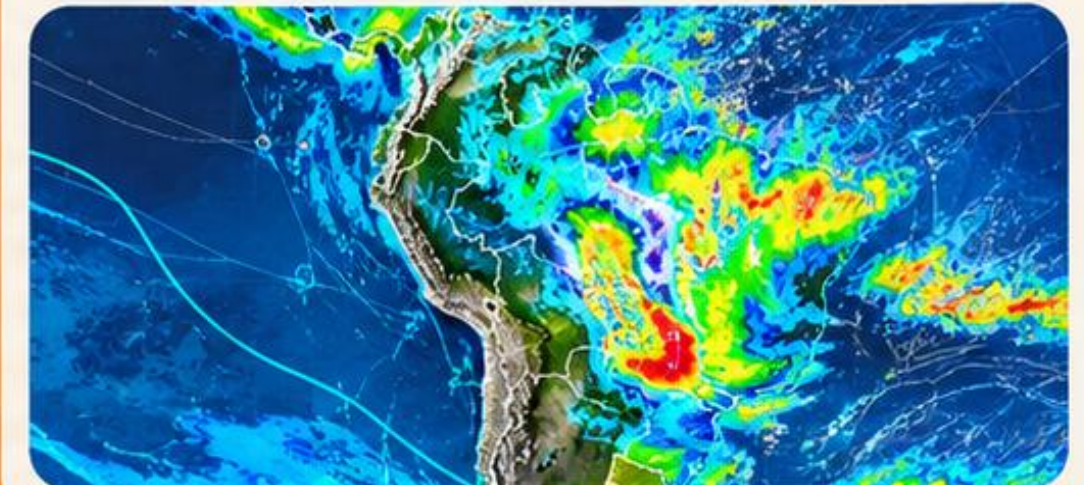
Centroamérica

- **Convección intensa:** aumento en la frecuencia y severidad de tormentas eléctricas, lo que complica la planificación de vuelos regionales.
- **Eventos de viento severo y granizo:** más impactos operacionales en aeródromos pequeños.
- **Ciclones tropicales:** patrones de trayectoria cambiantes que generan cierre de aeropuertos y desvíos en rutas.



Sudamérica

- **Turbulencia de aire claro (CAT):** sobre los Andes, aumentos notables en altitudes de crucero, afectando rutas interiores entre países andinos.
- **Visibilidad reducida:** por niebla en el Cono Sur.
- **Inundaciones estacionales:** en aeropuertos amazónicos y costeros por lluvias intensas.



EL CAMBIO CLIMÁTICO ESTÁ MODIFICANDO LA FRECUENCIA, INTENSIDAD Y DISTRIBUCIÓN DE LOS PELIGROS METEOROLÓGICOS, LO QUE GENERA NUEVOS DESAFÍOS PARA LA AVIACIÓN.



Más información, mejores decisiones...
una aviación más segura.



Resiliencia de la Infraestructura Física ante Eventos Extremos



Impacto Hídrico (Lluvias Extremas)



Saturación de Suelos: Debilitamiento de la capacidad portante (índice CBR) bajo el pavimento.



Acuaplanaje: Una lámina de agua de apenas >3 mm reduce drásticamente la fricción, generando riesgo de acuaplanaje dinámico.



Colapso Pluvial: Escorrentía superficial cuando se superan los tiempos de retorno históricos del diseño del drenaje.



Impacto Térmico (Calor Extremo)



Daño al Pavimento: Ahuellamiento del asfalto y levantamiento de losas (*blow-ups*), generando residuos peligrosos (FOD).



Penalización Aerodinámica: La pérdida de densidad del aire reduce la sustentación. Exige mayor distancia de despegue e impone severas restricciones de Peso Máximo al Despegue (MTOW).

La Tríada del Peligro Meteorológico

Tres componentes que, al combinarse, aumentan el riesgo en la aviación



	 Convección (CB)	 Turbulencia	 Englamiento
 Impacto Operacional	Micro ráfagas, rayos, desvíos masivos.	Daños estructurales, lesiones, pérdida momentánea de control.	Pérdida de sustentación, lectura errónea de instrumentos.
 Herramienta de Alerta	Radar Doppler, GOES, Lightning Jump.	PIREPs, Modelos IA (EDR/MOG).	Microfísica RGB, WRF, Perfiles de T°.
 Producto	SIGMET, TAF AMD.	SIGMET TURB.	SIGMET ENGELAMIENTO.



Condición meteorológica se traduce en un **impacto** concreto y ese activa una **respuesta definitiva**.

Condición meteorológica se traduce en un impacto concreto y ese activa una respuesta definitiva



Anatomía de la Convección: Algoritmo GR02T

Detección de potencial de tiempo severo
ponderando el crecimiento de granizo.



Engelamiento: La Carga Oculta

Agua superenfriada (SLW) que se congela al
contacto con la aeronave, afectando críticamente
la sustentación y el rendimiento del motor.

Hielo Claro (Glaze):
Transparente, fuerte adherencia.
(Nubes cumuliformes).



Niveles Típicos:
FL300 – FL180
(-12 °C / -56 °C aprox.)



Rango Crítico de T°:
 0 °C a -20 °C
(°Severe en -20 °C y -10 °C°).



Escenarios:
Frentes cálidos/ocuidos,
ascensos orográficos, alta
humedad ($\geq 80\%$).

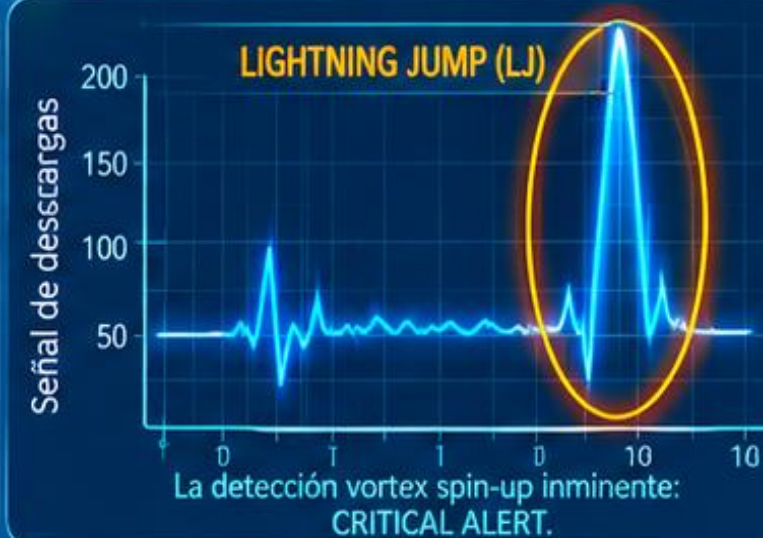
Hielo Granulado (Rime):
Blanco, opaco.
(Nubes estratiformes).



