

METEOROLOGIA DEL VUELO EN ALTA MONTAÑA

P O R

ALBERTO LINES ESCARDO

Meteorólogo, Jefe del Gabinete Técnico
de la Dirección de Operaciones de Iberia

“A este instante entraron en el juzgado dos hombres, el uno vestido de labrador y el otro de sastre, porque traía unas tijeras en la mano, y el sastre dijo:

—Señor gobernador, yo y este hombre labrador venimos ante vuesa merced en razón que este buen hombre llegó a mi tienda ayer —que yo, con perdón de los presentes, soy sastre examinado, que Dios sea bendito— y poniéndose un pedazo de paño en las manos, me preguntó: “Señor, habría en este paño harto para hacerme una caperuza”? Yo, tanteando el paño, le respondí que sí; él debiose de imaginar, a lo que yo imagino, e inmagine bien, que sin duda yo le quería hurtar alguna parte del paño, fundándose en su malicia y en la mala opinión de los sastres, y replicóme que mirase si habrían para dos; adiviné el pensamiento, y díjele que sí, y el, caballero en su dañada y primera intención, fue añadiendo caperuzas y yo añadiendo síes, hasta que llegamos a cinco caperuzas; y ahora en este punto acaba de venir por ellas: yo se las doy, y no me quiere pagar la hechura; antes me pide que le pague o vuelva su paño.

—Es todo esto así, hermano? —preguntó Sancho.

—Sí, señor —repondió el hombre—; pero hágale vuesa merced que muestre las cinco caperuzas que me ha hecho.

—De buena gana —respondió el sastre.

Y sacando incontinenti la mano debajo del herreruelo, mostró en ella cinco caperuzas puestas en las cinco cabezas de los dedos de la mano, y dijo:

—He aquí las cinco caperuzas que este buen hombre me pide, y en Dios y en mi conciencia que no me ha quedado nada del paño, y yo daré la obra a vista de veedores del oficio.

Todos los presentes se rieron de la multitud de las caperuzas y del nuevo pleito”.

Traemos a cuento este pasaje del gobierno de Sancho Panza en la Insula Barataria, porque me temo que mi intervención pueda resultar un conjunto de insignificantes aportaciones, o de cinco caperuzas.

El tema me ha sido asignado —no lo he elegido— es el de “Meteorología del vuelo de alta montaña”, sin otras especificaciones. Y después de darle muchas vueltas, he llegado a la conclusión de que son cinco los aspectos diferentes que ofrece el tema, como fueron cinco las caperuzas que cosió el sastre examinado. Y dichos aspectos son estos:

- Meteorología del vuelo a vela.
- Meteorología de la aviación privada o deportiva.
- Meteorología de los vuelos de apoyo en las operaciones militares en alta montaña.
- Meteorología en las operaciones de vuelo del llamado “Tercer Nivel” en áreas de alta montaña.
- Meteorología en las operaciones de vuelo en la Aviación Civil Internacional.

Vamos a detenernos en cada uno de los anteriores aspectos:

1. METEOROLOGÍA DEL VUELO A VELA

Forzosamente había que hacer mención a esta modalidad del vuelo precisamente en tierras de Huesca en las cuales se encuentra una de las escuelas de más solera y tradición de vuelos sin motor del mundo, y de la que han salido campeones de rango mundial.

Más que la alta montaña, las áreas próximas son muy propicias para esta clase de vuelo, y de hecho tanto a un lado como a otro del Pirineo se encuentran bases de vuelo a vela.

Sin entrar en un análisis exhaustivo de este tema, por lo que a las condiciones meteorológicas se refiere, podemos hablar de vuelo a vela en ladera, en ascendencia térmica y vuelo en situación de ondulatoria.

En el vuelo de ladera se aprovechan las ascendencias originadas por la elevación del aire forzada por la presencia de ladera. Para su estudio y pronóstico es preciso conocer el régimen actual y previsto del viento en bajos niveles, y sobre todo, y ello es muy importante, la microclimatología local. La elevación del aire por la ladera tiene lugar en condiciones cuasi adiabáticas y, las ascendencias pueden ser puestas de manifiesto por las formaciones nubosas originadas por condensación a barlovento; la evidencia se corrobora cuando tales nubes se disipan en forma indudable a sotavento. Sin embargo, puede haber ascendencia sin formaciones nubosas y de hecho, las hay muchas veces. Para el pronóstico, puede ser útil la fórmula de Schubert, que proporciona la altura esperada: $h = 122 (T - T')$ donde T es la temperatura y T' la de rocío, h la altura en metros.

