

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA INFRAESTRUCTURA AEROPORTUARIA Y PROMOVER RESILIENCIA A EVENTOS CLIMATOLÓGICOS EXTREMOS



ENGELAMIENTO

Alejandro Coronel Abadie

Pronosticador aeronáutico

Lic. en Ciencias Atmosféricas

Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) —
Campus Dr. Víctor Levi Sasso

**Ciudad de Panamá, Panamá,
21 al 25 de septiembre de 2026**



Marco conceptual

ENGELAMIENTO



ENGELAMIENTO



Representa un serio peligro para la aviación y se lo define como el depósito de hielo sobre una aeronave que sucede cuando el agua líquida **subfundida** (*también llamada superenfriada y sobreenfriada*), agua líquida a temperaturas menores de 0°C , se congela al impactar sobre la aeronave.

Puede producirse dentro de nubes, dentro de bruma o niebla, y en el seno de la precipitación (lluvia engelante).



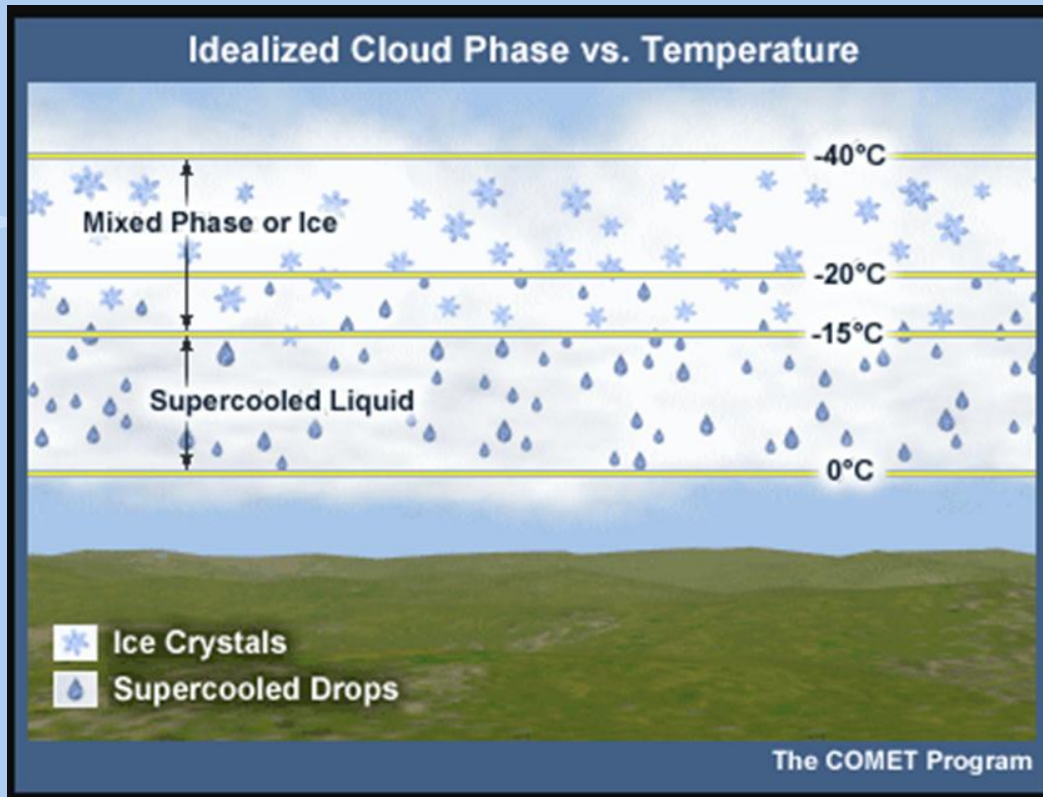


ENGELAMIENTO



Para producirse se necesita:

- Presencia de nubes con o sin precipitación
- Alto contenido de agua
- Temperatura menor a 0 °C



La presencia de engelamiento es más probable en aquel intervalo de temperatura en el que se presente más cantidad de gotas sobreenfriadas.

