



TALLER ICAO LIMA · CIUDAD DE PANAMÁ · 21-25 SEPTIEMBRE 2026

*Efectos del cambio climático en la infraestructura
aeroportuaria y promoción de la resiliencia*

Infraestructura aeroportuaria y cambio climático:

Impacto en los pavimentos aeroportuarios



Agenda de la presentación

- 1. Apertura — cuando el aeropuerto deja de funcionar
- 2. Cambio climático y sistema aeroportuario
- 3. El aeropuerto como parte de un sistema
- 4. Caso de estudio: Porto Alegre 2024 (I) — la inundación
- 5. Caso de estudio: Porto Alegre 2024 (II) — la respuesta
- 6. Mantener la operación durante una crisis
- 7. Pavimentos: donde el clima encuentra la ingeniería
- 8. Las áreas pavimentadas no trabajan solas
- 9. Desempeño funcional vs. estructural
- 10. Más allá de los pavimentos
- 11. El aeropuerto como infraestructura crítica
- 12. De la respuesta a la resiliencia
- 13. Lecciones aprendidas
- 14. De la resiliencia aeroportuaria a la resiliencia social
- 15. Lo que hace la ICAO Montreal (APEG / Doc 9157)

Duración prevista: 90 minutos (1 h 30 min)

PARTE 1

De los daños al pavimento a la resiliencia social

¿Qué ocurre cuando un aeropuerto se vuelve inutilizable?



Dejo la pregunta en el aire...

La respuesta irá apareciendo a lo largo de toda la presentación.

1

El problema no es solo reparar la pista

2

Las aeronaves deben seguir operando

3

Los pasajeros deben ser transportados

4

Las cargas deben seguir circulando

5

Puede haber personas que rescatar

6

Otro aeropuerto puede tener que asumir la operación

7

La infraestructura de emergencia debe movilizarse

8

Distintos niveles de gobierno deben actuar a la vez



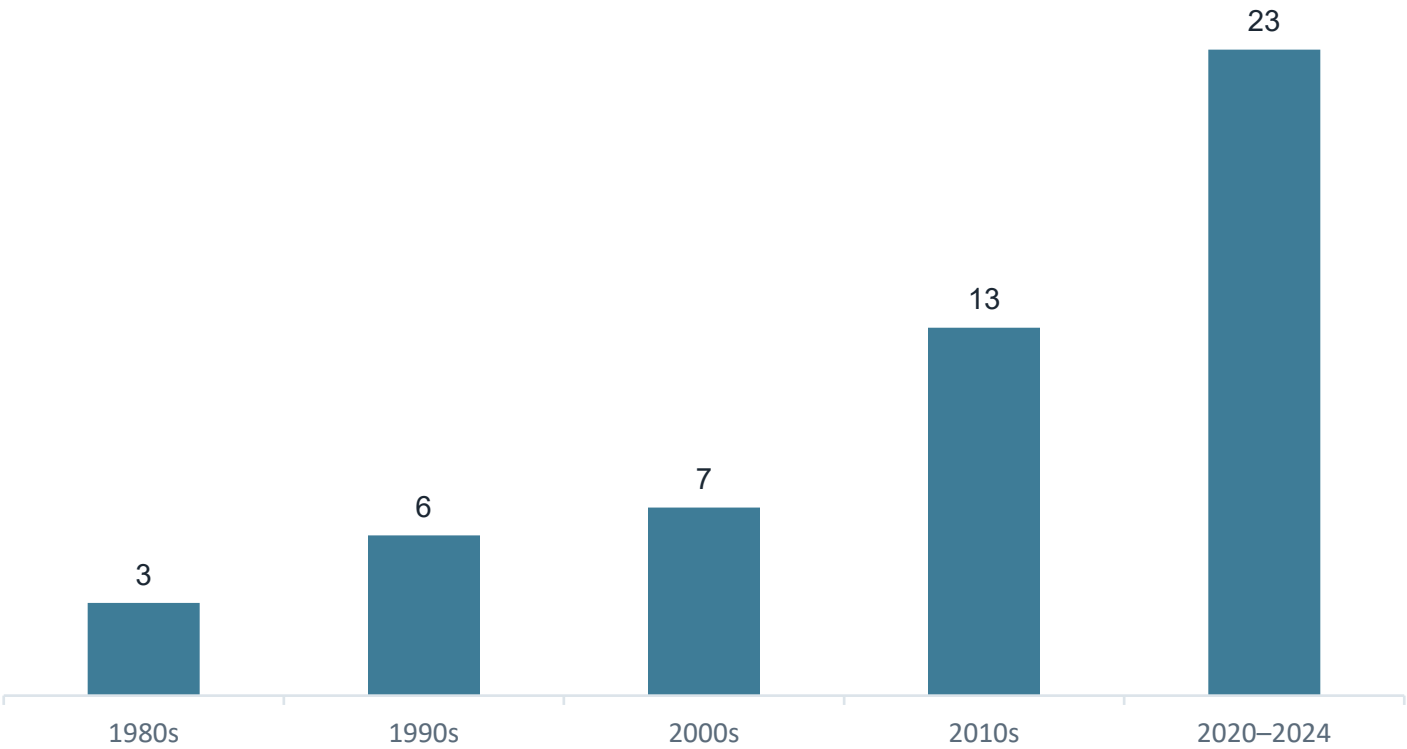
¿Qué significa el cambio climático para un aeropuerto?