El vuelo en ascendencia térmica es quizá el más conocido; como es sabido las condiciones más favorables se presentan en atmósfera poco estable, con altos gradientes verticales de temperatura y resulta inviable en atmósfera muy

estable, y sobre todo con gradientes muy bajos o negativos. Por ello no suele ser aconsejable intentar tales vuelos hasta que no se ha deshecho la inversión de enfriamiento nocturno.

Las situaciones tormentosas suponen las condiciones óptimas para la formación de ascendencia; sin embargo los vuelos a vela en tales condiciones ofrecen indudable peligrosidad de descargas eléctricas, granizo, precipitación, engelamiento y también fortísimas descendencias, por lo cual se requiere una gran dosis de experiencia para el vuelo en estas condiciones, instrumentación adecuada del velero. Debe recordarse que en las áreas tormentosas, las mayores descendencias se originan normalmente coincidiendo con la primera precipitación. A veces esas descendencias son tan violentas que delante de las formaciones tormentosas aparecen las temidas líneas de turbonada.

La proximidad de las áreas montañosas facilita las ascendencias, aunque tal fenómeno no es uniforme a lo largo del año. En primavera, las zonas de alta montaña suelen ser más propicias para las tormentas pero a veces, en verano el fenómeno es inverso, debido quizá a la menor temperatura en las zonas de montaña, sobre todo en el caso de las típicas tormentas de calor. Merece destacarse el hecho de que las zonas de mayor ocurrencia del granizo, no es raro aparezcan en las áreas de montaña. El granizo no es exclusivo, como se ha pretendido, de las zonas templadas; una de las mayores frecuencias de granizo, en el mundo, se da en las zonas ecuatoriales, al Sur de los complejos sistemas orográficos del Kilimandjaro, y algo al Norte de la región de Los Lagos.

Así como para la predicción de las ascendencias son importantes las condiciones locales, para la previsión de las condiciones de vuelo sin motor con ondulatoria, es preciso conocer la situación general sinóptica y su evolución. En el vuelo de ondulatoria no es excepcional el alcanzar los 4.000 m. de elevación. Hay unas situaciones peligrosas y son aquellas que producen las temidas nubes rotor, a sotavento de las cordilleras, cuando el movimiento laminar, transitoriamente se hace turbulento.

Casi todas las aves vuelan con facilidad en condiciones de ascendencias térmicas y tienen una especial sensibilidad para detectar las corrientes verticales. En el vuelo majestuoso de las águilas, con las alas desplegadas, aparentemente rígidas, descubriríamos las ascendencias. Lo mismo podemos observar en las cigüeñas, los vencejos y otras aves.

El vuelo de ondulatoria sólo lo practican algunas aves, pocas que, utilizando expresión aeronática diríamos están calificadas para tal modalidad de vuelo. El albatros es titular de esa calificación, y por supuesto, el águila, aunque este animal vuela como ninguno en ascendencias térmicas. Hay algunas aves acuáticas que perciben las tenues ascendencias producidas por el viento en las crestas de las olas.

2. METEOROLOGÍA DE LA AVIACIÓN PRIVADA O DEPORTIVA

Este tipo de aviación proporcionará indudables ventajas para el desarrollo turístico y deportivo de las regiones de alta montaña, ya que permitiría combinar tipos distintos de deportes, rapidez de desplazamientos a las áreas deportivas y una mejora de determinados servicios de las mismas.

En las zonas próximas a la alta montaña no suele ser demasiado difícil el crear pequeños aerodromos para la aviación privada "in situ", que permita un enlace punto a punto inmediato a los posibles aerodromos de partida. Este factor a veces no es debidamente sopesado. Cualquier meteorólogo con mediana experiencia aeronáutica sabe que es mucho más difícil hacer un pronóstico de ruta, por ejemplo de Valencia a Seo de Urgel, o de Valladolid a Biarritz para una avioneta que una ruta de Barcelona a Chicago, para un reactor comercial.

