

Capítulo 10.

Peligros meteorológicos – turbulencia

- 10.1 Turbulencia según su origen
- 10.2 Clasificación de la turbulencia
- 10.3 Áreas donde la turbulencia es más común
- 10.4 Vuelo sobre montaña
- 10.5 Caso de estudio

134

La turbulencia es la tercera causa de siniestralidad meteorológica en aviación con un 15 % de los casos (Moreno y Gil, 2003), y la primera causa de daños y lesiones en pasajeros y tripulación en accidentes que no finalizan en un resultado fatal. Invisible, imprevisible y difícil de detectar, la turbulencia ha causado daños en muchas partes del mundo. La turbulencia consiste en la aparición de movimientos aleatorios en el flujo de aire que provoca la formación de remolinos y afecta gravemente el normal desarrollo del vuelo causando molestias, fracturas y shock nerviosos sobre los pasajeros y tripulaciones.

Aeronáuticamente, la turbulencia se define como el movimiento irregular de una aeronave en vuelo, especialmente cuando se caracteriza por un movimiento rápido hacia arriba y hacia abajo, causado por una variación rápida de las velocidades del viento atmosférico (American Meteorological Society, s.f.b).

Cuando un avión vuela rápidamente desde una corriente a otra, experimenta cambios bruscos en la aceleración, así que un desplazamiento más lento causará cambios de aceleración más escalonados. Como consecuencia, la primera regla para volar en una zona con turbulencia, es reducir la velocidad de acuerdo a los límites y recomendaciones de cada aeronave para atravesar zonas de turbulencia (FAA, 2007).

Entre otros factores que contribuyen al aumento o disminución de la turbulencia en la aeronave se encuentran su tamaño, peso, superficie alar, velocidad, actitud y posición de la aeronave frente al flujo de aire. A mayor peso de la aeronave, menor turbulencia; si los planos son más largos, mayor turbulencia; el ángulo de los planos menos susceptible a la turbulencia es el delta; y, finalmente, si la aeronave se encuentra entrando o saliendo de una corriente en chorro, encontrará mayor turbulencia.

Si la superficie terrestre fuera completamente lisa y la atmósfera estable, el viento sería completamente laminar y fluiría con velocidad usualmente constante. Pero dado que en la superficie terrestre se encuentra todo tipo de obstáculos y la atmósfera es inestable, el flujo normalmente es turbulento. La diferencia entre *cizalladura* y *turbulencia* es que esta última contempla una amplia gama de escalas espaciales y temporales (American Meteorological Society, s.f.a.), y, consecuentemente, tiene implícita la cizalladura. La cizalladura, por el contrario, no siempre es turbulenta, sobre todo en gran escala.



10.1 Turbulencia según su origen

10.1.1 Turbulencia mecánica

135

La turbulencia mecánica está ligada a la irregularidad del terreno y es considerada una interacción entre la superficie terrestre y el flujo de viento entre los primeros 1 000 a 2 000 m. Ruiz (2002) encontró que en Bogotá esta capa turbulenta, estimulada por el rozamiento del aire con los obstáculos y la orografía, origina remolinos que podrían llegar a afectar hasta los 1000 m de espesor e IDEAM y DAMA (2001) determinaron que podría extenderse hasta 1 500 m según la zona del país.

Cuanto más irregular es la superficie y más elevada es la velocidad, se aumentará la intensidad de la turbulencia. Dependiendo de la velocidad del viento y de la estabilidad del aire, los remolinos turbulentos serán transportados en cortas o largas distancia. Mientras que el aire estable permite la formación de remolinos de pequeña escala los cuales se disipan lentamente, el aire inestable genera remolinos de mayor escala pero de fácil y rápida dispersión (figura 61).

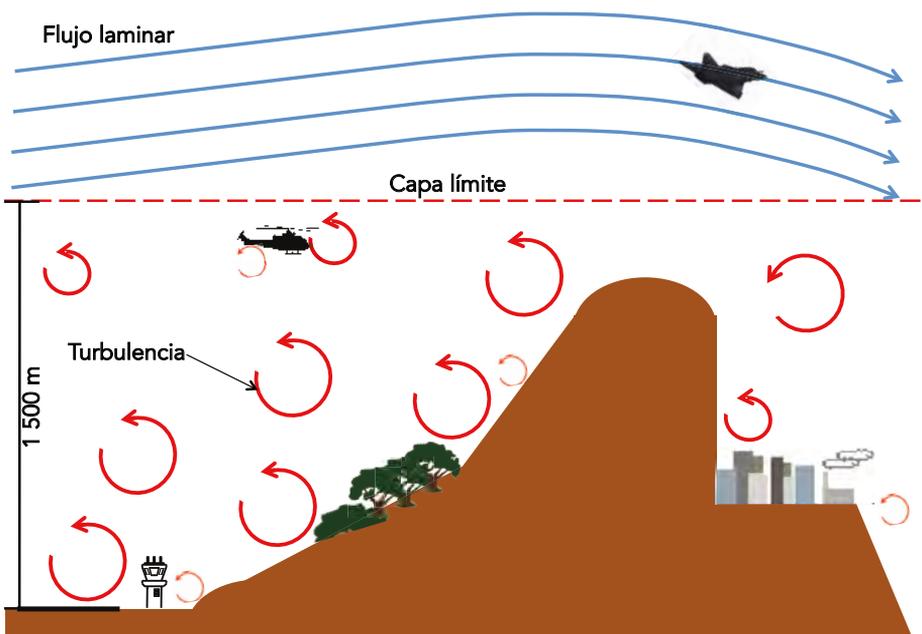


Figura 61. Turbulencia mecánica.