Evento		Posibles consecuencias aeroportuarias
	Temperaturas extremas	Pavimento, equipos, aeronaves, trabajadores
	Lluvias intensas	Interrupción de operaciones, drenaje, erosión, acumulación de agua, accesos
	Inundaciones	Pista, plataforma, terminal, sistemas eléctricos, funcionamiento de bombas
	Sequías	Disponibilidad de agua, incendios, condiciones del suelo
	Vientos / tormentas	Estructuras, ayudas visuales, equipos, seguridad laboral
	Incendios / humo	Visibilidad, calidad del aire, operación
	Deslizamientos	Accesos, infraestructura, seguridad
	Aumento del nivel del mar	Aeropuertos costeros — amenaza creciente durante toda la vida útil



La tendencia es clara: los eventos van en aumento

Desastres climáticos con daños $\geq$ USD 1.000 M en EE. UU.
Promedio de eventos por año, por década



Lo que muestra el dato

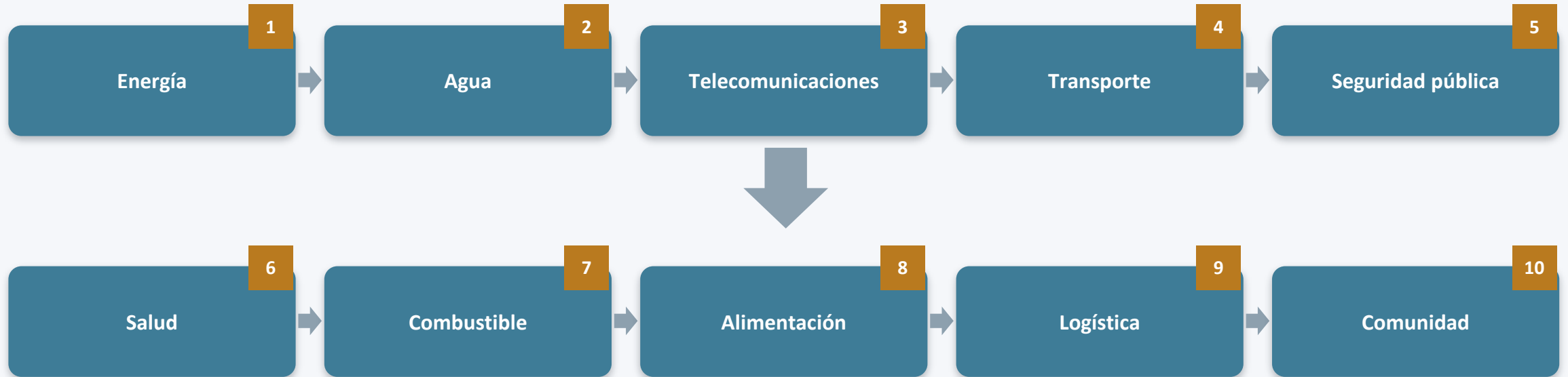
- ◆ 1980–1999: ~4 eventos/año en promedio
- ◆ 2020–2024: 23 eventos/año en promedio
- ◆ Aumento de más del 150% frente al promedio histórico (1980–2024)
- ◆ 2024 registró el mayor número de eventos de toda la serie
- ◆ La aviación no queda al margen de esta tendencia

Fuente: NOAA NCEI, Billion-Dollar Weather and Climate Disasters (1980–2024).
NOAA = National Oceanic and Atmospheric Administration / NCEI = National Centers for Environmental Information



PARTE 2

Un aeropuerto no es una infraestructura aislada



Idea clave

- ✦ Podemos tener un aeropuerto físicamente intacto pero operacionalmente indisponible: basta con que falte energía, agua, o que una vía de acceso esté cortada.



PARTE 2

La vulnerabilidad depende del perfil geográfico



Aeropuertos costeros

- ◆ Aumento del nivel del mar
- ◆ Marejadas ciclónicas y erosión costera
- ◆ Intrusión salina en suelos y aguas subterráneas



Zonas áridas / semiáridas

- ◆ Calor extremo prolongado
- ◆ Sequías y escasez de agua para operación
- ◆ Suelos expansivos y fisuración



Zonas tropicales / monzónicas

- ◆ Lluvias extremas concentradas en pocos meses
- ◆ Alto riesgo de inundación y saturación del suelo
- ◆ Humedad constante, deterioro acelerado de materiales



Montaña / altiplano

- ◆ Deslizamientos y movimientos de suelo
- ◆ Alta variabilidad térmica diaria
- ◆ Deshielo y variaciones del permafrost en algunas regiones



El sistema alrededor del aeropuerto





PARTE 3

Preguntas que todo operador debería poder responder

- ◆ ¿Cuáles son nuestras dependencias externas críticas (energía, agua, telecomunicaciones, accesos)?
- ◆ ¿Existen acuerdos formales de cooperación con esos proveedores y con otras autoridades?
- ◆ ¿Qué nivel de redundancia tenemos hoy para energía y agua?
- ◆ ¿Conocemos el tiempo de recuperación esperado de cada proveedor externo ante una falla?
- ◆ ¿Sabemos quién decide, y cómo se coordinan las acciones, cuando varias instituciones deben actuar al mismo tiempo?

PARTE 3

La resiliencia aeroportuaria
es también
una resiliencia social.



PARTE 4

Caso de estudio: Porto Alegre, Brasil — 2024

Cuando la teoría se convirtió en realidad

La pista, vista desde el aire



Aeroporto Internacional Salgado Filho: la infraestructura quedó aislada en medio de una superficie continua de inundación, sin distinción posible entre el río y el terreno aeroportuario.

Fotografía aérea: cabecera de pista del Aeroporto Internacional Salgado Filho durante la inundación de mayo de 2024.



La inundación del aeropuerto

- ◆ Evento de precipitación extrema en mayo de 2024
- ◆ Inundación de gran parte de Porto Alegre y del estado de Rio Grande do Sul
- ◆ El Aeropuerto Internacional Salgado Filho quedó directamente afectado
- ◆ Interrupción total de las operaciones regulares