Los problemas meteorológicos de los vuelos de la aviación "general" (por utilizar la denominación de OACI) no son únicamente los de visibilidad y techo de nubes; el viento es otro importantísimo factor, para la aproximación y aterrizaje, para la turbulencia en ruta y sobre todo para el sobrevuelo de las áreas de alta montaña. La pequeña aviación por lo regular opera en niveles de vuelo bajos, cercanos a los topes de las crestas de la alta montaña, lo cual es un serio obstáculo. Y el peligro no siempre procede del riesgo de colisión en pleno vuelo. Según un informe del NTSB (National Transportation Safety Board) de Estados Unidos, en los pasados 10 años, 100.000 personas estuvieron de alguna manera implicados sólo en Estados Unidos, con unos 39.000 accidentes de aviones ligeros. Según muchos investigadores creen que uno de cuatro de esos accidentes se han producido por pérdida de control después de haber sido maniobrado el avión para una pérdida de velocidad. Tal cosa puede suceder, muchas veces en condiciones de turbulencia o en situaciones de vientos muy variables.

3. METEOROLOGÍA PARA LOS VUELOS DE APOYO EN LAS OPERACIONES MILITARES DE ALTA MONTAÑA

En este grupo podríamos incluir también los vuelos de salvamento, las operaciones contra incendios y las de evacuación en casos de grandes nevadas, inundaciones y en una palabra, de protección civil.

Los aeropuertos para las operaciones en alta montaña, civiles o militares, a veces se denominan "altipuertos"; en ellos las pendientes de pista a veces exceden del 2 % y son aptos para aviones especiales de potente grupo motor y poca carga alar.

En las operaciones militares puras, el apoyo meteorológico es importantísimo, pero muchas veces no es condicionante; es decir, son muchas también las operaciones que se realizan con bueno o mal tiempo. En menor grado, puede decirse algo parecido en los casos de salvamento, pensando en aquel aforismo

que dice más o menos que “las prescripciones vitales no tienen contraindicación”.

En cuanto a algunos elementos diferenciales de esta clase de operaciones con las de la Aviación Civil Internacional, nos referiremos brevemente más adelante.

Hay sin embargo, un aspecto de esencial importancia y es el régimen de vientos, que en ocasiones puede ser un condicionamiento importante y hasta total, tanto en operaciones civiles como militares. El lanzamiento de paracaidistas requiere unas condiciones muy particulares de viento, con lo cual, volvemos otra vez a encontrarnos con la importancia de este elemento, Eolo, en todo cuanto se refiere a la Meteorología del Vuelo en Alta Montaña.

Un aspecto en el que conviene detenerse siquiera unos momentos, es el relativo a las operaciones con helicópteros. En una impresión superficial parecería que este tipo de aeronaves por su posibilidad de detenerse en pleno vuelo, por la lentitud de sus movimientos verticales y por otras razones, es menos sensible a las penalizaciones meteorológicas que otras aeronaves. Y no es así. La perforación de capas de niebla es compleja y dificultosa y no resulta siempre tan sencillo el ajustar los gradientes de descenso como en el caso de los aviones a turbina o pistón. Por otra parte, son enormemente sensibles a los efectos de la turbulencia, sobre todo en bajos niveles, en los cuales son muy vulnerables. Podríamos decir que las enormes ventajas de maniobras que tienen los helicópteros prácticamente sólo puede utilizarse plenamente en condiciones de vuelo visual.

Los inconvenientes a que hemos aludido antes en cuanto a la dificultad de formular pronósticos detallados, en áreas de complejo relieve, sobre condiciones de atmósfera despejada, podemos traerlos a cuento aquí también.

4. METEOROLOGÍA EN LAS OPERACIONES DEL LLAMADO “TERCER NIVEL”

La expresión de “Transporte Aéreo de Tercer Nivel” no está reconocida mundialmente. Tampoco hay una idea completamente uniforme acerca de lo que significa tal concepto. Para algunos, se trata de servicios interiores, a nivel regional. Suelen realizarse en aviones cuya capacidad suele quedar entre los 20 y los 50 pasajeros, aunque en ocasiones estos límites llegan a los 12 por abajo y los 60 por arriba; generalmente tiene carácter regular, a diferencia de los taxis aéreos o los pequeños “charter”. Lo ordinario es que estos vuelos se realicen sobre trayectos que no excedan de los 400 kms. Hay que añadir también que el Tercer Nivel casi siempre tiene alcance interior o doméstico; hay sin embargo excepciones en Europa Occidental, donde la multitud de fronteras da al concepto regional una faceta internacional, lo mismo sucede en el Caribe u otras áreas con numerosos Estados de carácter insular y donde el transporte aéreo es particularmente apto para distancias no largas. OACI, en su Lexicon traduce la palabra inglesa “commuter” como servicio aéreo de Tercer Nivel.