Fuente: elaboración propia.

Los obstáculos también pueden llegar a causar el efecto venturi o de embudo, el cual consiste en la presencia de vientos fuertes en la sección más angosta del valle (figura 62).

Sin embargo, en los procesos atmosféricos no suele presentarse esta situación por la falta de una barrera en la parte más alta del flujo. Al contrario, en una situación más real, los vientos tienden a intensificarse en la salida de la canalización. La rápida expansión del aire denso que alcanza la salida causa una rápida caída de la presión atmosférica y origina un gradiente de presión entre la entrada y la salida de la canalización que aumenta la velocidad del flujo de aire, produciendo a su vez turbulencia por velocidad.

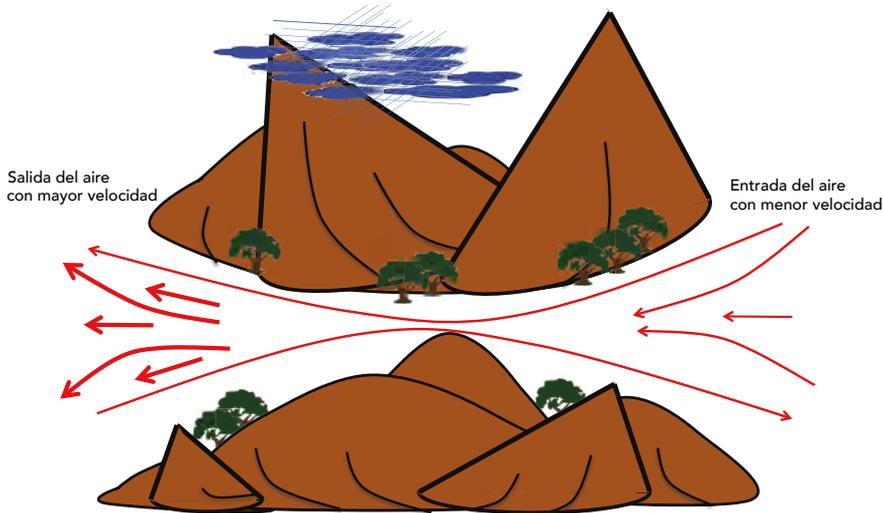


Figura 62. Efecto venturi en la sección más angosta vs. salida de la canalización.

Fuente: elaboración propia.

Para calcular la velocidad del flujo canalizado en la salida del flujo, la University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) presenta un buen ejemplo de esta situación en el módulo vientos canalizados (MetEd, 2014) «viento canalizado», en donde se ejemplifica un flujo sin fricción a través de una canalización de igual elevación. La ecuación relaciona la aceleración a través de una canalización, así:

Ecuación del viento canalizado:

$$\frac{(vel.salida)^2}{2} = \frac{(vel.entrada)^2}{2} + \frac{(pres.entrada - pres.salida)}{(densidad\ del\ aire)}$$

Ejemplo: Determinar la velocidad de salida conociendo que la densidad del aire es equivalente a 1,2 kg/m³, la presión de salida es 1 008 mb y la velocidad del viento y presión en la entrada de la canalización son 5 m/s (~10 kt) y 1013 mb respectivamente.

Como 1 mb es igual a 1 hPa, 1 013 mb son iguales a 1 013 hPa.

$$\frac{(vel.salida)^2}{2} = \frac{(5\ m/s)^2}{2} + \frac{(1\ 013\ hPa - 1\ 008\ hPa)}{(1,2\ kg/m^3)}$$

Esto implica una disminución de presión a través de la canalización de 5 hPa.

$$\frac{(vel.salida)^2}{2} = \frac{(5\ m/s)^2}{2} + \frac{(5\ hPa)}{(1,2\ kg/m^3)}$$



Conociendo que 1 hPa = 100 Pa, Pa = N/m², N = J/m y J = kg m²/s²

$$\frac{(\text{vel.salida})^2}{2} = \frac{25 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2} + \frac{500 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1,2}$$

$$\frac{(\text{vel.salida})^2}{2} = 12,5 \text{ m}^2/\text{s}^2 + 416 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 429 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$(\text{vel.salida})^2 = 2(429,5 \text{ m}^2/\text{s}^2) = 858 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$(\text{vel.salida})^2 = \sqrt{858 \text{ m}^2/\text{s}^2} = 29,2 \text{ m}^2/\text{s}^2 \approx 60 \text{ kt}$$

El resultado muestra que el viento, en ausencia de fricción, puede alcanzar 29,2 m/s en la salida de la canalización, casi 60 kt. Por lo tanto, si una aeronave sobrevuela un valle estrecho a baja altura, o a la salida del mismo, y se encuentra de frente con una tormenta, no debería intentar cruzarlo, en ese caso, es recomendable dar vuelta atrás y dirigirse al aeródromo de salida o su alterno, tal cual como lo muestra la figura 63.