Nowcasting Avanzado: El “Lightning Jump”

La extrapolación de descargas atmosféricas
es una herramienta de detección temprana
crucial. ¿Qué pronostica un aumento súbito (LJ)?

- La tormenta tenderá a durar más
tiempo activo (20–60 min).
- La estructura convectiva se está
intensificando rápidamente.
- Aumento inminente en el riesgo de
granizo, vientos fuertes o tornados.



Turbulencia: Detección mediante Inteligencia Artificial

Las redes neuronales de aprendizaje
profundo relacionan observaciones
satelitales, GOES-ABI/AMV, con
parámetros reanálisis para crear modelos
predictivos de turbulencia.



Rango crítico de T°:
 0 °C a -20 °C
(°Severe en -20 °C y -10 °C°).



INPUTS:
Cizalladura ($10,3$ μm),
Vapor de Agua ($6,2$ μm),
+ Reportes de aeronaves,
con datos en tiempo real.



OUTPUT:
Probabilidad de turbulencia
moderada o mayor
(MOG – Moderate or Greater).



MÉTRICA DE SEVERIDAD:
EDR
(Eddy Dissipation Rate).

¿Qué se puede pronosticar al ocurrir un LJ?

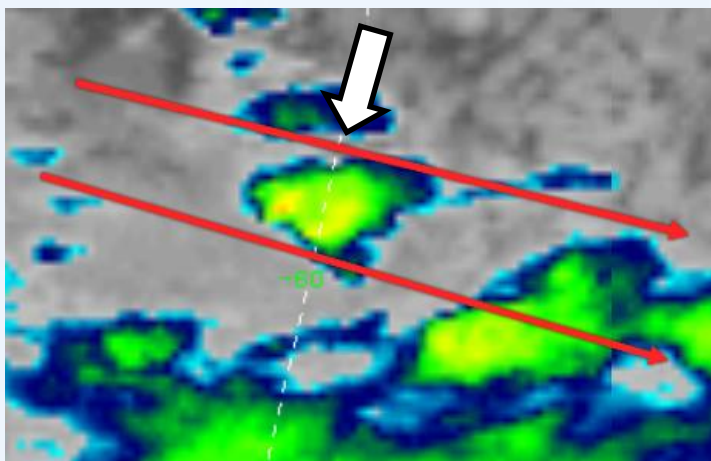
Que la tormenta...

1. tenderá a durar más tiempo activa (20-60 min),
2. se está intensificando,
3. se está volviendo más severa: pueden estarse incrementando
 - ✓ su razón de precipitación,
 - ✓ el potencial de que el granizo crezca,
 - ✓ el potencial de producir vientos fuertes,
 - ✓ el potencial de tornados (si existe).

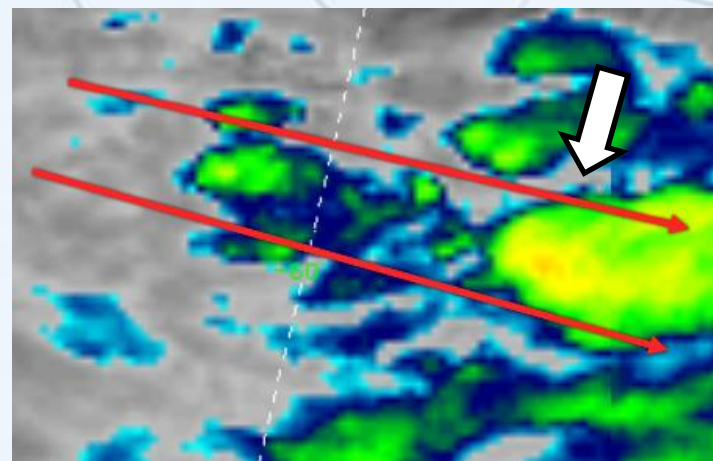
Anticipación de severidad de hasta 20 minutos (Schultz et al. 2011)

Anticipación de duración de hasta 1 hr (Schultz et al. 2011)

Una serie de LJ ocurren entre 1900 y 1920 UTC. Notar intensificación de la tormenta entre las flechas rojas: Es la celda dominante a las 19:40 UTC.

