

# ASPECTOS CLIMÁTICOS EN OPERACIONES DE VUELO EN LA CAPA LÍMITE

Alberto LINÉS ESCARDÓ  
*Dr. Ciencias Físicas. Meteorólogo*

## RESUMEN

Las condiciones por lo general más comprometidas en la operación de vuelo tienen lugar en la capa límite del entorno del aeródromo. En el presente texto se estudian sus propiedades físicas y su incidencia en formación de nieblas, en los vientos, turbulencia en bajos niveles, cizalladura del viento y temperaturas extremas, parámetros esenciales en las operaciones de aproximación, aterrizaje, despegue y ascenso inicial.

**Palabras clave:** Nieblas, Viento, Cizalladura, Turbulencia, Rozamiento, Sustentación, Aproximación, Aterrizaje, Despegue.

## ABSTRACT

*Generally speaking, there are special interest on fly operations near the boundary layer. Its behavior and influence in particular fly operations, such as the approximation, landing, take off and climbing are analyzed, with special emphasis in several aspects of the windshear phenomena.*

*Key words: Fog, Wind, Wind shear, Turbulence, Friction, Lift, Approximation, Landing, Take Off.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Al estudiar las bases físicas del clima de un determinado lugar, se plantea el ver como se adaptan unas condiciones generales, a escala sinóptica, a las particulares del lugar estudiado. Aparte de los grandes accidentes geográficos y otros factores geofísicos que condicionan el clima de un lugar, es el comportamiento de la capa límite uno de los aspectos más importantes a estudiar.

En Física la expresión “capa límite” tiene varias acepciones según la materia a que se refiera. En el caso de la aerodinámica puede referirse a una capa extremadamente delgada; es el caso de los flujos en los planos de los aviones. En el contexto atmosférico, GARRATT (1992) define la “*atmospheric boundary layer*”, ABL, como “la capa inmediatamente sobre la superficie de la Tierra, en que los efectos de la superficie (fricción, calentamiento y enfriamiento) son percibidos directamente en escala de tiempo inferior a un día, y en la cual flujos significativos de momento,

calor o materia son transportados por movimientos turbulentos a una escala del orden de la profundidad de la capa límite o menor”.

Considerada a escala planetaria, el autor PAL ARYA (1988) se refiere a la Capa Límite Planetaria, PBL y la estima como de un espesor de promedio de unos 1000 metros durante el día, con valores extremos en ocasiones hasta los 5000 metros. Durante la noche el espesor desciende hasta unos 100 metros, con valores extremos entre los 20 y los 500.

En el diseño de un aeródromo su climatología juega un papel importantísimo. OACI desaconseja la construcción de un aeródromo si sus condiciones climatológicas no aseguran una operatividad superior al 95 por ciento. Aparte de la climatología, es asimismo esencial el relieve del entorno, para asegurar el despeje de obstáculos no sólo en la aproximación normal sino, y es lo más importante, en la aproximación frustrada.

Al abordar el estudio climatológico del proyecto de un aeródromo, suele considerarse en primer lugar el régimen de vientos, ya que las pistas deben construirse para que se ajusten lo más posible a los vientos dominantes. El régimen de nieblas también es de suma importancia sobre todo por lo que afectan a la regularidad de las operaciones de vuelo. Las temperaturas, las tormentas o posibles lluvias torrenciales son otros factores a considerar, estas últimas para diseñar un drenaje efectivo.

Ya no es tan corriente que se elaboren estudios en profundidad acerca del comportamiento de la capa límite en su totalidad y en ella no es raro se presenten fenómenos que pueden comprometer la seguridad del vuelo, a los que nos referiremos. En la capa límite tiene lugar en buena parte las fases más complejas del vuelo: aproximación final, aterrizaje, rodaje, despegue y ascenso inicial. Y en la pequeña aviación, o aviación general, por seguir la denominación de OACI, muchas veces la totalidad del vuelo tiene lugar sin salirse de la capa límite.