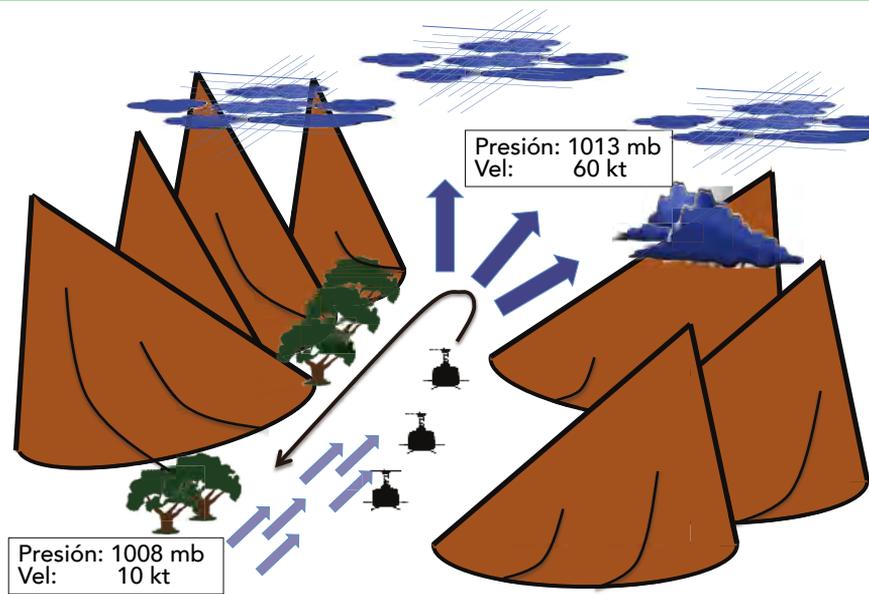


Figura 63. Peligros causados por efecto Venturi, canalización del flujo y salida de la canalización.
Fuente: elaboración propia.

10.1.2 Turbulencia térmica o convectiva

La turbulencia térmica es el resultado de tres factores: el calentamiento del suelo, el tipo de suelo y el grado de inestabilidad del aire. Al calentarse el aire que se encuentra más cercano al suelo, se vuelve menos denso y asciende adiabáticamente. Estos múltiples ascensos de aire se traducen en corrientes ascendentes que afectarán el normal desarrollo del vuelo (figura 64).



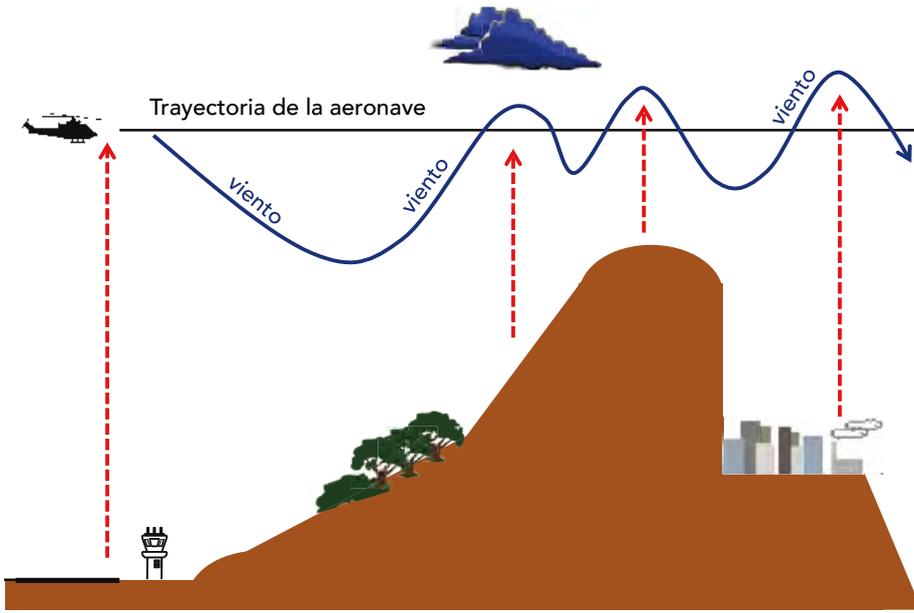


Figura 64. Turbulencia térmica.
Fuente: elaboración propia.

Turbulencia térmica en zonas montañosas. De día, las laderas de las montañas se calientan más rápido que el valle y se genera movimiento ascendente del aire sobre las laderas; de noche el patrón se invierte y se producen movimientos descendentes. Este patrón es ampliamente detallado en el estudio de caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo (IDEAM, s.f.).