Estos servicios han tenido importante desarrollo en países de gran extensión como Brasil, Australia, Canadá y por supuesto, Estados Unidos. También ha habido gran auge de tercer nivel en determinados países africanos. Es corriente que el Tercer Nivel aparezca como "servicios complementarios" o como "líneas de aporte", encargadas de alimentar las líneas principales, más corrientemente denominadas "troncales".

Para Ramiro Fernández, las características del Tercer Nivel deben ser:

- Servicios regulares, de pasaje y correo.
- Sobre recorridos regionales o provinciales, sin exceder de 500 Kms.
- En corrientes de baja densidad de tráfico en aviones de al máximo 60 pax.
- En general, en concurrencia, y en casos, como enlace de aporte y dispersión con líneas coordinadas de mayor tráfico, con el decidido propósito de formar parte de un sistema de transportes integrados.
- Con idénticos atributos básicos (nivel de seguridad, etc.) que la Aviación Comercial.

A nuestro juicio, hay un punto esencial sobre el cual un Servicio de Tercer Nivel debe definirse sin ambigüedades: si satisface o no todos los requerimientos de OACI, sobre las operaciones de la Aviación Civil Internacional.

Al referirse a la Aviación Civil Internacional no hablamos precisamente de vuelos internacionales, queremos hacer referencia a las normas que se aplican en tales vuelos, que lógicamente se aplican también en las grandes líneas aéreas, en los tramos interiores.

Como es sabido, el Anexo 6 al Convenio OACI está dividido en dos partes: La Aviación Internacional y la Aviación General, que antes denominaba la "Pequeña Aviación", y que comprende la deportiva, la agrícola, la de fumigación y otras. Es preciso el definir en cuál de los dos tipos incluimos el Tercer Nivel. En nuestra opinión la diferencia, en cuanto a lo operativo, que hay entre la Aviación General y la Internacional, está en el respeto al principio que llamaríamos de "previsión del simple fallo".

Este principio es esencial en el Transporte Aéreo y no sólo afecta en aspectos básicos de dotación del avión; también alcanza a procedimientos y diríamos que a la propia Filosofía de la Operación. Así por ejemplo, si alquilamos un taxi aéreo, durante el vuelo, podemos pensar: si fallece repentinamente el piloto, se monta un número como en las películas. En cambio, en la Aviación Internacional, hay siempre dos pilotos y en las fases críticas, siempre uno en los mandos.

Las previsiones del fallo pueden hacerse de diferentes formas: Por redundancia, es decir, la duplicidad de los medios esenciales o bien por posibles operaciones alternativas con los medios activos restantes. El principio de la previsión del simple fallo excluye los aviones monomotores en operaciones de Aviación Internacional, así como los polimotores, para los que la parada de un motor sea crítica. Tanto en el Anexo 6 "Operación Aeronaves" como en el Anexo 8, "Aeronavegabilidad" encontramos hasta doce referencias a las posibilidades operativas que debe reunir el avión con un grupo motor crítico ino-

perativo, tanto en las fases de despegue, ruta, y aterrizaje y también en las condiciones de manejabilidad en caso de parada de motor y de la necesidad de indicaciones de entrada en pérdida. En el Anexo 6 se establecen limitaciones de utilización de la performance del avión, para el caso de fallo de un grupo motor o de dos grupos motores inactivos.

También encontramos normas para casos de fallos de equipo: en el Anexo 6, punto 7.2.2, se lee: "El avión irá provisto de equipo de navegación tal que asegure que en el caso de fallo de un elemento del equipo en cualquier fase del vuelo, el equipo restante sea suficiente para permitir que el avión navegase de acuerdo con su plan operacional de vuelo...". La reserva que pudiéramos llamar inactiva es menos frecuente a bordo, donde prevalece la "reserva de posibilidades" o sea operar con márgenes que permitan suplir fallos. No siempre resulta sencillo el diferenciar entre las reservas de posibilidades; es el caso de la opción de desvío al aeródromo de alternativa. Dicho aeródromo es una reserva inactiva en cierto modo, pero para poder emplearlo es preciso disponer del combustible necesario, lo que es una reserva de posibilidades.