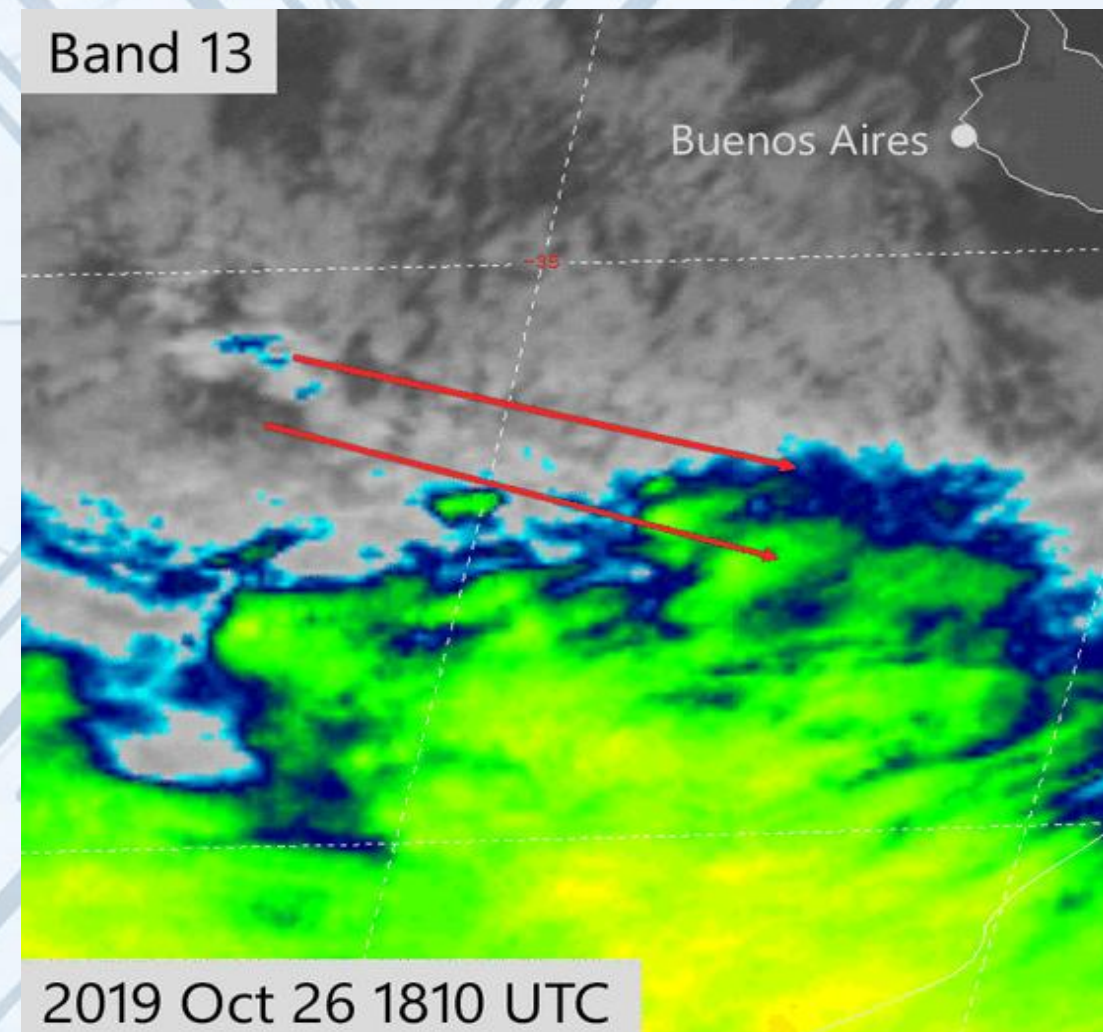


Antes (18:50) UTC



Después (19:40 UTC)

Ej. Celda en
Provincia de
Buenos Aires
(Argentina).



Animación: Banda 13 y Group Flash
Count Density. Fuente: CIRA.



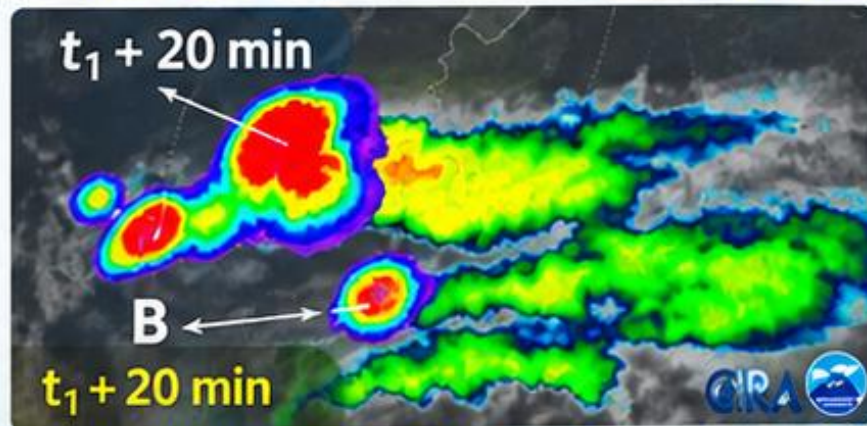
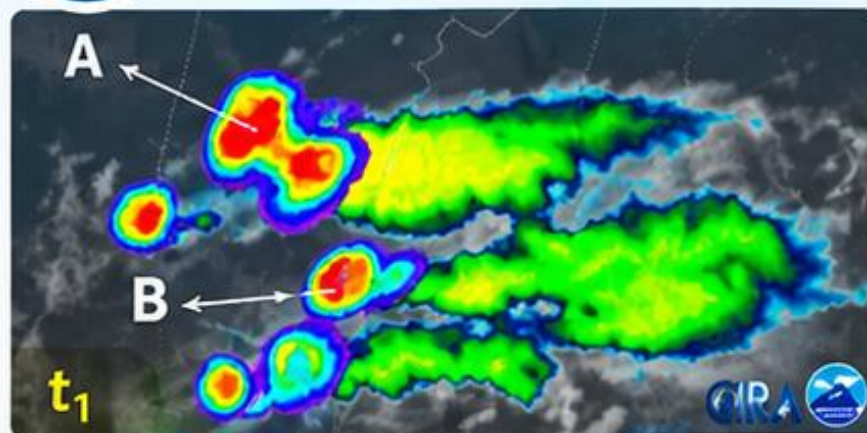
Ejercicio: Pronóstico de la duración de celdas con Lightning Jump (LI)

Identificación y seguimiento de la evolución de celdas convectivas

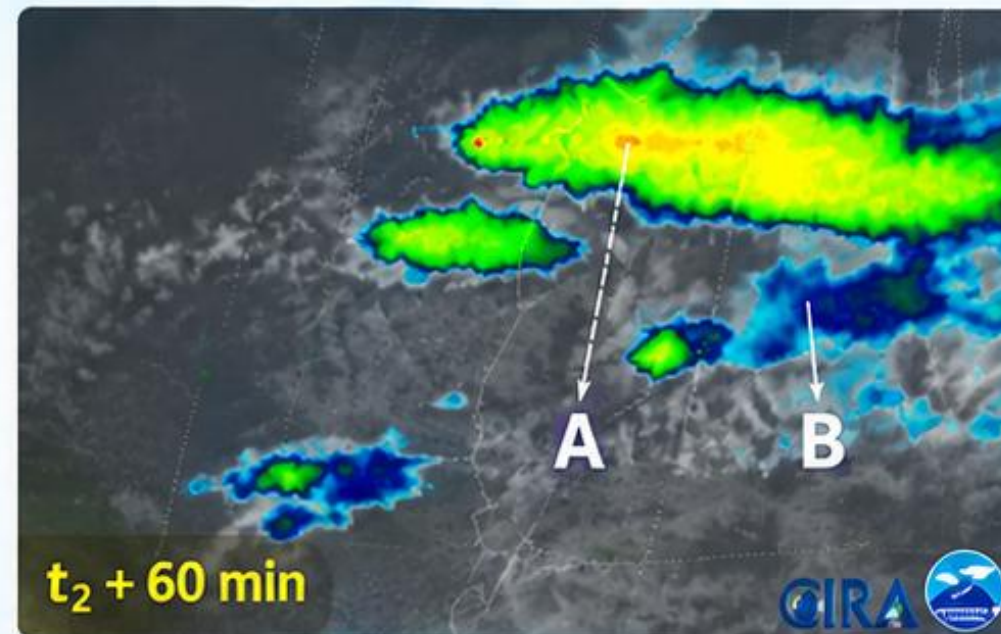
El **Lightning Jump (LI)** indica un cambio en la intensidad de la tormenta y puede anticipar su rápida evolución.