Los fenómenos meteorológicos que más afectan a la operación de vuelo dentro de la Capa Límite son los siguientes:

- Nieblas
- Viento en la capa límite
- Cizalladura del viento
- Turbulencia
- Temperaturas extremas

## **2. NIEBLAS**

La visibilidad es particularmente importante en las fases de aproximación final y de aterrizaje. Cuando las condiciones físicas lo permiten y también las económicas, pueden los aeródromos ser dotados de ayudas que permitan el aterrizaje en condiciones muy bajas de visibilidad horizontal y vertical. Con visibilidades inferiores a 1500 metros debe utilizarse en vez del parámetro visibilidad, el “alcance visual de pista”, distancia hasta la que puede ver el piloto al aterrizar objetos o

balizas iluminadas". OACI ha establecido las siguientes categorías en las aproximaciones de precisión:

- CAT I . Puede operarse con alcances visuales de pista de al menos 600 metros y techo de nubes de 60 metros.
- CAT II . Puede operarse con alcances visuales de pista de 400 metros y techo de 30 metros
- CAT IIIA. Puede operarse con alcances visuales de pista de 200 metros y techo o visibilidad vertical de 15 metros.
- CAT IIIB. Puede operarse con alcances visuales de pista de 50 metros y prácticamente sin visibilidad vertical.
- CAT IIIC. Se opera con visibilidad y techo nulos. Solo se utiliza en operaciones militares.

Los límites señalados pueden variar ligeramente de un lugar a otro. La operación en cada tipo de categoría requiere unas ayudas de precisión en el aeródromo, instrumentación adecuada en el avión e instrucción periódica específica a la tripulación. En España la casi totalidad del aeropuertos aptos al tráfico comercial pueden operar en CAT I, varios en CAT II y solamente uno en CAT IIIA. Son contadísimos en el mundo los aptos para CAT IIIB. La dotación de ayudas a cada aeródromo es función de su utilización y de la frecuencia de nieblas. Así, en Las Palmas donde hay un episodio de nieblas cada diez años, no estaría justificado el dotarlo para CAT III.

El estudio de la frecuencia de nieblas en un determinado lugar puede hacerse con métodos de la climatología convencional siempre que el periodo estudiado al menos sea de cinco años. Debe estudiarse no solamente la probabilidad de simple ocurrencia, sino también la probabilidad para cada hora y mes (fig. 1). (LINÉS, 1992)

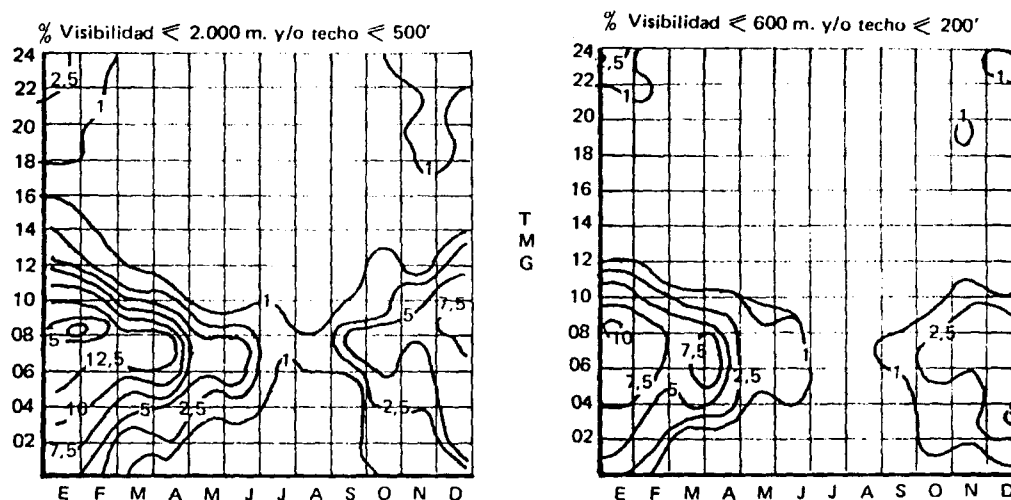


Fig. 1: Probabilidades de baja visibilidad en Sevilla.