La previsión del fallo exige en lo posible, la salvaguardia de los elementos operativos y evitar el efecto perjudicial en los elementos averiados. Así encontramos en el punto 7.1.2 del Anexo 8 la independencia de los grupos motores, prevista de forma tal, que cada uno pueda funcionar junto con sus sistemas auxiliares independientemente de los otros.

En los momentos que preceden la puesta en marcha, el mecánico de vuelo o uno de los pilotos coloca un papelito con unos datos que previamente ha calculado; uno de ellos es la velocidad llamada V_1 ; una vez alcanzada en la pista de despegue, el avión se irá al aire, aunque se pare un motor. Antes de la V_1 , la pista remanente debe ser suficiente para detener el avión en caso de fallo. En los aterrizajes en la Aviación Internacional, hasta prácticamente sobre la pista es posible frustrar el aterrizaje e irse al aire para comenzar una nueva aproximación.

El simple fallo debe estar siempre previsto en el Tercer Nivel. Es una exigencia, si aparece en el billete de vuelo la conexión como un segmento de un viaje en el cual figura otro u otros segmentos amparados por el status de la Aviación Internacional.

En España hay diversas experiencias en servicios de Tercer Nivel. En Andalucía han sido experimentados. También en el Pirineo existe un clásico servicio a Tercer Nivel: Barcelona - Seo de Urgel. Hay además un avión español, el CASA - 212, y extendido en el mundo tanto en versión militar como en operaciones de Tercer Nivel.

La Meteorología juega un papel importantísimo en las Operaciones de Tercer Nivel sobre todo cuando se opera sobre espacios terrestres exclusivamente; para que el avión pueda competir con el automóvil en trayectos cortos o medios, suele ser un factor importante si no decisivo, el relieve.

En tal caso la Meteorología de estas operaciones suele ser más compleja que la Meteorología aplicada a los vuelos largos.

En efecto, una de las mayores ventajas de los reactores comerciales es su techo; fácilmente se alcanzan los 30.000 pies y aún bastante más si lo exige

la operación. En cambio, en un vuelo Málaga-Granada, la altura máxima no puede ser grande por exigencias de la distancia, aparte de que la mayoría de las aeronaves para servicios de Tercer Nivel, suelen tener un techo práctico un tanto limitado para vuelos sobre áreas de alta montaña en condiciones de engelamiento, que pueden presentarse al paso de frentes desarrollados, o bien de turbulencia mecánica u ondas asociadas al relieve, en casos de vientos muy fuertes.

Un problema que con cierta frecuencia se presenta en las operaciones de Tercer Nivel en áreas montañosas, es el de los mínimos de operación que han de establecerse en los aeropuertos. Acerca de este tema, suele haber una cierta confusión, aún entre las personas iniciadas. Hoy por hoy, para las aproximaciones directas y de precisión resulta imprescindible la instalación de ILS (Instrumental Landing System). Este sistema consta fundamentalmente del localizador, que por medio de un complejo sistema de antenas permite al avión situarse en el plano vertical que pasa por el eje de la pista; la senda de planeo, línea situada en el plano de localizador, que sintonizada permite al avión alcanzar el umbral de pista, con una inclinación de alrededor de 3° , y dos balizas, la exterior (OM) y la media (MM), que alertan del paso por la vertical de puntos especificados de la trayectoria. Al llegar a un punto, el piloto decide, si ve la pista aterrizar; si no la ve, se va al aire (frustra). La determinación de esa altitud de decisión DA es la clave de los mínimos de operación, antes denominados mínimos meteorológicos.