Evolución de la celda



Momento posterior: $t_2 + 60$ min



¿Qué celda debería durar más, A o B?



Claves para el análisis

- ✓ Observe la evolución de la **reflectividad** (intensidad).
- ✓ Identifique el posible **Lightning Jump (LI)**.
- ✓ Considere la interacción entre celdas y el ambiente circundante.
- ✓ **Estime** la duración probable de cada celda.



Objetivo

- Evaluar la persistencia y desarrollo de las celdas convectivas (A y B).
- Anticipar posibles cambios en la intensidad y en el comportamiento de la tormenta.



El **Lightning Jump (LI)** no solo indica un aumento de la intensidad, sino que también puede ser una señal de mayor persistencia y potencial de severidad.



El análisis temprano ayuda a mejorar la toma de decisiones en la aviación.



Integración Decisional: Conectando el SAT con A-CDM y ATFM



Beneficio Operativo Clave: Al anticipar la reducción de capacidad, las aeronaves retienen su salida en el origen con motores apagados. Esto evita patrones de espera en el aire, ahorrando toneladas de combustible y emisiones de CO₂.

Cronología de una Respuesta Exitosa

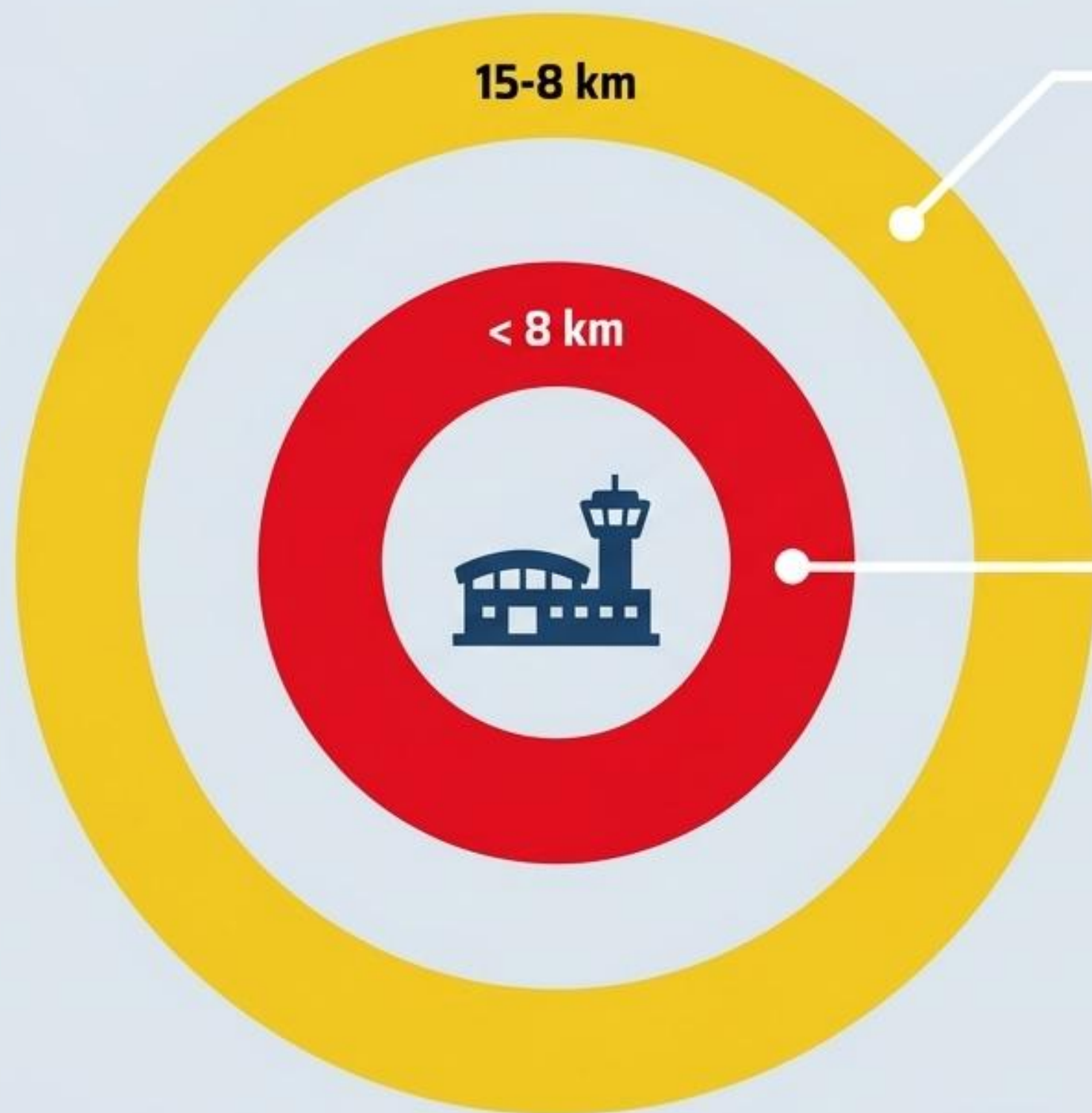
Coordinación, información y decisiones en tiempo real



UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA EFECTIVO EXIGE
QUE EL FLUJO OPERATIVO INTERINSTITUCIONAL
NO TENGA CUELLOS DE BOTELLA.



Operaciones Seguras en Tierra: Anillos de Protección en Rampa



Anillo Exterior - Fase de Advertencia (15 a 8 km)



Estado: Preaviso (Nivel Amarillo).

Acción: Aceleración de operaciones críticas. Alertas preventivas en pantallas de rampa basadas en detección de descargas nube-suelo (CG) o incrementos intra-nube (IC).

Anillo Interior - Fase de Peligro (< 8 km o ETA < 10 min)

Estado: Suspensión Operativa (Nivel Rojo). Activación de sirenas y estroboscópicas.