La importancia de anticiparse

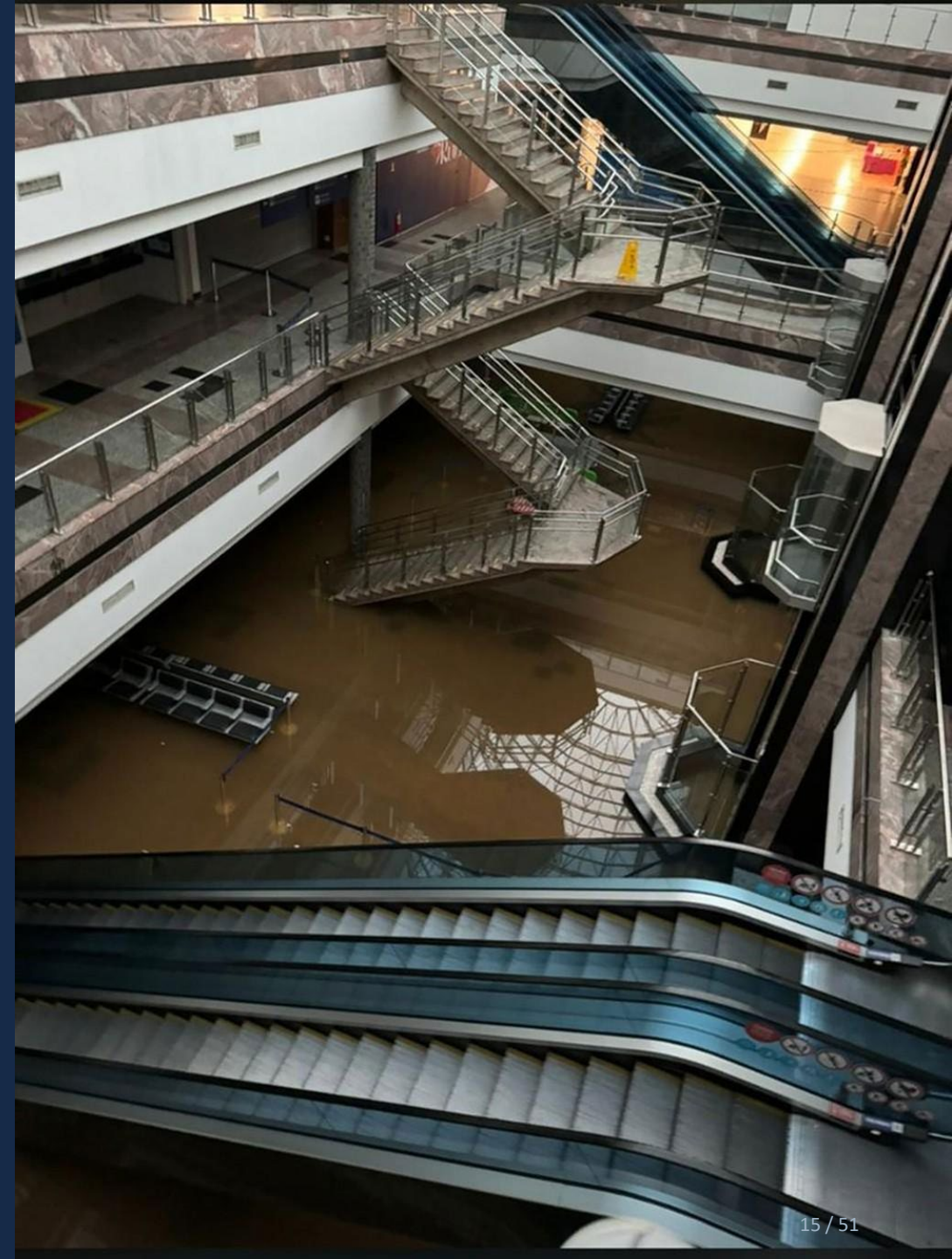


Lo que muestran las fotos

- ✦ El acceso al aeropuerto quedó comprometido
- ✦ Varias aeronaves no tuvieron tiempo suficiente para despegar y quedaron varadas
- ✦ La meteorología es una herramienta clave de anticipación
- ✦ Los Estados necesitan capacidad de previsión meteorológica moderna y precisa, que permita tomar medidas oportunas

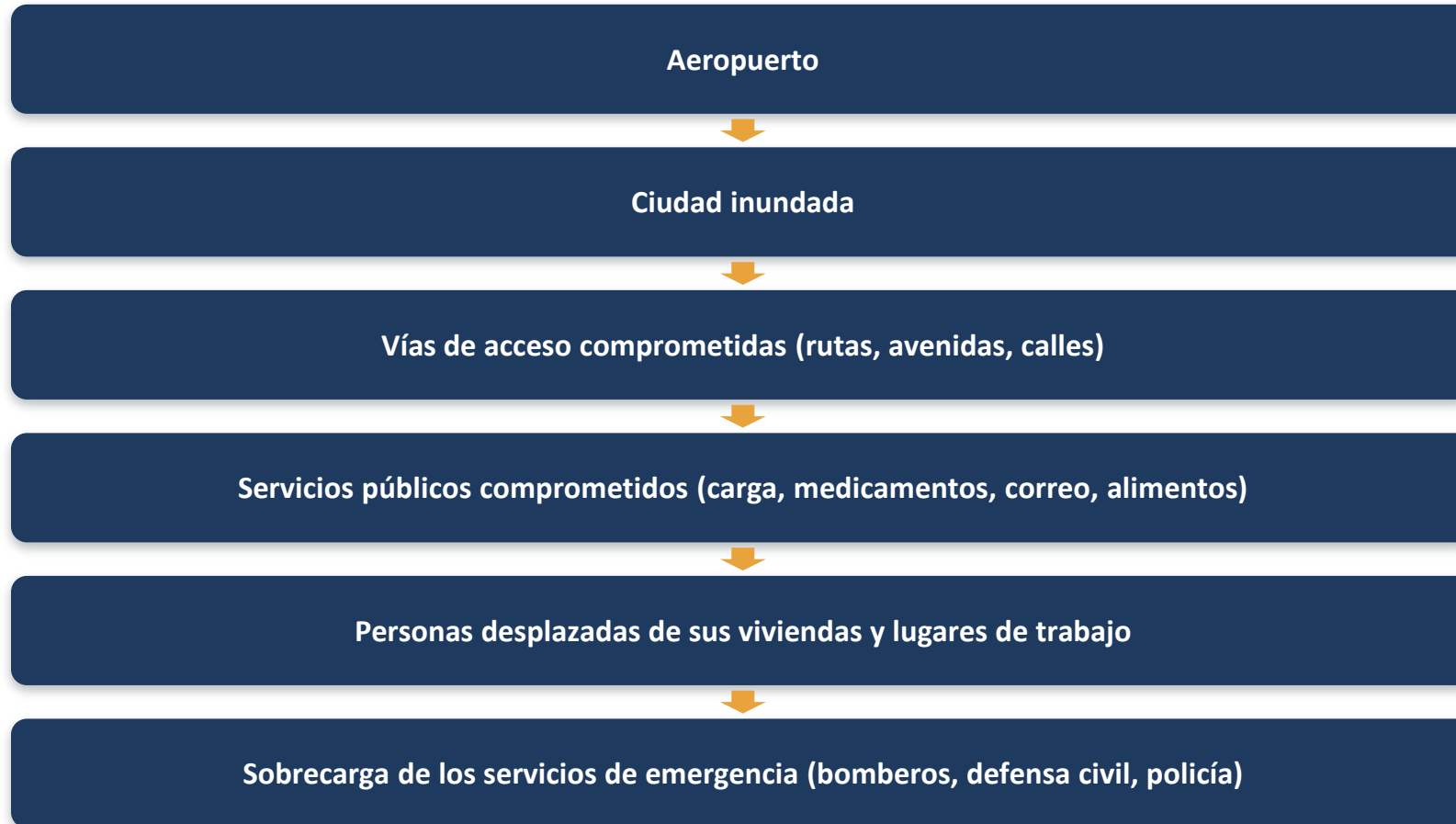
El impacto también llegó a las terminales