Esta dependencia de la temperatura causa nubosidad convectiva en la cima de la montaña en el día, y baja visibilidad en los valles, sobre todo en la madrugada (figura 65).

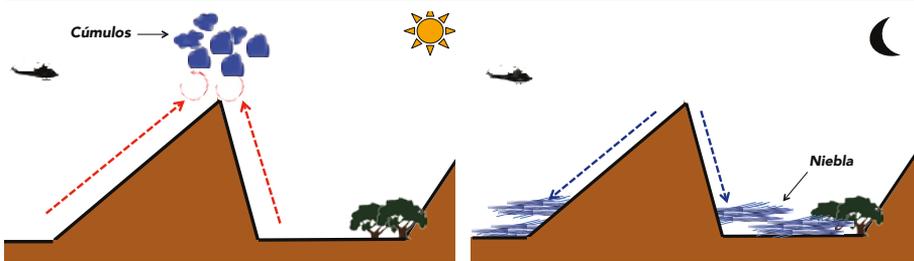


Figura 65. Corrientes diurnas y nocturnas por las laderas de las montañas.
Fuente: elaboración propia.

Turbulencia térmica en zonas costeras

Brisa marina. La brisa marina es el resultado de las diferencias de temperatura entre la tierra y el agua. De día el suelo se calienta mucho más rápido que el agua, el aire sobre el suelo se calienta, se vuelve menos denso y asciende; su espacio es ocupado por aire



relativamente más frío procedente de las masas de agua cercanas, creando corrientes de aire que se desplazan del agua hacia la tierra (figura 66a).

Brisa de tierra o terral. El terral es el movimiento opuesto a la brisa marina, aquí las masas de aire se desplazan desde la tierra hacia el agua como consecuencia del enfriamiento acelerado que sufre el suelo durante la noche, así que de noche el agua conserva mayor temperatura que el suelo y el aire encima de ella es entonces relativamente más cálido que el aire sobre el suelo (figura 66b).

139

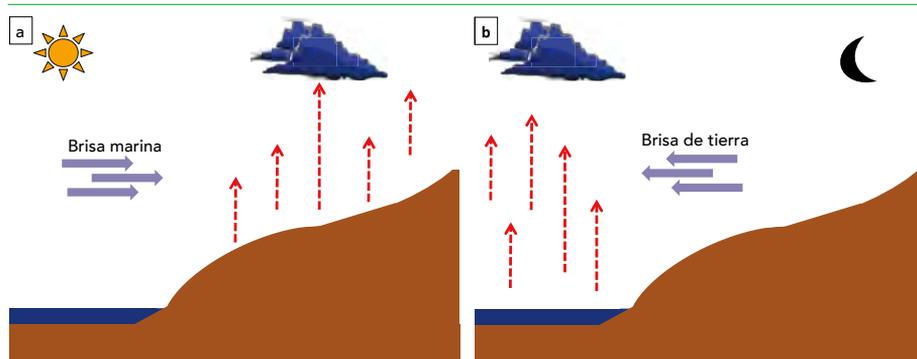


Figura 66. Variación del viento en la costa por efecto de la temperatura.

Fuente: elaboración propia.

Las tripulaciones de helicóptero son muy susceptibles a este tipo de turbulencia cuando realizan operaciones de extinción de incendios utilizando Bambi Bucket²⁷ por encontrarse cerca al terreno y con altas diferencias de temperatura entre tierra y cuerpos de agua.

Como caso de ejemplo, el 20 de septiembre de 2012, el B-212 FAC 4003, durante misión de extinción de incendios en fase de despegue, experimentó hundimiento después de cargar agua en el Bambi. La tripulación tomó la decisión de eyectar el Bambi y regresar al Comando Aéreo de Combate N°. 4 en Melgar. La aeronave no presentó daños estructurales y el Bambi Bucket fue sometido a un proceso de evaluación y reparación de posibles daños.

10.1.3 Tormentas

Es el único tipo de turbulencia fácil de vislumbrar por la presencia de nubes de desarrollo vertical, las cuales poseen corrientes ascendentes y descendentes en su interior y están rodeadas de zonas turbulentas en su base, sobre su tope y debajo del yunque. Si una aeronave tuviera que enfrentarlas, la recomendación más viable es pasar por el lado opuesto al yunque (figura 67). Estas nubes pueden alcanzar hasta 66 000 ft de altura en el ecuador.

²⁷ Marca del sistema de extinción de incendios de propiedad de la compañía canadiense SEI Industries, que permite el transporte de un contenedor de agua de gran capacidad por parte de un helicóptero.