Protocolo de Parada Rápida:

1. Cese inmediato de reabastecimiento de combustible.
2. Desconexión de auriculares de cable (*headsets*) para prevenir electrocución por el fuselaje.
3. Resguardo total del personal de tierra en instalaciones protegidas.



Ejercicio Práctico (Parte 1): El Escenario Crítico



Datos del Escenario



Aeropuerto Hub operando al 100% de capacidad (45 movimientos/hora).



Amenaza: Línea de turbonada severa acercándose a 40 kt.



Impacto estimado (T-120 min): Lluvia >50 mm/h, 70% probabilidad de granizo, ráfagas asociadas de 55 kt.

Preguntas a la Mesa de Decisión



Meteorología: Según la matriz IBFW, ¿qué nivel de riesgo reporta?



Gestión ATM: ¿Se mantiene el plan de vuelo o se interviene el flujo?



Operaciones en Tierra: ¿Cuándo se activa la alarma en plataforma?

Simulación Táctica: El Reloj Operativo de la Tormenta

Entrenamiento y coordinación para una respuesta efectiva

*Mejores decisiones hoy,
menos riesgos mañana*



COORDINACIÓN + COMUNICACIÓN + PREPARACIÓN = RESPUESTA EFECTIVA



Conclusiones Finales

Sistemas de Alerta Temprana y Resiliencia Aeroportuaria

1  **Mirar al futuro, no solo al pasado**
El cambio climático exige incorporar escenarios futuros en la planificación de la infraestructura, los procedimientos y los SAT, complementando el conocimiento histórico con proyecciones de mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos.

2  **Conocer el riesgo de cada aeropuerto**
Cada aeródromo tiene un microclima, infraestructura, procedimientos y vulnerabilidades propias. Es clave identificar los fenómenos que pueden generar impactos operacionales y los umbrales críticos para actuar.

3  **Diseñar desde la decisión hacia atrás**
El SAT debe responder a la pregunta: ¿qué decisión necesitamos tomar, cuándo y qué información la habilita? Solo así se eligen los sensores, modelos y productos adecuados, evitando inversiones innecesarias.

4  **Integrar observación, modelización y nowcasting**
La combinación de múltiples fuentes de datos y tecnologías permite detectar, anticipar y entender mejor los fenómenos de evolución rápida, reduciendo el tiempo entre la alerta y la decisión.

5  **Información interoperable y digital**
La adopción de SWIM, IWXXM y arquitecturas digitales permite que la información meteorológica sea utilizada de forma oportuna, trazable y consistente por todos los actores del sistema.



6  **Alertas basadas en impactos**
La alerta debe traducir las variables meteorológicas en consecuencias concretas para pistas, aproximaciones, plataforma, infraestructura, personal y continuidad operacional. Cada nivel de riesgo debe tener acciones, responsables y criterios definidos.

7  **Integrar con A-CDM y ATFM**
El SAT debe ser una entrada clave para la gestión de capacidad aeroportuaria, permitiendo tomar decisiones anticipadas sobre regulación, desvíos y gestión de slots, antes de que el impacto afecte la operación.

8  **Resiliencia de la infraestructura**
El SAT debe incluir riesgos sobre pista, drenaje, energía, comunicaciones, combustible, accesos y plataforma, considerando tanto la operación aérea como la continuidad de servicios críticos.

9  **Proteger a las personas**
La seguridad del personal de plataforma, mantenimiento y demás trabajadores expuestos a fenómenos severos debe ser parte explícita del SAT, con procedimientos claros y escalonados.

10  **Aprender de cada evento**
Cada fenómeno y simulacro es una oportunidad para mejorar. Se requiere evaluar qué funcionó, qué falló y qué se debe ajustar, fortaleciendo la coordinación, los procedimientos y la capacitación continua.



La resiliencia aeroportuaria se construye con sinergia, coordinación y capacitación.

Personas + Tecnología + Infraestructura + Procedimientos + Gobernanza = Aeropuertos más seguros y preparados.



“La anticipación meteorológica nos proporciona tiempo. La coordinación transforma ese tiempo en capacidad de respuesta.”

Hoja de Ruta Regional 2026-2028: Hacia la Resiliencia Climática



Resiliencia
OACI 2027

Peldaño 1: Evolución Regulatoria

Armonización de los reglamentos nacionales (ej. LAR 203) con la Enmienda 81 del Anexo 3 y el PANS-MET (Doc 10157).

Peldaño 2: Salto Tecnológico

Migración definitiva de los silos AMHS hacia nodos interoperables SWIM/IWXXM para permitir el flujo de datos en malla.

Peldaño 3: Transformación Cultural

Entrenamiento transversal (MET, ATM, Operadores) y uso de las matrices IBFW para justificar la inversión estatal en obras de adaptación de infraestructura aeroportuaria.

¡Gracias por su compromiso con la seguridad operacional!

Contacto: n.santayana@inumet.gub.uy (Met. Néstor Santayana) | Proyecto OACI RLA/06/901

GRACIAS !!!

Sistemas de Alerta Temprana y Resiliencia Climática en la Aviación Civil

De la Gobernanza Global a la Resiliencia Operativa Aeroportuaria

Met. Néstor Santayana / Director AMCS, INUMET
Proyecto Regional OACI RLA/06/901

n.santayana@inumet.gub.uy | santayananestor@gmail.com



Referencias

Marco Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030) - UNDRR
https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf

System Wide Information Management (SWIM) – ICAO
<https://www.icao.int/APAC/swim>
Video: <https://www.youtube.com/watch?v=wXI9ep98Z8E>

Early Warnings for All (EW4All) – WMO
<https://wmo.int/activities/early-warnings-all/wmo-and-early-warnings-all-initiative>

WMO Integrated Global Observing System (WIGOS) – WMO
<https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/wmo-integrated-global-observing-system-wigos>

Impact-based Forecasting and Warning
<https://wmo.int/es/media/magazine-article/predicciones-y-avisos-que-tienen-en-cuenta-los-impactos-naciones-preparadas-para-el-tiempo>

Met. Néstor Santayana / Director AMCS, INUMET
Proyecto Regional OACI RLA/06/901
n.santayana@inumet.gub.uy | santayananestor@gmail.com





De la Gobernanza Climática a la Resiliencia Aeroportuaria

Implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) para la Navegación Aérea en la Región CAR/SAM.