- ✦ Escaleras mecánicas inundadas
- ✦ Mobiliario arrastrado por el agua
- ✦ Sistemas eléctricos comprometidos
- ✦ Sistemas electrónicos y mecánicos inundados





El aeropuerto no es el único problema





Una respuesta institucional coordinada





La continuidad operacional no depende del mismo aeropuerto



Lo que ocurrió

- ✦ Reubicación temporal de las operaciones
- ✦ Traslado a la Base Aérea de Canoas
- ✦ Se mantuvo así parte de la conectividad aérea de la región mientras se recuperaba el aeropuerto afectado



Preguntas de análisis de riesgo

- ✦ ¿La resistencia de la pista de despegue y aterrizaje es compatible?
- ✦ ¿El largo y ancho de la pista son compatibles?
- ✦ ¿Qué tipo de operación es posible realizar allí?
- ✦ La alternativa debe permitir operar dentro de niveles aceptables de seguridad operacional



Lo que Porto Alegre enseñó sobre los pavimentos

Después de aproximadamente 30 días bajo el agua, el comportamiento de cada tipo de pavimento fue radicalmente distinto — una evidencia empírica de enorme valor para la ingeniería aeroportuaria.



Pavimentos flexibles

- ✦ El daño fue inevitable tras la exposición prolongada al agua
- ✦ Pérdida de soporte y desintegración de las capas asfálticas saturadas
- ✦ Prácticamente toda la infraestructura con pavimento flexible tuvo que ser reconstruida por completo
- ✦ Plazos y costos de reconstrucción significativamente mayores

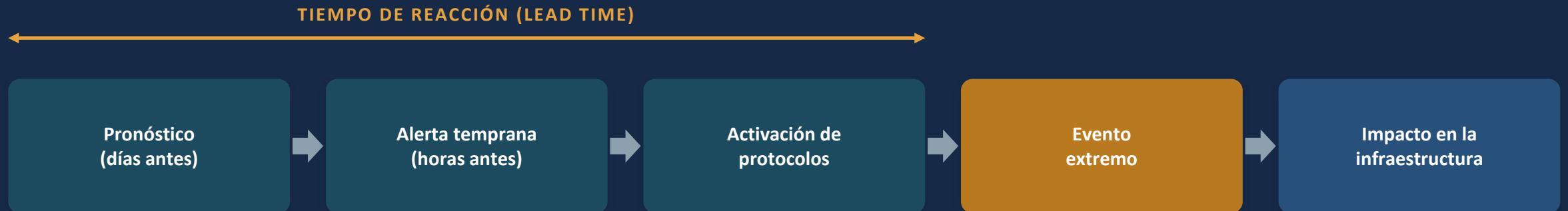


Pavimentos rígidos

- ✦ Se mostraron mucho más resilientes frente a la inundación prolongada
- ✦ Los daños fueron puntuales y localizados, no generalizados
- ✦ Se originaron por problemas en la base del pavimento, no en la losa de hormigón en sí
- ✦ Rehabilitación más rápida y económica

Anticipar antes que reaccionar

Ningún pavimento, por bien diseñado que esté, puede absorber un evento extremo sin aviso previo. La meteorología no evita el evento — pero determina cuánto tiempo de reacción tiene el aeropuerto para proteger su infraestructura y a las personas.



Cada hora adicional de aviso es una hora para proteger equipos, reubicar aeronaves, activar el plan de contingencia y decidir con tiempo si es necesario suspender operaciones.



¿En qué deberían invertir los Estados?



Radares meteorológicos

- ◆ Cobertura de alta resolución en el entorno aeroportuario
- ◆ Detección temprana de tormentas convectivas y lluvias intensas



Modelos numéricos (Numerical Weather Prediction)

- ◆ Mayor resolución espacial y temporal
- ◆ Cómputo de alto desempeño (HPC) para reducir el tiempo de procesamiento
- ◆ Modelos de conjunto (ensemble) para reducir la incertidumbre del pronóstico



Sistemas de alerta temprana

- ◆ Integrados a los protocolos operacionales del aeropuerto
- ◆ Umbrales claros y automáticos para activar contingencias



Cooperación e intercambio de datos

- ◆ Articulación con los servicios meteorológicos nacionales y la OMM
- ◆ Pronósticos estacionales para anticipar sequías prolongadas

Invertir en previsión meteorológica es, en términos comparativos, mucho más económico que reconstruir infraestructura aeroportuaria después del evento.



PARTE 6

La operación depende de mucho más que la pista



Personas



Electricidad



Comunicaciones



Combustible



Agua



Alimentos



Saneamiento básico



Seguridad (security)



Sistema de transporte



Respuesta a emergencias



Apoyo médico



Infraestructura aeronáutica



PARTE 6

Los riesgos invisibles después de una inundación

- ✦ Agua contaminada
- ✦ Alcantarillado
- ✦ Agentes biológicos
- ✦ Enfermedades
- ✦ Alimentos comprometidos
- ✦ Animales e insectos
- ✦ Condiciones sanitarias deficientes
- ✦ Agua potable
- ✦ Manejo de residuos