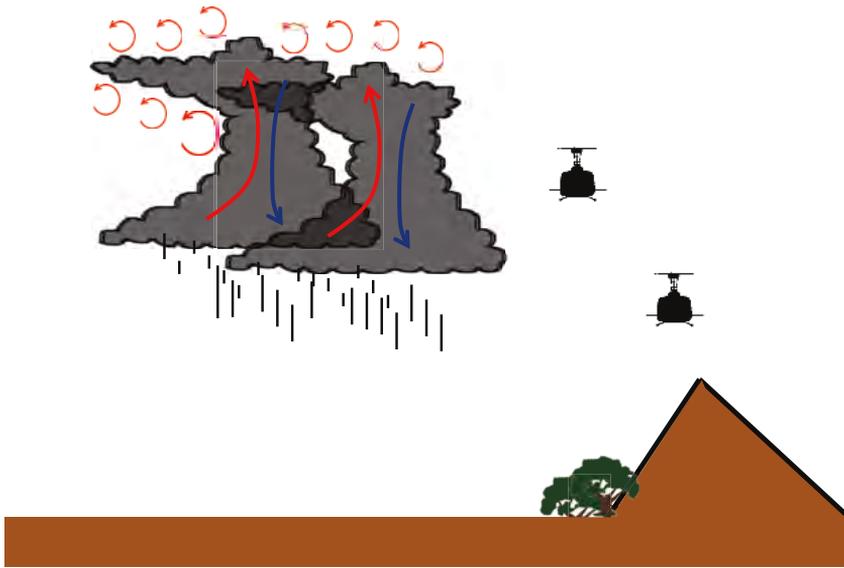


Figura 67. La turbulencia por tormenta tiende a ser menor por el lado opuesto al yunque.
Fuente: elaboración propia.

10.1.4 Turbulencia por onda de montaña

El piloto debe conocer que la turbulencia está asociada a todo tipo de obstáculos en el flujo del aire y siempre que se vuele muy cerca al terreno se deben asumir corrientes ascendentes por el barlovento y descendentes por el sotavento de las montañas.

Sumado a esto, cuando el viento se enfrenta a una cadena montañosa, se crea sobre el obstáculo mucha turbulencia y el choque abrupto del flujo de aire con el relieve se extiende en forma de onda creando turbulencia. Normalmente estas ondas pueden ser detectadas porque cuando se condensa el vapor de agua, se forman *nubes lenticulares*, las cuales adoptan la forma de la cresta de la onda (figura 68).

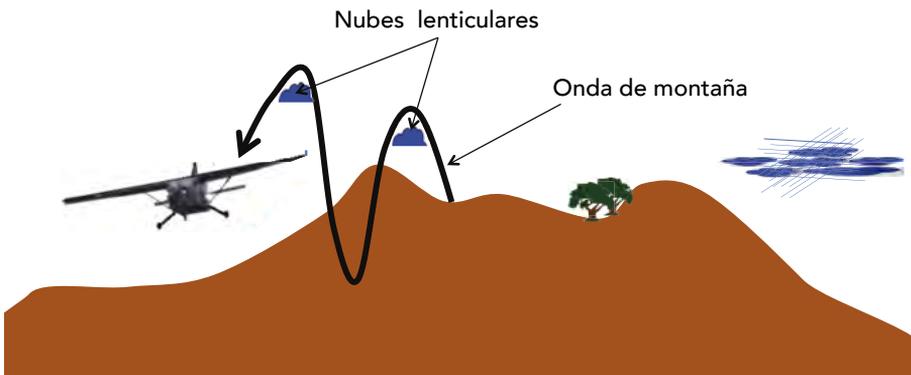


Figura 68. Turbulencia por onda de montaña.
Fuente: elaboración propia.



10.1.5 Turbulencia asociada a corrientes en chorro (*Jet Stream*)

La corriente en chorro tiene asociada turbulencia por cambio de velocidad toda vez que en el centro del chorro la velocidad es más fuerte que las circundantes. Las aeronaves experimentan fuerte turbulencia al entrar o salir del *jet stream* (figura 69a), el cual normalmente está ubicado alrededor de los 34 000 ft, con dirección W – E en latitudes medias e intensidades mayores a 50 kt. No es común encontrar corrientes en chorro (*jet stream*) que alcancen espacio aéreo colombiano; sin embargo, en Colombia se conoce de la existencia de al menos tres *jet de bajo nivel* (inferior a 10000 ft) con intensidades usualmente mayores a 25 kt que podrían estar asociadas a turbulencia leve y moderada (figura 69b).

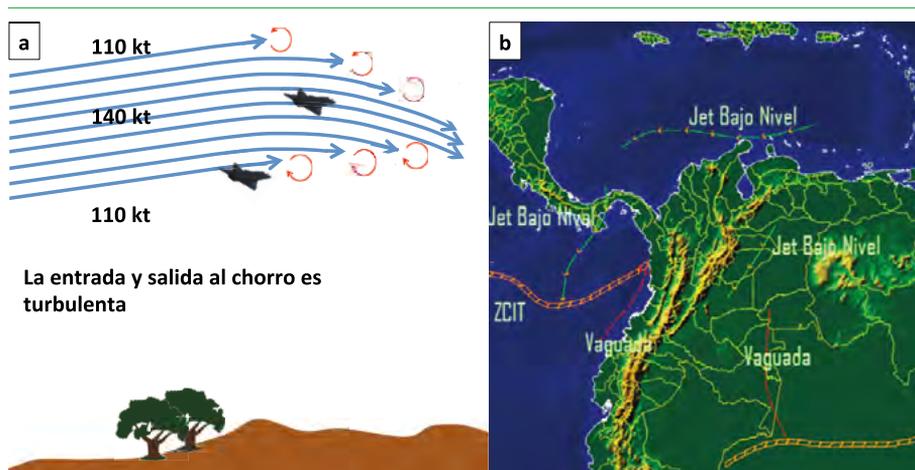


Figura 69. Turbulencia asociada al *jet stream* y *jet de bajo nivel* en Colombia.