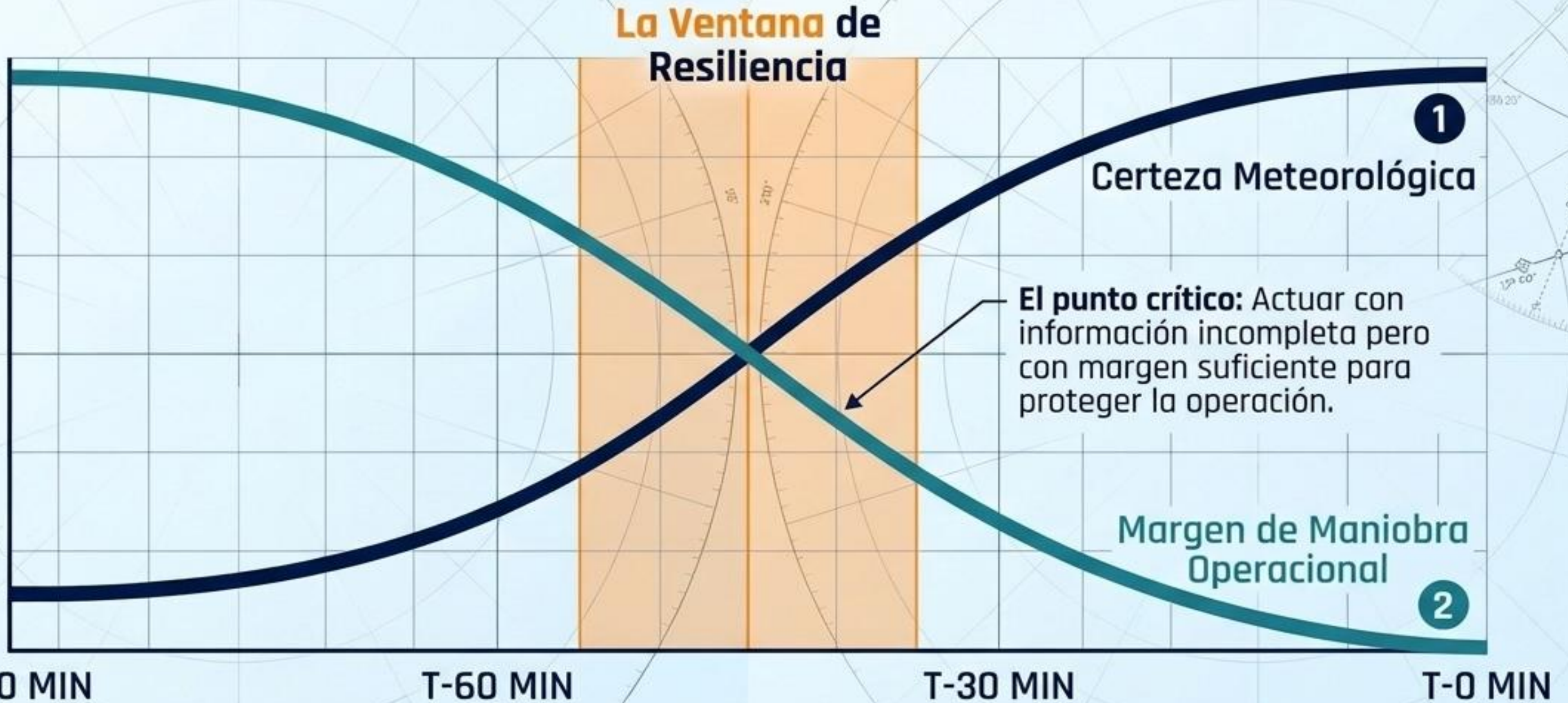
Met. Néstor Santayana | 21-25 Septiembre 2026 | UTP, Ciudad de Panamá

El Reloj Operativo de la Tormenta

[Simulacro Integrado de Resiliencia Aeroportuaria]

T – 120 MINUTOS

La Ventana de Anticipación



El objetivo no es adivinar el milímetro de lluvia, sino gestionar la vulnerabilidad del sistema.

La Matriz Operativa IBFW

		Severidad			
		Mínimo	Moderado	Alto	Severo
Probabilidad	Alta	AMARILLO Prevención Preparar medidas, aumentar coordinación	NARANJA Acción Reducir exposición/capaci- dad, activar medidas	ROJO Protección Parada, prioridad absoluta a la seguridad	ROJO Protección Parada, prioridad absoluta a la seguridad
	Media	VERDE Monitoreo Operación normal, preparación preventiva	AMARILLO Prevención Preparar medidas, aumentar coordinación	NARANJA Acción Reducir exposición/ capacidad, activar medidas	ROJO Protección Parada, prioridad absoluta a la seguridad
	Baja	VERDE Monitoreo Operación normal, preparación preventiva	VERDE Monitoreo Operación normal, preparación preventiva	AMARILLO Prevención Preparar medidas, aumentar coordinación	NARANJA Acción Reducir exposición/ capacidad, activar medidas

Dinámica del Ejercicio: 45 Minutos de Presión Real

Participantes



20 personas (4 equipos multidisciplinarios de 5).



Escenario Base



14:00 HL. Plena operación comercial. Demanda en aumento hacia la hora pico. Pronóstico de convección organizada.



El Facilitador

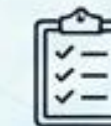


Actúa como Comité de Crisis. No recomienda acciones; inyecta información escalonada y controla el reloj.

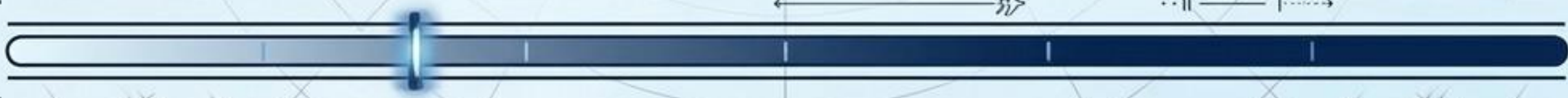


Entregables

Tablero IBFW, plano del aeropuerto, recursos, y una hoja de registro de 4 decisiones (T-120 a T-0).



T-120



T-0





ROLES DEL EQUIPO DE LA COMISIÓN DE CRISIS AEROPORTUARIA

Cada mesa estará conformada por 4 roles esenciales. Conozca sus responsabilidades.