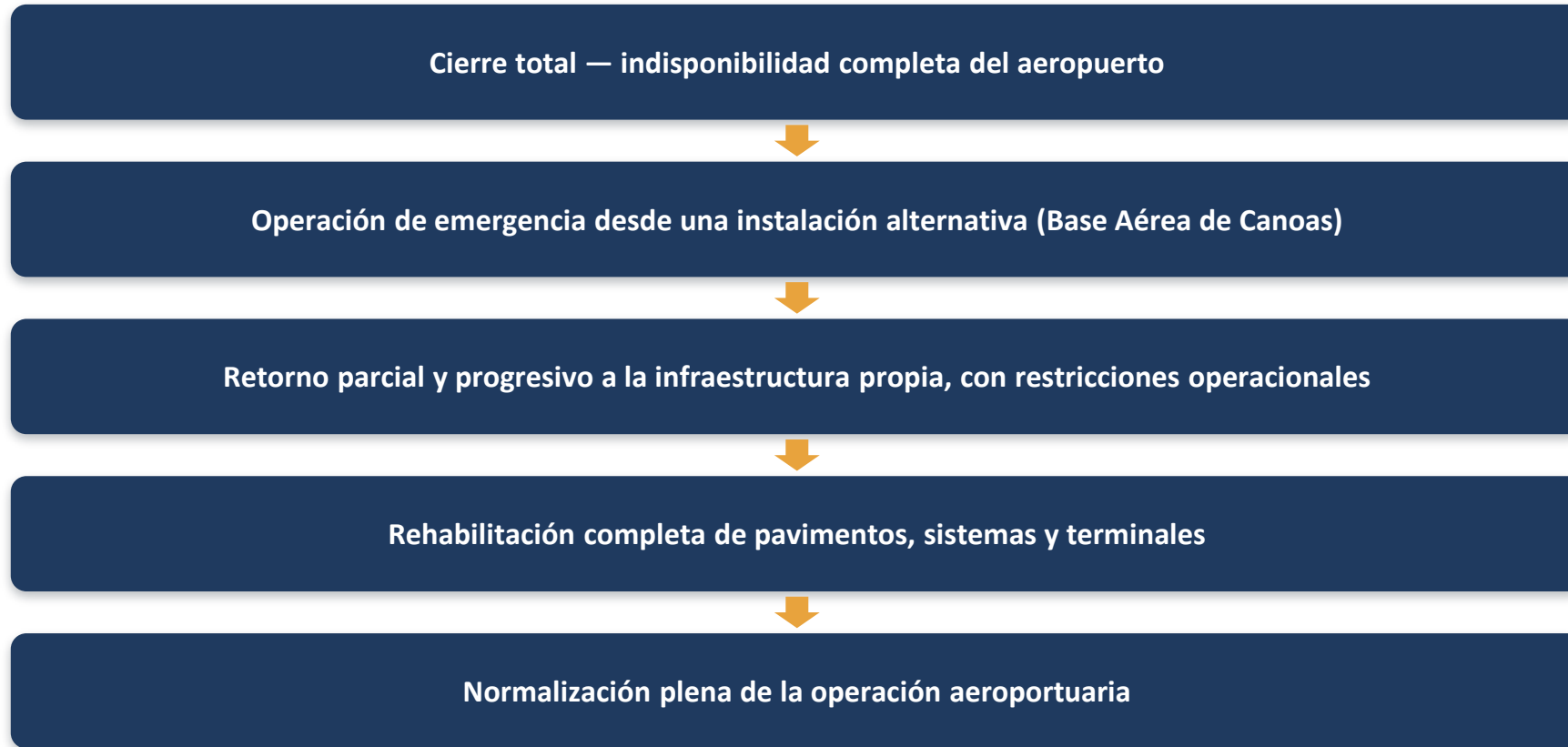
La emergencia se amplía

- ✦ La emergencia aeroportuaria se convierte también en una emergencia de salud pública
- ✦ La respuesta debe incorporar a las autoridades de salud pública
- ✦ Debe considerar prevención de enfermedades, manejo de residuos, agua potable y condiciones adecuadas de alimentación e higiene



PARTE 6

La recuperación no ocurre de un día para otro



La duración de cada fase depende de la magnitud del evento, de la disponibilidad de recursos y de la planificación previa — no es un proceso lineal ni automático.

PARTE 7

Pavimentos: donde el clima encuentra la ingeniería

Los pavimentos están dentro del sistema — no fuera de él



El pavimento dentro del sistema



Sistema → aeropuerto → infraestructura → pavimento: los eventos extremos que afectan al sistema terminan expresándose, en última instancia, sobre el pavimento.



Impactos de los eventos extremos en el pavimento



Calor excesivo

- ♦ Reducción de la rigidez de pavimentos flexibles
- ♦ Ahuellamiento y exudación
- ♦ Estrés térmico, envejecimiento acelerado
- ♦ Expansión térmica del hormigón, deterioro de juntas



Lluvias extremas

- ♦ Pérdida de soporte, saturación del suelo (RESA)
- ♦ Erosión, sobrecarga del sistema de drenaje
- ♦ Pérdida de adherencia ligante–agregado
- ♦ Asentamientos diferenciales



Inundación prolongada

- ♦ Saturación prolongada del suelo, erosión
- ♦ Contaminación por combustible: el queroseno y el aceite se mezclan con el agua y penetran por los poros del pavimento
- ♦ Pérdida de desempeño de base y subbase
- ♦ Daños eléctricos, FOD / escombros