- A temperaturas mayores de -15°C, más de un 99% de la nube consiste en agua
- A temperaturas de -20°C, 50% de la nube consiste en agua y hielo
- A temperaturas de -40°C, 100% de la nube consiste en hielo

El mayor impacto a la aviación se observa cuando la humedad relativa es $> 80\%$, y la temperatura entre los 0°C a -15°C

Fuente: Mike Davison. *Engelamiento y su Impacto a la Aviación Civil*.
NWS International Desks



ENGELAMIENTO



En el Caribe, el nivel de 0 °C normalmente está muy alto. Por eso, una aeronave que vuela a niveles bajos o medios pasa gran parte del tiempo en aire demasiado cálido para engelamiento estructural. En cambio, en zonas subtropicales continentales o de latitudes medias, la isoterma de 0 °C puede descender mucho más, de modo que una capa extensa de nubes entre aproximadamente **0 y -20 °C** puede coincidir con niveles de vuelo usados durante ascensos, descensos y aproximaciones.

Región	Frecuencia típica	Alturas más relevantes	Mecanismo frecuente
Caribe	Baja a moderada	Principalmente niveles medios/altos	Convección profunda
Subtropicals húmedos	Moderada	Niveles bajos a medios	Estratiforme + frontal + convección
Latitudes medias	Moderada a alta	Desde niveles bajos hasta medios	Sistemas frontales, nimbostratus, stratocumulus
Regiones frías/montañas	Alta en temporadas favorables	Incluso muy cerca de superficie	Orográfico + frontal + stratiforme

Fuente: Grelson, E. F. y Anderson, M. R. (1999). *A climatology of icing condition probabilities based on historical radiosonde data* [Resumen de presentación de la conferencia]. 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Dallas, TX, Estados Unidos. <https://ams.confex.com/ams/99annual/abstracts/1267.html>