El valor de la DA en los aterrizajes de precisión, depende fundamentalmente del valor de un parámetro que lo proporciona el propio aeropuerto por su propia naturaleza y entorno, y para la aproximación a cada cabecera de pista. Nos referimos al OCL, "límite de franqueamiento de obstáculos". Para calcularlo imaginemos una aproximación a un aeropuerto. El avión baja por la senda de planeo que tiene una determinada pendiente y que deja un margen vertical sobre toda clase de obstáculos según prevé OACI. Al llegar casi al umbral de la pista, frustra la aproximación, mete motores a fondo, recorre un tramo horizontal y asciende de nuevo dejando en la subida también un margen sobre los obstáculos, que también está establecido y se tiene en cuenta que en el peor momento pueda fallar un motor. La altura mínima de este tramo horizontal, viene a ser lo que se entiende por el OCL.

Este valor, es un dato objetivo se calcula y ahí queda y sirve de base para el cálculo de los mínimos. Con nubes más bajas que el OCL no deben completarse aproximaciones en CAT. I. Si un operador no respeta sus mínimos para la maniobra que figura en sus manuales, si fuera honrado, deberá obligar a sus Comandantes que al rebasar la altitud de decisión, dijeran al pasaje: "Señores pasajeros, a partir de este momento, si algo falla nos la pegamos". De la misma manera, si alguien utilizara aviones que no cumplieran los Anexos 6 y 8 de OACI, en cuanto al fallo de motor, deberían hacer la misma observación al incauto pasajero.

En lugares de terreno abrupto, es evidente que el OCL ha de tener valores altos o muy altos, y para operar con mínimos muy bajos o sea que aseguren muy elevado tanto por ciento de operatividad, casi siempre sobre todo en

aeropuertos con entorno montañoso había que hacer enormes gastos de movimientos de tierras e instalaciones.

Las limitaciones en aeropuertos en zonas de montaña, provienen de que hay que prever, como establece OACI, una maniobra segura para el caso de que el avión tenga que frustrar su aproximación. Es decir, es el principio de siempre de previsión del fallo.

Por tanto, no tiene objeto el hablar de un aeropuerto bueno o malo. Lo primero que había que preguntar es el OCL para cada maniobra. Si es alto o muy alto, podemos suponer que salvo en días casi despejados, la aproximación tendrá sus toques de emoción. Si es bajo buena señal. Después había que evaluar el tanto por ciento de casos en que el aeropuerto esté operativo. Luego vendrán las demás consideraciones. Para OACI, es deseable al menos un 95 % de operatividad.

Antes de intentar bajar en OCL por mejoras en un aeropuerto, habrá que considerar lo que va a costar tal mejora, el tanto por ciento de operatividad adicional que va a suponer y la rentabilidad de la obra. Es decir, entra en juego ingeniería de aeropuertos, economía, técnica de la operación y sobre todo, climatología. Una decisión política, precipitada o mal fundamentada, cuando menos, puede llevar a un derroche de medios económicos, sin justificación técnica.

Por último, en esta rapidísima visión de la Meteorología en los vuelos en áreas de montaña o alta montaña, en servicios de Tercer Nivel, diremos la necesidad de prever un alto nivel de transición para el reglaje del altímetro, y en casos el habituarse a tal reglaje con altos valores QNH, lo cual no supone dificultad alguna.

5. METEOROLOGÍA EN VUELOS DE ALTA MONTAÑA EN LA AVIACIÓN INTERNACIONAL

En los Manuales de Operaciones de los diferentes operadores, es corriente que se dedique un apartado a los vuelos sobre alta montaña, por ofrecer ciertos aspectos específicos.

En general se insiste en estos puntos:

- a) Engelamiento. Frecuentemente es más intenso especialmente en nubes de tipo Cu y Cb. Las técnicas anti-hielo son tanto más eficaces cuanto más precozmente se apliquen.
- b) Corriente descendente y ascendiente. Las primeras son más de temer, si bien unas y otras van asociadas. Las descendencias se presentan especialmente en sotavento con vientos muy fuertes, y pueden llegar a tener tal intensidad que el avión no pueda mantener su altitud ni con toda la potencia de los motores. En tal caso, se deberá prever la forma de mantener la altitud mínima de despeje de obstáculos. Las lecturas del altímetro, cuando se vuela cerca de las crestas, pueden ser erróneas, por fluctuaciones de la presión del aire local sobre la alta montaña.

Otra precaución adicional debe ser el tener estudiada la trayectoria descendente para el caso en que se produjese un fallo de motor.

Las condiciones más críticas sobre alta montaña se dan siempre en casos de fuerte turbulencia. Ello se puede presentar en situaciones de tormenta, en situaciones en que la corriente en chorro aparece normal a la cordillera y casos especialísimos, en que la turbulencia es de muy peculiares características, la llamada onda de montaña.