AEROPUERTO INTERNACIONAL
DE TOCUMEN (MPTO)



ROL 1 GESTIÓN AEROPORTUARIA / A-CDM

COORDINACIÓN • CAPACIDAD • CONTINUIDAD

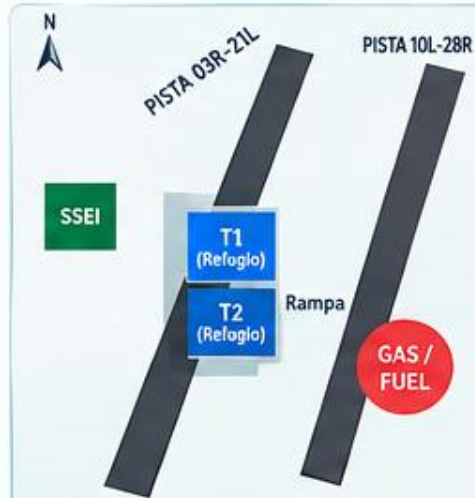
PRINCIPALES RESPONSABILIDADES

- Gestionar la operación aeroportuaria y la coordinación A-CDM.
- Evaluar el impacto en la capacidad del aeropuerto.
- Coordinar con ATFM, aerolíneas y servicios en tierra.
- Activar planes de contingencia y comunicar decisiones.



OBJETIVO EN EL EJERCICIO

Mantener la continuidad operacional y la eficiencia de la operación, priorizando la seguridad.



ROL 2 CONTROLADOR DE TRÁFICO AÉREO (ATC / ATFM)

SEGURIDAD • SEPARACIÓN • FLUJO

PRINCIPALES RESPONSABILIDADES

- Gestionar el flujo de llegadas y salidas.
- Mantener la separación y la seguridad operacional.
- Coordinar con ATFM y el A-CDM.
- Gestionar desvíos y re-secuenciación de vuelos.



OBJETIVO EN EL EJERCICIO

Garantizar la seguridad de la operación aérea y la continuidad del flujo, minimizando demoras y riesgos.



ROL 3 OPERADOR DE PLATAFORMA Y RAMPA

SEGURIDAD • EQUIPOS • PERSONAL

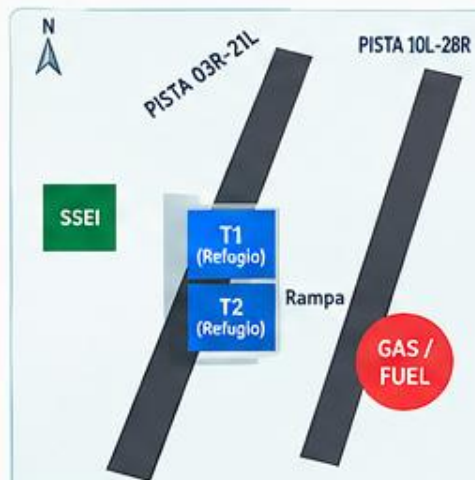
PRINCIPALES RESPONSABILIDADES

- Ejecutar SOPs de rampa y reabastecimiento.
- Asegurar aeronaves, equipos y FOD.
- Gestionar el personal en plataforma.
- Coordinar con mantenimiento y servicios en tierra.



OBJETIVO EN EL EJERCICIO

Proteger la vida del personal, los activos y las aeronaves, minimizando la exposición al riesgo.



ROL 4 AEROLÍNEA / DESPACHO / SMS

PLANIFICACIÓN • COMUNICACIÓN • SEGURIDAD OPERACIONAL

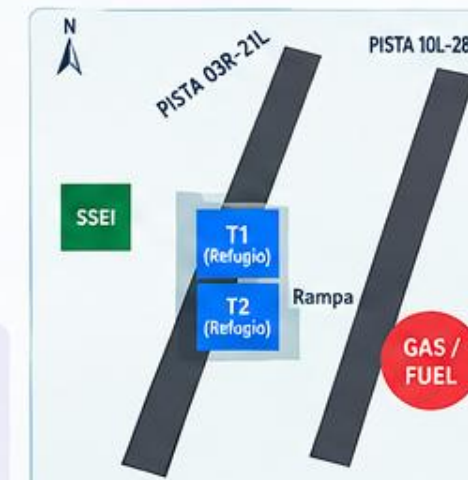
PRINCIPALES RESPONSABILIDADES

- Gestionar el despacho de vuelos y planes de vuelo.
- Evaluar el impacto en la programación.
- Coordinar con la aerolínea y el A-CDM.
- Velar por el cumplimiento del SMS y la seguridad.



OBJETIVO EN EL EJERCICIO

Mantener la seguridad operacional y la integridad de la operación, protegiendo a pasajeros, tripulación y aeronaves.



DIFERENTES ROLES • UN MISMO OBJETIVO • UN AEROPUERTO MÁS RESILIENTE





ESTADO NORMAL (Operación 100%)

OPERACIONES SEGURAS
Y SIN RESTRICCIONES

- ✓ Todas las operaciones en curso.
- ✓ Pistas, rampa y terminal operativas.
- ✓ Personal y equipos en funcionamiento.
- ✓ Sin alertas meteorológicas activas.
- ✓ Comunicación fluida con ATC / A-CDM.



OBJETIVO

Mantener la continuidad operacional y la seguridad.



PREPARACIÓN (Fase Preventiva)

MONITOREO ACTIVO
Y PREPARACIÓN DE RECURSOS

- ✓ Se detecta amenaza meteorológica.
- ✓ Aumenta la probabilidad de impacto.
- ✓ Se activan planes de contingencia.
- ✓ Se revisan equipos, refugios y comunicación.
- ✓ Se informa a las partes involucradas.



OBJETIVO

Anticipar y preparar la respuesta.



RESTRICCIÓN (Capacidad Reducida)

OPERACIÓN CONTROLADA
Y SEGUIMIENTO CONSTANTE

- ✓ Se reducen las operaciones (AAR / salidas).
- ✓ Se activan procedimientos específicos (GDP, etc.).
- ✓ Se suspenden actividades de alto riesgo.
- ✓ Se refuerza la comunicación y coordinación.
- ✓ Se mantiene personal esencial en posición.



OBJETIVO

Minimizar la exposición al riesgo y mantener la operación esencial.