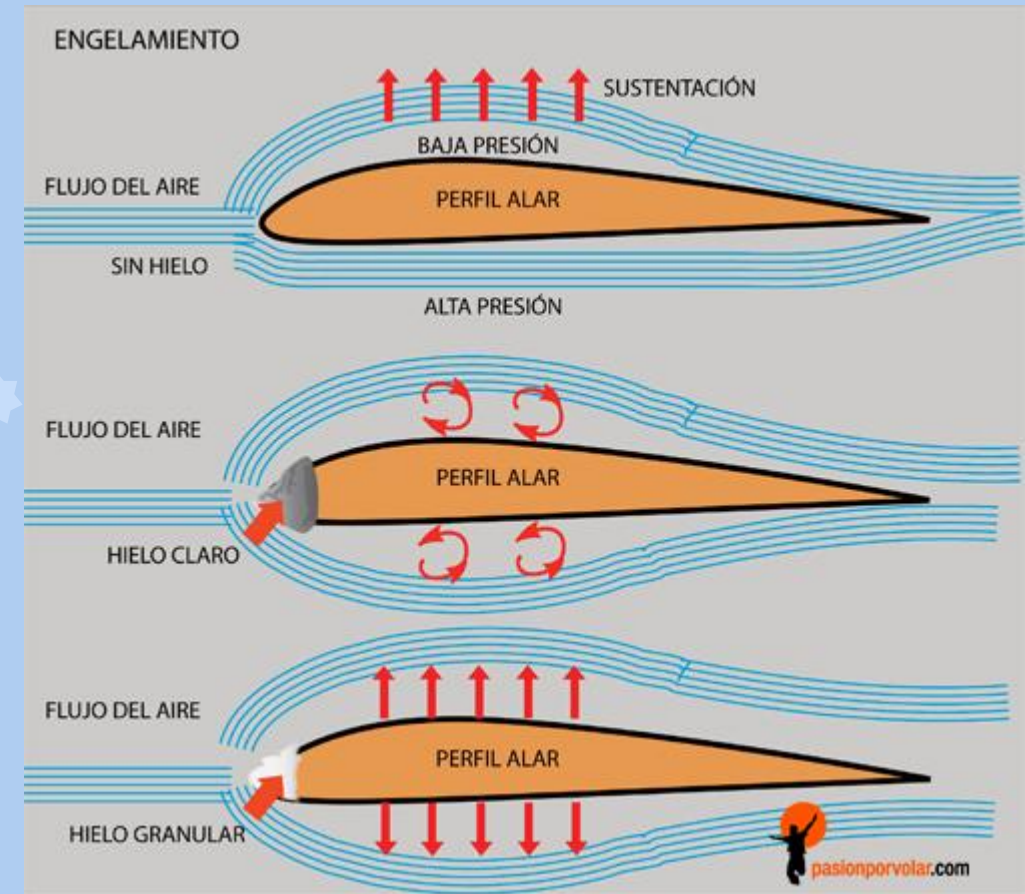
ENGELAMIENTO



EFFECTOS EN LA AERONAVE

El engelamiento se forma en toda la estructura del avión, pero es en los bordes de ataque de los planos y timones de control, los lugares donde más se acusa su presencia por los efectos que produce en las performances del avión.

Al depositarse el hielo en estas superficies se modifican los perfiles aerodinámicos de tal manera, que el coeficiente de sustentación se reduce y la resistencia al avance aumenta.



Modificación de los perfiles aerodinámicos debido al engelamiento
Fuente: <https://www.pasionporvolar.com/engelamiento-en-el-avion/>



ENGELAMIENTO



EFFECTOS EN LA AERONAVE



Fuente: Mike Davison. *Formación de hielo en vuelo. Folleto para la promoción de la seguridad. European General Aviation Safety Team.*
<https://www.easa.europa.eu/en/downloads/24118/es>

Engelamiento afecta parabrisas impidiendo la correcta visibilidad
Fuente: <https://www.pasionporvolar.com/engelamiento-en-el-avion/>



EFFECTOS EN LA AERONAVE

El hielo se adhiere principalmente a los elementos expuestos al viento relativo, y a aquellas partes que sobresalen del avión, pudiendo dar lugar a:

- Alteraciones en las propiedades aerodinámicas de la aeronave en vuelo (fuerza de ascenso y rozamiento).
- Reducción de la visibilidad.
- Interferencias en las ondas de radio.
- Errores en los instrumentos.
- Aumento del peso de la aeronave.
- Pérdida de potencia de los sistemas de propulsión.
- Se reduce su eficiencia y pueden llegar a pararse o ser destruidos a causa de trozos de hielo.
- Vibraciones que provocan fatiga estructural.





TIPOS DE ENGELAMIENTO

- El Hielo Blanco o Cancellada (Rime Ice)

- Hielo Transparente (Clear Ice)

- Hielo Mixto (Mixed Ice)

- Escarcha (Hoar Frost)

ENGELAMIENTO



Presenta un peligro para las aeronaves no equipadas con sistemas de deshielo o antiengelmiento y las que cuentan con sistemas de deshielo no activados.



Hielo blanco. Borde delantero del ala. Fuente: *Comet MetEd (NASA)*



TIPOS DE ENGELAMIENTO

- El Hielo Blanco o Cencellada (Rime Ice)
- Hielo Transparente (Clear Ice)
- Hielo Mixto (Mixed Ice)
- Escarcha (Hoar Frost)

ENGELAMIENTO



Se presentan con mayor frecuencia en entornos con mayor contenido de agua líquida, mayoritariamente a partir de gotas grandes (nube tipo Cu o lluvia formada por gotas subfundidas).
Constituye el tipo de engelamiento más peligroso