Ante todo aclaremos que la onda de montaña, fenómeno ondulatorio, no es el último grado de la turbulencia convectiva. Todo lo contrario. La onda de montaña se presenta en atmósfera estable lo que excluye la presencia de grandes Cu, Cb y tormentas.

Hace algunos años OACI publicó una serie de advertencias para el caso de fuertes ondas de relieve u ondas de montaña.

Destacamos, a continuación, algunas consideraciones que aparecen en dicho documento.

En condiciones de aire estable, una intensa corriente de aire que circula en transversal sobre una cadena de montañas puede dar lugar a la formación de un flujo que comprende ondas y remolinos de gran escala, en los cuales, se producen a veces fuertes corrientes verticales y turbulentas. Estos efectos se manifiestan a menudo a alturas considerables por encima del nivel del terreno elevado, y hay ciertos indicios de que las condiciones de ondas fuertes son muy favorables para la propagación de perturbaciones hasta la estratosfera, llegando ocasionalmente a altitudes de 80.000 pies.

En aire inestable, las corrientes verticales tienden a ser más intensas sobre las montañas que sobre terrenos llanos, especialmente cuando la circulación de fuertes corrientes de aire es perpendicular a la orientación general del relieve orográfico. En estas condiciones, la distribución de las corrientes verticales es irregular.

Se encuentran las condiciones meteorológicas favorables para la formación de ondas orográficas y ondas de sotavento cuando:

- a) La dirección del viento forma un ángulo que no excede de unos 30° de la perpendicular con el eje de una cordillera importante. Una cadena que presente a barlovento una pendiente suave y a sotavento una pendiente abrupta, constituye la fuente más eficaz de ondas de sotavento.
- b) La velocidad del viento al nivel de la cresta es superior a 20 nudos, aumentando ese valor en función de la altura, pero con poca variación de dirección. Cabe observar que las condiciones de ondas fuertes guardan frecuentemente relación con las corrientes en chorro.

(Ej. una corriente en chorro N-S o S-N en el Pirineo o bien W-E en los Andes).

- c) En un nivel cualquiera comprendido entre el nivel de la cresta y otro superior en algunos miles de pies por encima del primero, existe una capa estable definida (con características que se aproxima a la isotermia o a la inversión). Esta capa estable debe necesariamente encontrarse entre dos capas menos estables, una superior y otra inferior.

Muchas millas a sotavento del relieve que los produce, los sistemas de ondas resultantes pueden penetrar y persistir durante varias horas, en la estratósfera. Las fotografías tomadas por satélite han mostrado nubes de onda a distancias que alcanzan hasta 500 millas a sotavento de los Andes, aunque en la mayoría de las regiones son más comunes distancias del orden de 50 a 100 millas.

La longitud media de las ondas de sotavento suele ser de unas 5 millas, aunque puede llegar a tener hasta 30 millas; en general, cuanto más fuerte es el viento más larga es la longitud de onda.

La velocidad de las corrientes verticales dentro del sistema de ondas depende de la longitud de onda, de la amplitud de onda y de la velocidad del viento. Se han registrado corrientes verticales con velocidades que llegaban hasta 35 pies por segundo; cerca de grandes montañas pueden producirse valores muy superiores a éste.

En zonas montañosas de gran extensión, el sistema de ondas de sotavento creado por una cadena sufre las perturbaciones de otras cadenas de sotavento. Además las características de una corriente de aire determinada siempre cambian lentamente con el tiempo y hay casos en que una pequeña modificación en las características de la corriente de aire da lugar a grandes cambios en las características de las ondas orográficas.

Las diversas nubes que deben su aspecto característico al tipo de circulación propia de la onda constituyen para el piloto una indicación valiosa de la existencia de ondas. Siempre que exista un grado suficiente de humedad, el aire ascendente llegará al nivel de condensación, formándose las nubes. Estas nubes se forman en la cresta de las ondas estacionarias y, en consecuencia, permanecen más o menos fijas con relación al relieve de la superficie.

Las nubes lenticulares constituyen la prueba más evidente de la existencia de ondas orográficas. Se forman dentro de capas estables, en las crestas de las ondas estacionarias, al pasar el aire por las mismas, formándose las nubes en la ladera de barlovento y disipándose a sotavento.