Fuente: elaboración propia. Figura 69b tomada del SIMFAC (s.f.)

10.1.6 Turbulencia en aire claro

Hay un tipo de turbulencia llamada CAT (*Clear Air Turbulence*) que no está asociada a ningún tipo de nubosidad, dificultando su detección y predicción. Puede ocurrir en un condiciones atmosféricas aparentemente normales y sin ningún tipo de reconocimiento visual.

La CAT normalmente se manifiesta por encima de los 30 000 ft y también puede encontrarse próxima a la altura de la tropopausa, la cual varía según la latitud. Su intensidad puede ser de moderada a extrema según el lugar, las condiciones atmosféricas y la combinación con otros factores meteorológicos.

En una zona CAT, como en toda ocasión que una aeronave experimente turbulencia, se recomienda reducir la velocidad a los valores recomendados para cada aeronave. Esto atenuará los daños que pueda sufrir la estructura de la aeronave y la ayudará a mantenerse más estable.

En Colombia se le ha atribuido a la CAT varios incidentes, uno de ellos se presentó el 21/DIC/2001 a las 17:45 UTC con el HK 3859-X de Intercontinental. Mientras la aeronave



realizaba el vuelo número 8 858 con 6 tripulantes y 22 pasajeros en la ruta Cali – San Andrés, y cuando se encontraba en la fase de descenso, la tripulación advirtió a los pasajeros que estaban pasando por una zona de turbulencia severa. Después del incidente uno de los pasajeros informó que había sufrido un fuerte golpe en la cara y la lesión fue registrada como grave. Aunque no es clara la altitud de la aeronave y no se estableció una causa probable, es posible que se viera enfrentada a la CAT.

10.2 Clasificación de la turbulencia

Tabla 15. Clasificación de la turbulencia.

Turbulencia	Velocidad	Efectos sobre la aeronave	Efectos sobre los pasajeros
Ligera	5 – 15 kt	El avión está sometido a oscilaciones muy ligeras de vez en cuando.	Objetos en reposo. Es necesario abrochar los cinturones.
Moderada	15 – 25 kt	El avión es sometido a golpes laterales frecuentes y a un ligero balanceo. Es necesaria una leve acción sobre los mandos	Los pasajeros pueden perder por un instante el contacto con su asiento.
Fuerte	25 – 35 kt	El avión se separa de la línea de vuelo; cabecea, se balancea y está sujeto a movimientos verticales bruscos. Es preciso realizar una fuerte acción sobre los mandos para mantener el equilibrio. El panel de instrumentos vibra y causa confusión al piloto.	Los pasajeros pueden ser lanzados fuera del asiento.
Extrema	+ de 35 kt	El avión se separa con frecuencia y bruscamente de la línea de vuelo, cabecea y se balancea fuertemente. Obedece con dificultad a los mandos.	Los pasajeros son sacudidos violentamente, y sin cinturones de seguridad podrían ser lanzados fuera del asiento. Los objetos son expulsados de un lugar a otro.

Fuente: Modificado de MetEd (2016).

10.3 Áreas donde la turbulencia es más común

Tabla 16. Áreas donde es más común cierto tipo de turbulencia.

Tipo	Áreas donde se presenta
Turbulencia ligera	Cerca de montañas con viento < 15 kt
	Inmerso o cerca de nubes cumuliformes
	Cerca de la tropopausa
	En capas bajas con terreno rugoso y viento >15 kt
Turbulencia moderada	Viento perpendicular a la montaña generando ondas de montaña



Instrumento	Áreas donde se presenta
Turbulencia moderada	Viento >50 kt y aeronave alejada de sotavento hasta 500 k
	Viento 25 – 50 kt y aeronave alejada de sotavento hasta 250 km
	En nubes de tipo cumulonimbos
	En capas bajas con terreno rugoso y viento >25 kt
	En terreno plano con ráfagas >50 kt
Turbulencia severa	Viento perpendicular a la montaña generando ondas de montaña
	Viento >50 kt y aeronave alejada de sotavento hasta 250 km
	Viento 25 – 50 kt y aeronave alejada de sotavento hasta 100 km
	Inmerso o cerca de nubes cumulonimbos en etapa de maduración
Turbulencia extrema	En ondas de montaña cerca de la nube rotor
	En tormentas severas, inmerso o cerca de una línea de inestabilidad en donde se presenta ascenso de las capas de aire

Fuente: Modificado de MetEd (2016).