Hielo transparente
NASA-Lewis Research Center

Hielo transparente. Borde delantero del ala.. Fuente: *Comet MetEd (NASA)*



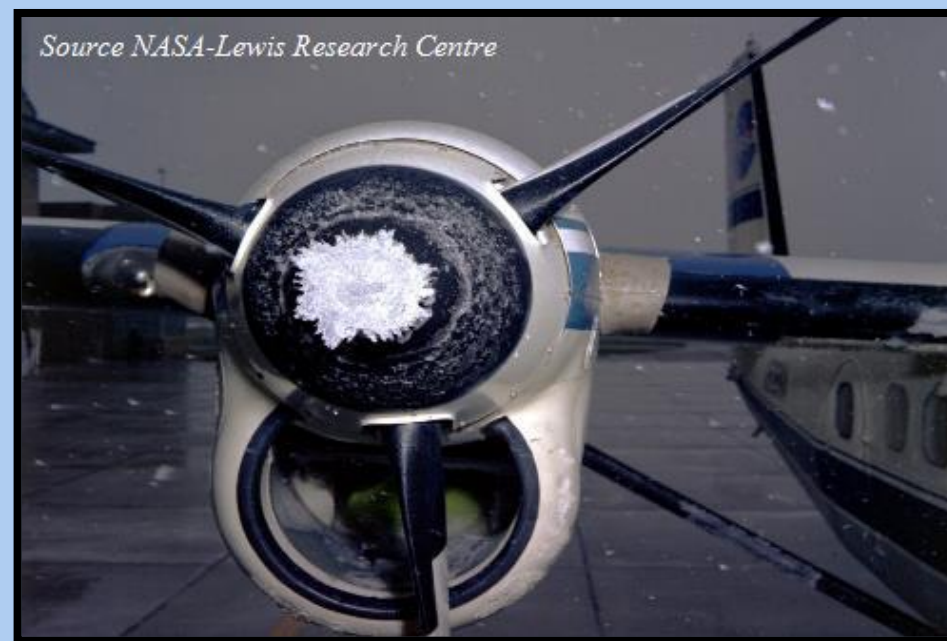
TIPOS DE ENGELAMIENTO

- El Hielo Blanco o Cencellada (Rime Ice)
- Hielo Transparente (Clear Ice)
- Hielo Mixto (Mixed Ice)
- Escarcha (Hoar Frost)

ENGELAMIENTO



Es una mezcla tanto de hielo blanco como de hielo transparente. Es similar al hielo transparente en el sentido de que puede estar distribuido sobre partes de la superficie aerodinámica que no están protegidas por sistemas antiengelamiento o de deshielo y es más difícil de eliminar que la cencellada. Representa el mismo tipo de peligro para las aeronaves que el hielo transparente.



Hielo mixto. Turbohélice Fuente: *Comet MetEd (NASA)*



TIPOS DE ENGELAMIENTO

- El Hielo Blanco o Cancellada (Rime Ice)
- Hielo Transparente (Clear Ice)
- Hielo Mixto (Mixed Ice)
- Escarcha (Hoar Frost)

ENGELAMIENTO



Se dan en un avión enfriado por haber volado en capas de aire frío y que entra en capas de aire más cálido y con humedad relativa elevada. También se puede formar estando parado en el suelo. Este depósito se puede formar fuera de nubes. Debe ser eliminado siempre ya que puede servir de catalizador para la formación adicional de hielo.