PROTECCIÓN (Parada Total)

SEGURIDAD DE PERSONAS,
AERONAVES E INFRAESTRUCTURA

- ✓ Cierre temporal del aeródromo (Ground Stop).
- ✓ Desvíos a aeropuertos alternativos.
- ✓ Evacuación de rampa y refugios.
- ✓ Protección de aeronaves e instalaciones.
- ✓ Activación de servicios de emergencia.



OBJETIVO

Proteger vidas, activos y garantizar la recuperación segura.





Aeropuerto Internacional de Tocumen (MPTO)

Plano Operativo y Matriz de Proximidad SAT





Entorno Regional y Anillos SAT

- **Anillo 3 km (Rojo):** área central del aeropuerto (MPTO).
- **Anillo 8 km (Naranja):** entorno inmediato.
- **Anillo 15 km (Amarillo):** área de mayor alcance.

 Los anillos representan la extensión del monitoreo SAT para la detección y seguimiento de fenómenos.



Infraestructura y Refugios

- **Pistas:** 03R / 21L y 03L / 21R.
- **Edificio de refugio:**
 - T1 (Refugio)
 - T2 (Refugio)
- **Rampas de estacionamiento de aeronaves** (lado este).
- **Instalación de GAS / FUEL** (al este de las pistas).





Distribución en el Aeropuerto





EL PLANO Y LOS ANILLOS DE PROXIMIDAD SON REFERENCIALES Y SE UTILIZAN PARA LA COORDINACIÓN OPERATIVA Y LA TOMA DE DECISIONES EN SITUACIONES DE RIESGO METEOROLÓGICO.



INYECCIÓN T-120

15:00 LT (2 horas para el impacto)



AMENAZA METEOROLÓGICA

- **Radar:** Celda convectiva organizada a 35–40 NM al Noreste de MPTO.
- **MESH:** Potencial de granizo significativo (>2 cm) en núcleo.
- **Tendencia:** Intensificación rápida. Movimiento directo al Área Terminal a 18 kt.



PREGUNTA DEL COMITÉ DE CRISIS

¿Qué medidas operativas adoptan ahora, cuando la tormenta aún no genera ningún impacto visible sobre el aeropuerto?



Tiempo máximo para decidir: **3 minutos.**



NO SE PROPORCIONA INFORMACIÓN ADICIONAL HASTA REGISTRAR LA DECISIÓN EN LA HOJA DE DECISIÓN.





INYECCIÓN T-60

16:00 LT (1 hora para el impacto)



AMENAZA Y CONFLICTO OPERATIVO

- **Rayos:** Actividad eléctrica detectada dentro del Anillo de 15 km (Anillo Amarillo).
- **Evolución MET:** Célula severa a 18 NM. Probabilidad de impacto directo: 85%.
- **Tráfico:** Hora Pico Máxima (8 llegadas en secuencia, 10 en embarque/combustible).



PREGUNTA DEL COMITÉ DE CRISIS

¿Reducen la capacidad para proteger rampa y espacio aéreo, o mantienen la continuidad hasta que el fenómeno toque el aeropuerto? ¿Quién asume la decisión?



Tiempo máximo para decidir: 3 minutos.



REGISTREN EL NIVEL IBFW Y LA CÁMBIOS OPERATIVOS EN LA HOJA DE DECISIÓN.





INYECCIÓN T-30

16:30 LT (30 minutos para el impacto)



INCERTIDUMBRE Y CAMBIO DE ESCENARIO

- **Alerta SAT:** Tormenta ingresa al Anillo de 8 km (Anillo Naranja).
- **Incertidumbre:** Desviación imprevista de 20° al Sur con desaceleración.
- **Campo:** Actividad eléctrica a <8 km. Combustible solicita instrucción. 4 pushbacks.



Anillo Naranja
(8 km)



PREGUNTA DEL COMITÉ DE CRISIS

El pronóstico original cambia. ¿Mantienen el plan de T-60 o adaptan la estrategia bajo incertidumbre? ¿Se suspende la carga de combustible y la rampa exterior?



Tiempo máximo para decidir: 3 minutos.



AJUSTEN LA FICHA DE ESTADO EN EL MAPA SEGÚN LA NUEVA DECISIÓN.





INYECCIÓN T-0

17:00 LT (Impacto en el campo)



IMPACTO SEVERO Y PRIORIZACIÓN

- **Ubicación:** Núcleo severo sobre el Anillo de 3 km (Anillo Rojo).
- **Fenómenos:** Microburst sobre Pista 03R (Windshear 35 kt, ráfagas 52 kt, vis. 800 m).
- **Emergencia:** Avión a 2 NM en aproximación final. Personal de rampa expuesto.



PREGUNTA DEL COMITÉ DE CRISIS

Ordenen de 1 a 5 las prioridades del sistema:

- ☐ Continuidad ☐ Vida Humana ☐ Recuperación ☐ Equipos ☐ Exposición

¿Qué instrucción exacta dan al tráfico en aproximación?



Tiempo máximo para decidir: 3 minutos.



ENTREGAR HOJA DE DECISIÓN AL EVALUADOR AL FINALIZAR.



Simulación Táctica: El Reloj Operativo de la Tormenta

Entrenamiento y coordinación para una respuesta efectiva

*Mejores decisiones hoy,
menos riesgos mañana*



COORDINACIÓN + COMUNICACIÓN + PREPARACIÓN = RESPUESTA EFECTIVA





¿Qué hizo cada grupo en la simulación?

(T-120, T-60, T-30, T-0)

El Debriefing (7 Minutos Críticos)

¿Qué aprendió el sistema aeroportuario?

Observables Clave

- ☒ Dependencia de un único dato o sistema.
- ☒ Claridad en la autoridad para la toma de decisiones.
- ☒ Brechas en los SOP actuales.

FACILITATOR LOG QUOTE

El objetivo era demostrar que el sistema puede tomar buenas decisiones con información incompleta.



La Pregunta de Mejora Continua

**Si esta situación ocurriera
mañana en nuestro aeropuerto,
¿qué cambiaríamos hoy para
ser más resilientes?**

La resiliencia no es predecir el futuro; es estar preparado para gestionarlo.
Metodología IBFW.

GRACIAS !!!

Sistemas de Alerta Temprana y Resiliencia Climática en la Aviación Civil

De la Gobernanza Global a la Resiliencia Operativa Aeroportuaria

Met. Néstor Santayana / Director AMCS, INUMET
Proyecto Regional OACI RLA/06/901

n.santayana@inumet.gub.uy | santayananestor@gmail.com