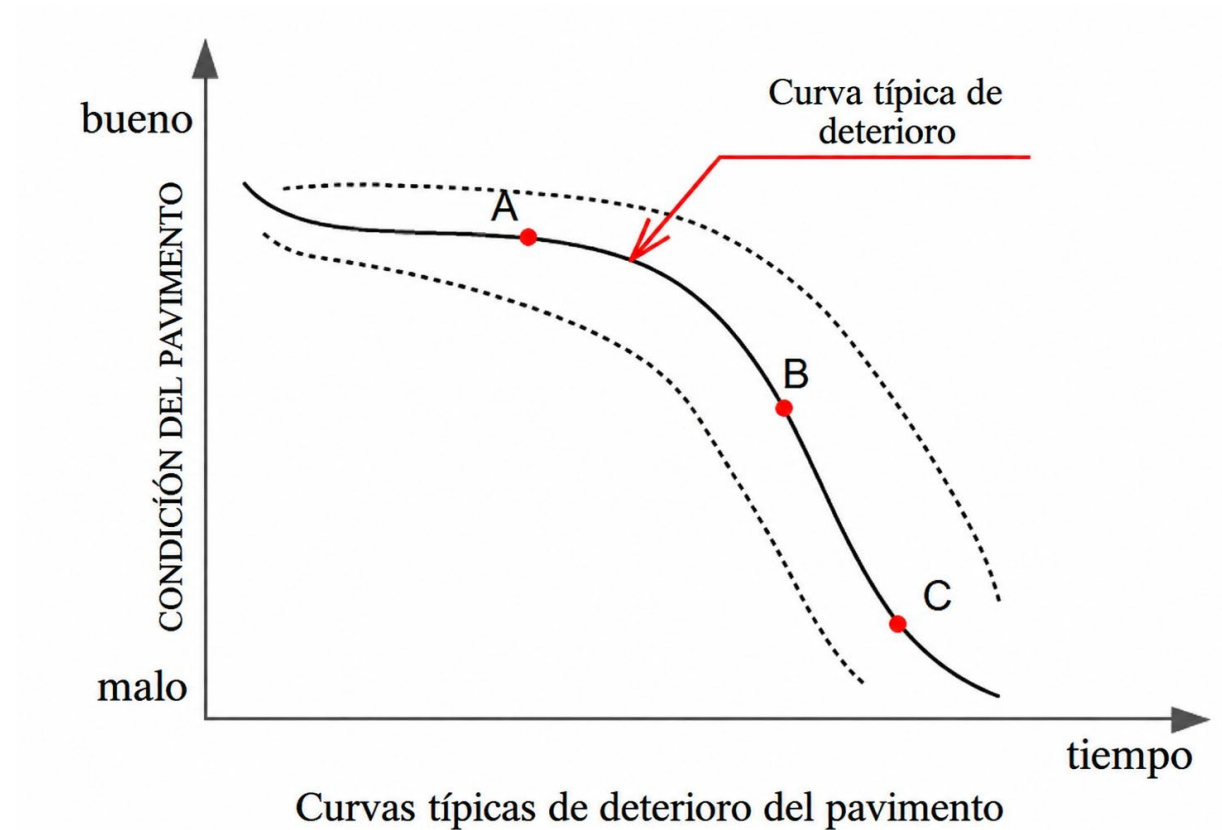


Sequías

- ♦ Retracción del suelo, movimientos diferenciales
- ♦ Fisuración de la infraestructura pavimentada
- ♦ Riesgo de incendio forestal
- ♦ Menor disponibilidad de agua



La curva de deterioro del pavimento



Los puntos A, B y C ilustran cómo se acelera el deterioro con el tiempo: cuanto más se posterga la intervención, mayor es el costo y el alcance de la rehabilitación necesaria.

En el caso de pavimentos que hayan sufrido inundaciones o hayan estado expuestos a temperaturas elevadas durante algunos meses, ¿cómo será el comportamiento de estas estructuras adelante?



PARTE 7 · PAVIMENTOS

Cuando el calor daña la pista: un caso real

- ✦ Olas de calor extremo ya han obligado a interrumpir operaciones y reparar de urgencia pistas y calles de rodaje en aeropuertos europeos
- ✦ El pavimento puede ablandarse y deformarse en horas, no en años
- ✦ La reparación de emergencia compite con la operación normal del aeropuerto por el mismo espacio y el mismo tiempo



Reparación de pavimento tras daños por calor extremo — Aeropuerto de Heathrow, Londres (ola de calor de julio de 2022)



Calor extremo: más allá del pavimento



Equipos en riesgo

- ◆ Equipos electrónicos pueden exigir mayor refrigeración
- ◆ Equipos de tierra pueden tener el desempeño reducido y requerir cuidados adicionales
- ◆ Las baterías pueden degradarse de forma acelerada



Personas en riesgo

- ◆ Se puede reducir la capacidad de trabajo de los trabajadores
- ◆ Aumenta el riesgo de estrés térmico
- ◆ Se requieren pausas e hidratación como parte del protocolo operativo

El envejecimiento acelerado también es un problema económico: afecta a los proyectos, al mantenimiento, a la vida útil y a la planificación del operador aeroportuario — especialmente en aeropuertos concesionados o privados, que necesitan planificar y obtener rentabilidad durante la operación del negocio.



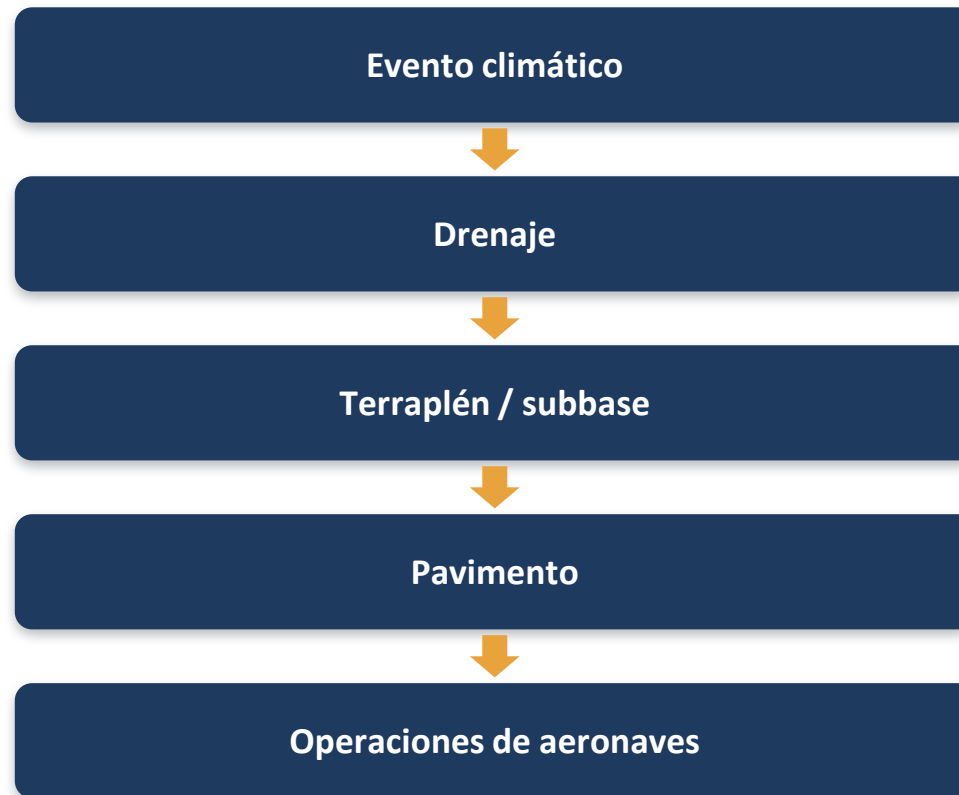
Drenaje: el elemento que decide todo

La capacidad de drenaje es un elemento fundamental para la resiliencia del pavimento. Un pavimento correctamente dimensionado desde el punto de vista estructural puede presentar problemas importantes si el sistema de drenaje no logra manejar las precipitaciones de un evento extremo.