La circulación del aire a través de estas nubes es por lo general laminar, a menos que los bordes de la nube presenten un aspecto desgarrado, lo cual es una indicación de torbellinos.

Las nubes de remolino de sotavento se presentan a primera vista como inofensivas bandas de cúmulos desgarrados o de estratocúmulos paralelos a la ladera de sotavento de la montaña (nube rotor). Cuando se las examina más detenidamente, estas nubes parecen rotar en torno a un eje horizontal y se producen a causa de la transición local de la corriente en violenta turbulencia. Se producen frecuentemente en las crestas de las ondas fuertes, pero por debajo de las capas estables asociadas con las ondas. El torbellino de sotavento más potente se forma normalmente en la primera onda de sotavento de la montaña, por lo tanto se encuentra generalmente cerca de la cresta de la sierra o algo por encima del nivel de la misma, aunque ocasionalmente pueden llegar a mucha mayor altura.

Puede encontrarse turbulencia en cualquier nivel, puede ser tan violenta como la que se encuentra en las tormentas fuertes.

La turbulencia más grave que se puede encontrar sobre el terreno montañoso es generalmente la que se halla en los torbellinos estacionarios visibles a veces por la nube "rotor". En el interior de estos torbellinos pueden producirse velocidades verticales superiores a los 100 pies por segundo, y pueden producir daños estructurales o hasta destruir un avión.

Turbulencia en bajo nivel

La circulación de viento fuerte sobre el terreno irregular produce una turbulencia general a bajo nivel, que aumenta en profundidad e intensidad en función del aumento de la velocidad del viento y de la irregularidad del relieve. Los fuertes vientos limitados a las capas más bajas de la troposfera producen por lo general las condiciones de mayor turbulencia a bajo nivel, acompañadas a veces de "circulación turbillonaria", compuesta de violentos torbellinos horizontales.

Turbulencia en alto nivel

La mayor parte de los aviones de transporte público vuelan en la actualidad a niveles en los que se encuentra la corriente en chorro o niveles cercanos a los mismos y hay numerosas indicaciones de que la intensidad y amplitud de la turbulencia en las corrientes en chorro frecuentemente se intensifican en alto grado al pasar sobre regiones montañosas, especialmente en vecindad de las capas estables de la troposfera superior, por ej. la tropopausa.

Las fuertes cizalladuras verticales del viento se concentran a menudo en una o más de las capas estables que se encuentran a algunos miles de pies por debajo del núcleo de la corriente en chorro y por encima de éste en la base de la estratosfera.

Turbulencia estratosférica

Investigaciones efectuadas sobre las Montañas Rocosas en Estados Unidos de América, indican que en días favorables para la formación de fuertes ondas en la troposfera pueden producirse ondas, acompañadas a veces de turbulencia intensa dentro de la estratosfera, lo que puede producir serias dificultades a los aviones que vuelan cerca de su techo práctico.

Turbulencia estratosférica

Se ha comprobado que en especialmente favorables para la formación de acusadas ondas en la troposfera, pueden propagarse hasta la estratosfera.

Otros tipos de turbulencia

OACI llama también la atención sobre otros tipos de turbulencia, como por ejemplo, cuando se producen interferencias en los trenes de ondas u otras modificaciones en las corrientes de aire.

CONCLUSION

Es evidente que la Meteorología Aeronáutica tiene unas especiales características en las área de alta montaña.

Por lo que respecta a los vuelos de la aviación general, helicópteros, y aun en las operaciones del llamado "Tercer Nivel", la Meteorología local precisa de unas infraestructuras específicas en gran parte distintas en sus características de la propia de la Aviación Civil Internacional. Consideración especial merece el apoyo a las operaciones militares y en general, de protección civil.

En Alta Montaña se presenta acusadamente el problema de estudiar a pequeña escala unas condiciones meteorológicas que sinópticamente se analizan a gran escala o mesoescala. Esto sucede con diferentes variables, pero acaso, de forma especial, con el viento, que es uno de los parámetros de más incidencia, sobre todo en la aviación ligera.

La Aviación de "Tercer Nivel," o de tipo regional, está más penalizada y limitada en sus posibilidades en las zonas de alta montaña que en otras.