Escarcha en la parte superior del ala. Fuente: *Transport Canada*



ENGELAMIENTO

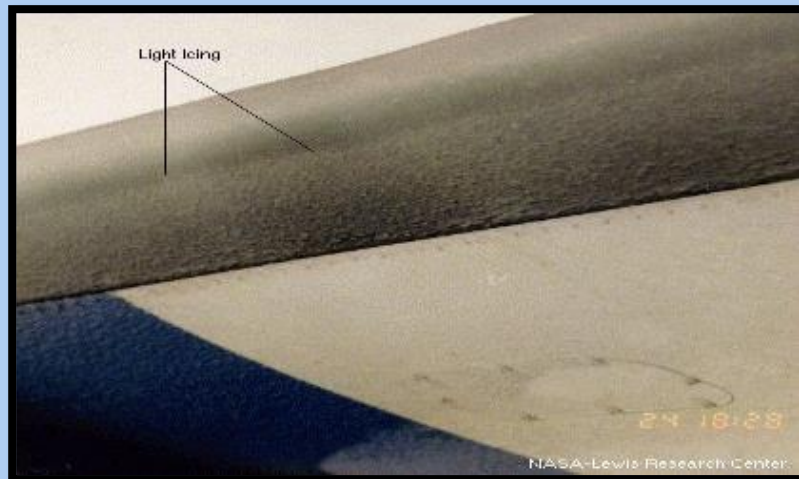


INTENSIDADES DE ENGELAMIENTO

Ligero
 $1\text{g}/\text{cm}^2/\text{hora}$

Moderado
 $6\text{g}/\text{cm}^2/\text{hora}$

Fuerte
 $12\text{g}/\text{cm}^2/\text{hora}$



Puede haber problemas si la aeronave permanece en este ambiente durante una hora o más. Es necesario usar los sistemas de deshielo o antienglamiento de vez en cuando para eliminar o impedir la acumulación del hielo.

Intensidad del englamiento. Fuente: Nasa

Cuando la razón de acumulación llega a ser peligrosa, requiriendo la acción de los sistemas de deshielo/antihielo o un cambio de rumbo o altitud.

Cuando la acción sobre los sistemas de deshielo/antihielo no tiene efecto y se requiere un cambio de altitud inmediato. Un estudio realizado en 2003 en EEUU con informes PIREP dio como resultado que raramente se encuentran en la atmósfera situaciones de englamiento fuerte.



SITUACIONES FAVORABLES

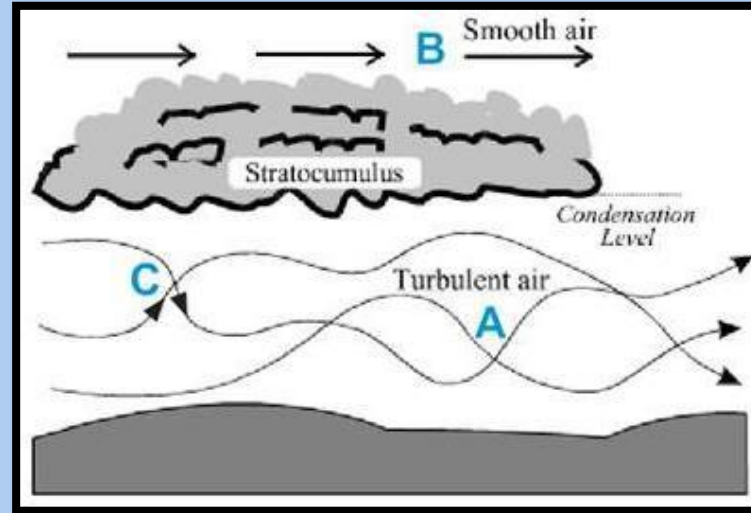
ENGELAMIENTO



Tormentas

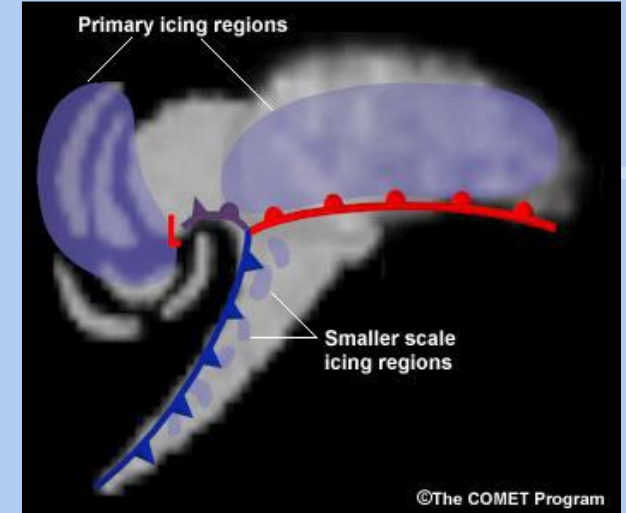


Inversión térmica,
Sc y turbulencia



Formación de una inversión por
turbulencia en niveles bajos. Fuente: *COMET
MetEd*

Frentes



Zonas principales de engelamiento
en frentes. Fuente: *COMET MetEd*



Gracias

Alejandro Coronel Abadie

alejandro.coronel@meteorologia.gov.py