No basta con diseñar pavimentos más resistentes; también debemos garantizar que el agua pueda ser adecuadamente conducida y evacuada.



El pavimento no trabaja solo



Un problema en el pavimento puede ser, en realidad, un problema de drenaje, un problema geotécnico o un problema de adaptación climática.



Tres capas de desempeño

Funcional

- ◆ Irregularidad
- ◆ Fricción
- ◆ Macrotextura
- ◆ Desgaste superficial
- ◆ FOD

Estructural

- ◆ Capacidad estructural (PCN / PCR)
- ◆ Capacidad de carga de aeronaves
- ◆ Fatiga
- ◆ Deformaciones

Operacional

- ◆ Cierre de pista
- ◆ Reducción de MTOW
- ◆ Restricciones diversas
- ◆ Desvíos a otros aeropuertos
- ◆ Emergencias operacionales

Un aeródromo puede tener un pavimento estructuralmente aceptable, pero operacionalmente indisponible. Lo inverso también es verdadero.



PARTE 9

PCN / PCR: el lenguaje común de la capacidad estructural



PCN — *Pavement Classification Number*

- ✦ Expresa la capacidad estructural del pavimento reportada por el aeropuerto
- ✦ Se compara con el ACN (*Aircraft Classification Number*) de cada aeronave
- ✦ Si $ACN \leq PCN$, la operación es compatible sin restricciones



PCR — *Pavement Classification Rating* (evaluación actualizada)

- ✦ Refleja la condición estructural real del pavimento en un momento dado
- ✦ Los eventos climáticos extremos pueden reducirla de forma abrupta
- ✦ Una reducción de PCR puede implicar restricciones de peso, de tipo de aeronave o de frecuencia



Ampliando otra vez la mirada



Infraestructura aeroportuaria

- ✦ Pista de despegue y aterrizaje
- ✦ Calles de rodaje
- ✦ Plataformas
- ✦ Terminales
- ✦ Ayudas a la navegación aérea
- ✦ Balizamiento y señalización
- ✦ Sistemas eléctricos
- ✦ Drenaje
- ✦ Abastecimiento de combustible
- ✦ Comunicaciones
- ✦ Vías de acceso al aeropuerto



Más allá del aeropuerto

- ✦ Carreteras y puentes
- ✦ Transporte público
- ✦ Red eléctrica
- ✦ Abastecimiento de agua
- ✦ Telecomunicaciones
- ✦ Hospitales
- ✦ Hoteles
- ✦ Abastecimiento de alimentos

Un aeropuerto no puede ser resiliente si la infraestructura que lo rodea no lo es.



PARTE 10

Checklist de resiliencia más allá del pavimento

☐

¿Se identificaron los tramos de acceso vial más vulnerables a inundación o deslizamiento?

☐

¿Existen rutas alternativas de acceso conocidas y comunicadas con anticipación?

☐

¿Se coordinó con la red eléctrica y de agua local ante escenarios de interrupción prolongada?

☐

¿Los hospitales y servicios de salud de la región están integrados en el plan de contingencia del aeropuerto?

☐

¿Se evaluó la capacidad de la cadena logística de combustible y alimentos ante un corte de accesos?



Cuatro roles simultáneos



Infraestructura de transporte

Transporte de pasajeros y de carga



Infraestructura económica

Sostiene actividad, empleo y comercio regional



Infraestructura de emergencia

Punto de apoyo ante desastres y crisis



Infraestructura crítica

Cuando pista, calles de rodaje o plataformas no están disponibles



PARTE 11

En un desastre, el aeropuerto puede convertirse en:



Punto de evacuación



Entrada de ayuda humanitaria



Transporte de equipos de rescate



Transporte de medicamentos



Logística de alimentos



Base de operaciones gubernamentales



Reconocer al aeropuerto como infraestructura crítica



Qué implica esa clasificación

- ✦ Prioridad en la restauración de servicios básicos (energía, agua, telecomunicaciones)
- ✦ Inclusión explícita en los planes nacionales y locales de gestión de riesgo y emergencias
- ✦ Acceso privilegiado a recursos de respuesta durante un desastre
- ✦ Mayor exigencia de planificación de continuidad de negocio y de resiliencia climática