10.4 Vuelo sobre montaña

El vuelo sobre montaña es uno de los más complicados porque implica operación continua con el terreno y con los ángulos pronunciados, también hay menor densidad y por lo tanto menor sustentación, incremento de obstáculos naturales que dificultan maniobrar la aeronave y, por supuesto, un incremento significativo de turbulencia.

El vuelo sobre montaña es particularmente importante en la operación de helicópteros, ya que la mayoría de ellos vuelan muy cerca de los límites operacionales. El vuelo en altura y desestimar el efecto tierra²⁸ generan casi la mitad de los accidentes en helicópteros donde la tripulación pierde la eficiencia del rotor de cola, disminuye la potencia de la aeronave, disminuye la efectividad en las actuaciones aerodinámicas y finalmente se pierde el control de la aeronave.

La recomendación principal del vuelo sobre montaña es alejarse del terreno siempre que sea posible y evitar los ángulos mayores a 30°. Una aeronave que tiene viento de frente o de cola de 40 kt y pasa muy cerca de una pendiente de 30°, podría sufrir corrientes descendentes de hasta el 50 % del viento predominante, es decir, 20 kt (figura 70).

Los helicópteros en la FAC han sido seriamente afectados por los fuertes vientos en condiciones de vuelo sobre montaña, tal como se muestra a continuación:

El B-212 FAC 2170 (19/DIC/86) después de dos horas de vuelo en varias estaciones vulcanológicas del Nevado del Ruiz, se dirigió a Manizales para tanquear, pero un ingeniero de INGEOMINAS que estaba a bordo le solicitó al piloto que los dejara en la estación del Cisne. Durante el aterrizaje fue afectado por fuerte viento del lado izquierdo, que originó hundimiento con potencia, caída de las RPM y, posteriormente, el impacto del helicóptero con el terreno.

²⁸ El efecto tierra es el fenómeno aerodinámico que provoca alteraciones del flujo de aire cuando una aeronave se encuentra cerca de la superficie, situación que le permite despegar con más carga y utilizar menos potencia.



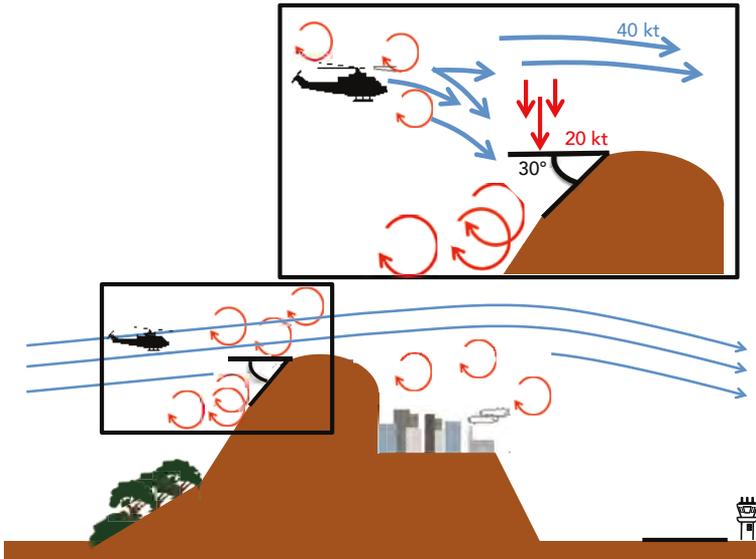


Figura 70. Turbulencia sobre montaña asociada a vientos fuertes y ángulos pronunciados sobre el terreno.
Fuente: elaboración propia.

El B-212 FAC 4221 (28/ABR/88), cumpliendo el tercer vuelo según el itinerario ordenado, se encontraba en final al helipuerto del cerro Pan de Azúcar con 700 lbs de carga a bordo. La tripulación experimentó fuertes ráfagas de viento que afectaron notoriamente el rendimiento del helicóptero, haciendo que este cayera verticalmente una altura aproximada de 5 m, para luego impactar contra el terreno y afectar seriamente las estructuras inferiores y *skids* de la aeronave.

El UH-60 FAC 4107 en el Páramo de Sumapaz (12/FEB/93). El piloto decidió cambiar el área de aterrizaje y la trayectoria final, debido a la amenaza de disparos del enemigo en el área. Próximo al aterrizaje se presentó un descenso brusco quedando por debajo del sitio escogido. El piloto intentó aterrizar sobre la ladera con condiciones adversas significativas, causando que el rotor principal impactara con el terreno.

El UH-1H FAC 4418 en el Cerro La María (26/JUL/93). La aeronave despegó de CACOM-4 a las 11:00 horas. Treinta minutos después y cuando se encontraba en final corta al helipuerto del Cerro La María, fue afectada por ráfagas de viento que la desestabilizó, ocasionando que la nariz golpeará contra el borde del helipuerto y el rotor principal, con el borde del cerro. Como consecuencia, la aeronave giró 180° y rodó por la ladera del cerro expulsando a la tripulación y parando 500 m abajo, causando la destrucción total de la aeronave.

El B-212 FAC 4008 en el Cerro La María (30/JUN/99). En aproximación al Cerro La María, el helicóptero entró en hundimiento, produciendo un aterrizaje fuerte, saliendo inmediatamente a vuelo y golpeando inadvertidamente la parte inferior del *tail boom* contra el spot.



10.5 Caso de estudio

El K-350 FAC 5078, a las 15:00 horas, en aproximación al aeródromo de Popayán (14/SEP/12). El ATC del aeródromo le informa al piloto los reportes de viento para la pista 26 en tres ocasiones, mencionando viento entre los 180° y 190° con 17 kt, y ráfagas entre 30 y 35 kt. Durante el aterrizaje, la aeronave hizo contacto fuerte con la pista y salió de nuevo a vuelo, lo que obligó a la tripulación a realizar un procedimiento de motor y al aire, dirigiéndose hacia Cali. Una vez aterrizados en Cali, durante la inspección posvuelo, se encontró que las palas de la hélice del motor derecho presentaban signos de impacto.

145

Una de las recomendaciones de la investigación fue categorizar los vientos cruzados en pistas, de acuerdo con la experiencia de los pilotos, por ejemplo: el máximo componente de viento cruzado admisible para un piloto de K-350 con menos de 100 horas de vuelo sería de 10 kt.

Los reportes METAR del aeródromo de Popayán eran:

SKPP 141600Z 16017KT 8000 FEW020 25/09 A3013 RMK/HZ

SKPP 141700Z 16010G22KT 8000 FEW020 27/08 A3010 RMK/HZ

SKPP 141900Z 19012G25KT 8000 FEW020 26/10 A3005 RMK/HZ

SKPP 142000Z 19013KT 9999 FEW020 XX/XX A3003 RMK/HZ/WS ALL RWY

SKPP 142200Z 200013G24KT 9999 SCT020 22/10 A3005 RMK/HZ/WS RWY 7

De acuerdo a lo anterior, para las 20:00 UTC se presentó viento de los 190° con 13 kt de intensidad. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el viento en el METAR es el promedio de los últimos 10 minutos antes de las 20:00 UTC, a la tripulación se le reporta el promedio de los últimos dos minutos antes de realizar el aterrizaje.

Las condiciones meteorológicas de ese día y hora se presentan en la imagen infrarroja captada por el servicio meteorológico de la Fuerza Aérea Colombiana (figura 71).

De la imagen se puede determinar que en el aeródromo de Popayán (señalado con un círculo rojo) se estaban presentando fuertes diferencias de temperatura, representadas por el color violeta y verde claro, situación que pudo llegar a influir en la presencia de vientos fuertes para ese punto y hora.

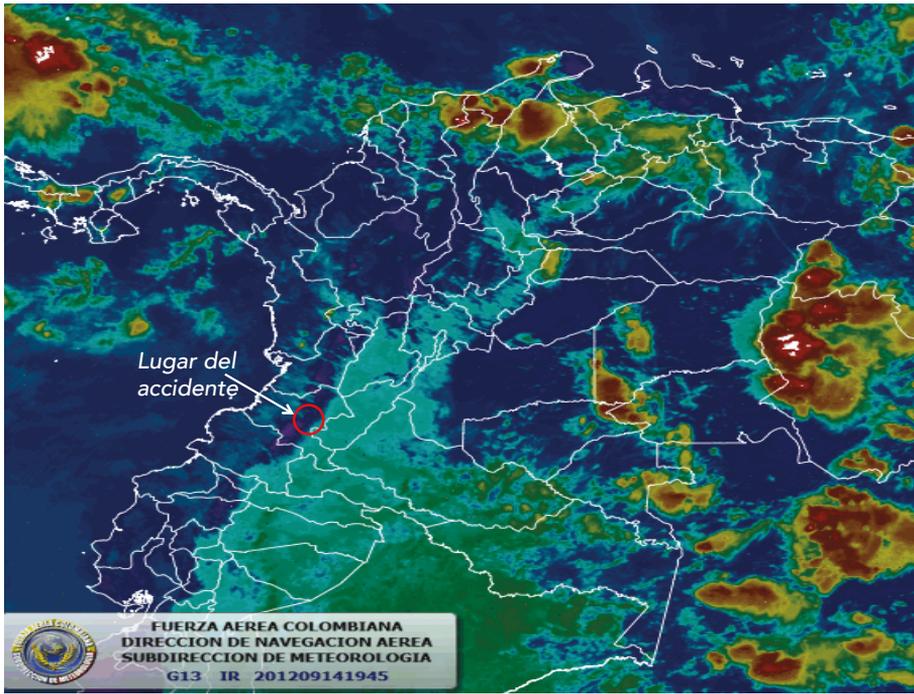


Figura 71. Imagen infrarroja del satélite GOES-13.
Fuente: Modificada de SIMFAC (s.f).