Por qué a veces no ocurre

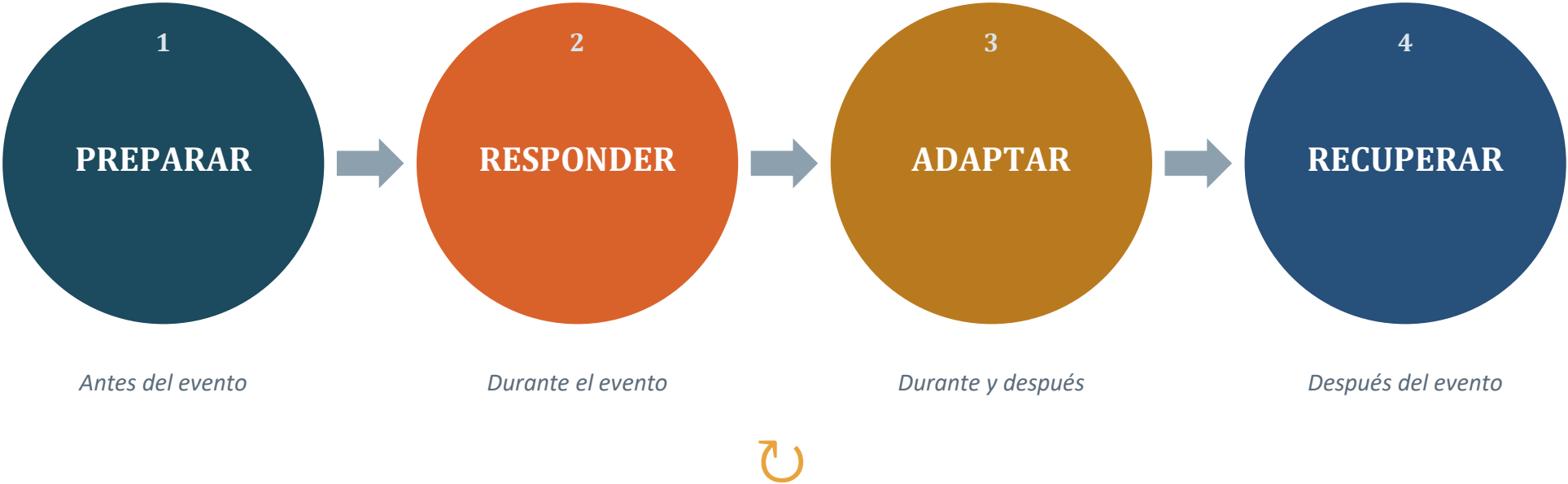
- ✦ La clasificación formal como infraestructura crítica varía entre países y marcos regulatorios
- ✦ No siempre está explícitamente vinculada a los planes de gestión de riesgo climático
- ✦ Sin ese reconocimiento formal, el aeropuerto puede quedar en un segundo plano frente a otras prioridades durante una crisis

PARTE 12

¿Qué deberíamos hacer? De la respuesta a la resiliencia



Un ciclo continuo de cuatro fases



Ciclo continuo — la recuperación retroalimenta la próxima preparación



Preparar y Responder

1 · Preparar — antes del evento

- ✦ Evaluación de riesgo climático
- ✦ Evaluación de vulnerabilidades
- ✦ Evaluación del sistema de drenaje
- ✦ Planes de emergencia
- ✦ Aeropuertos alternativos
- ✦ Acuerdos de cooperación
- ✦ Protocolos de comunicación
- ✦ Equipos críticos
- ✦ Planes de evacuación
- ✦ Capacitación

2 · Responder — durante el evento

- ✦ Comando y control: quién decide, cómo se coordinan las acciones, cómo se evitan decisiones conflictivas o duplicación de esfuerzos
- ✦ Comunicación
- ✦ Servicios de emergencia
- ✦ Asistencia a pasajeros
- ✦ Salud y saneamiento
- ✦ Restricciones operacionales
- ✦ Instalaciones alternativas



Adaptar y Recuperar

3 · Adaptar — durante y después

- ◆ Instalaciones temporales
- ◆ Aeropuerto alternativo
- ◆ Rutas temporales
- ◆ Cambios operacionales
- ◆ Redundancias

4 · Recuperar — después del evento

- ◆ Inspección
- ◆ Evaluación estructural
- ◆ Evaluación funcional
- ◆ Rehabilitación
- ◆ Retorno a la operación



¿Qué podemos aprender de estos eventos?

- 1 Los eventos extremos son cada vez más un problema operacional, no solo ambiental.
- 2 La resiliencia aeroportuaria exige una coordinación que va más allá del operador del aeródromo.
- 3 La interdependencia de infraestructuras debe considerarse en la planificación de emergencias.
- 4 La resiliencia de los pavimentos es solo un componente de la resiliencia aeroportuaria.
- 5 La adaptación al cambio climático debe incorporarse a la planificación, el diseño, el mantenimiento y la respuesta ante emergencias de los aeropuertos.

PARTE 14

¿Cómo reparamos la pista?

La pregunta más amplia es:

¿Cómo mantenemos funcionando el sistema de aviación — y la sociedad a la que sirve?

PARTE 15

¿Qué estamos haciendo en la ICAO Montreal?

Airport Pavement Expert Group (APEG)



Un capítulo en desarrollo

- ◆ El *Airport Pavement Expert Group (APEG)*, de la ICAO Montreal, trabaja en un capítulo que integrará el Doc 9157 – Parte 3 (*Aerodrome Design Manual*)
- ◆ Ese capítulo abordará los impactos de los eventos extremos derivados del cambio climático — enfocado específicamente en las áreas pavimentadas
- ◆ En la última reunión, el grupo finalizó la parte relacionada con inundaciones

Algunos ítems inicialmente considerados fueron removidos a lo largo de las reuniones — aparecen tachados en el índice de la página siguiente.



Contenido programático (borrador)

Doc 9157 – Parte 3 · Capítulo: Mitigación del cambio climático y resiliencia a eventos extremos para pavimentos aeroportuarios

1.1	Introducción	1.5	Resiliencia del pavimento
1.2	Definiciones	1.5.1	Tipos de eventos extremos relacionados con el clima
1.3	Interacción con la sostenibilidad	1.5.2	Efectos de terremotos
1.4	Mitigación del cambio climático	1.5.3	Efectos de inundación — recién finalizado
1.4.1	Efectos del cambio climático	1.5.4	Efectos de erupciones volcánicas
1.4.2	Efectos de temperaturas extremas y variaciones	1.5.6	Efecto de huracanes, tornados y ciclones
1.4.3	Efectos de lluvias intensas e inundación	1.5.7	Efecto de incendios forestales
1.4.4	Polvo sobre superficies	2	Sostenibilidad en pavimentos aeroportuarios
1.4.5	Deshielo del permafrost	2.1–2.11	Principios, herramientas de cuantificación y oportunidades por tipo de material (11 subsecciones)

MENSAJE FINAL

La resiliencia aeroportuaria es,
en definitiva, resiliencia social.

Cuando un evento climático extremo afecta un aeropuerto, la pregunta no es solo cómo reparamos la pista, sino cómo mantenemos funcionando el sistema de aviación — y la sociedad a la que sirve.



Muchas gracias

Infraestructura aeroportuaria y cambio climático: impacto en los pavimentos aeroportuarios

LUCIUS PRADO

EXPERTO EN REGULACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL / ANAC BRASIL

lucius.prado@anac.gov.br