Hay algunos comportamientos de la capa límite sumamente complejos en relación con las nieblas. Uno es la especificación de frecuencias de nieblas bajas y nieblas altas. La niebla no suele exceder de los 300 metros de espesor. Es un fenómeno típico en su totalidad de la capa límite. Se llama niebla alta aquella en que visibilidad horizontal disminuye con al altura y niebla baja la contraria; esta última es particularmente desfavorable, porque establecido por el piloto contacto visual con las luces de aproximación, puede perderlo después con niebla baja.

Estas últimas son las potencialmente más peligrosas. La estructura vertical de la niebla es función de la naturaleza de la capa límite. Parece que en nuestro entorno las nieblas de radiación son más frecuentemente altas; sin embargo, en las fases de formación y de disipación pueden ofrecer características de niebla baja. Es un tema pendiente de investigación, y no suficientemente tratado desde una óptica climatológica.

### 3. VIENTO EN LA CAPA LÍMITE

De los elementos del clima, es quizá el de más complejo estudio el viento. En primer lugar hay que señalar que se trata de un parámetro de gran variabilidad en el tiempo y en el espacio tridimensional. Al ser una magnitud vectorial su tratamiento estadístico es complejo; no tiene sentido hablar de un viento medio si se tiene en cuenta a la vez su velocidad y su dirección.

Para los usos climatológicos se recurre a las frecuencias y al estudio separadamente de velocidades escalares y direcciones vectoriales con los problemas que conlleva tal dicotomía. Además, en el viento, salvo en la misma superficie terrestre, tiene tres componentes de las cuales la vertical complica mucho las cosas y no siempre es insignificante.

Otro problema añadido es el de los movimientos verticales de carácter convectivo, que se unen a los debidos al viento. En el caso de movimiento turbillonario es complejo el identificar el valor del viento en un punto determinado.

El viento es tal vez el parámetro meteorológico que globalmente influye más en la operación de vuelo, en particular dentro de la capa límite. El despegue o el aterrizaje debe hacerse con viento en calma, con viento de cara o con debilísima componente de cola. El viento cruzado limita la operación, sobre todo cuando la pista está húmeda y es casi prohibitivo con la pista helada.

Los datos puntuales de viento empleados en los estudios climatológicos de los aeródromos no son siempre suficientes. Aparte de ellos, serían muy deseables líneas medias de flujo a diferentes niveles y no pueden quedar suplidas por mapas de topografías de superficies de presión constante. Mediante el Radar Doppler se abre un posible camino de investigación. En aeródromos próximos a litoral y es el caso de muchos en España, existe el problema de la integración de la brisa en el viento geostrófico, a veces muy característico como en el caso de los Alisios en Canarias. Puede haber una gran variabilidad en la dirección y en la velocidad; el aeródromo de Valverde, en Hierro, es buen ejemplo. El análisis de la rafagosidad es importante al hacer una evaluación climatológica de la capa límite.

Por efecto del rozamiento, en el suelo el viento es en general menor que el geostrófico y aparece desviado hacia las bajas presiones. Al elevarnos, el efecto del rozamiento disminuye y el viento

gira a la derecha hasta superarse la capa de fricción, donde toma la dirección y velocidad geostrofica. Al descender, en cambio, el giro es hacia la izquierda.

Como resumen podemos decir que quizá sea la modelización del viento el problema número uno al estudiar en profundidad el comportamiento de la capa límite en las operaciones de vuelo.

#### 4. CIZALLADURA DEL VIENTO

Podemos definirla como un cambio de dirección y/o velocidad del viento en el espacio, incluyendo tanto ascendencias como descendencias. La cizalladura del viento también se designa como “cortante de viento” aunque la expresión más usual es la expresión en inglés, “*wind shear*”. En otras palabras, es el gradiente vertical, longitudinal o lateral del viento.

Suelen distinguirse estos tipos de cizalladura:

“Wind shear” o cizalladura vertical, como el cambio de la componente horizontal del vector viento con la altura, tal como puede ser medido por dos o más anemómetros montados a diferentes alturas sobre el mismo mástil.

“Wind shear” o cizalladura horizontal, como el cambio en la componente horizontal del viento con la distancia, tal como puede ser medido por dos o más anemómetros montados a la misma altura en diferentes sitios a lo largo de la pista.

Cortantes ascendentes o descendentes, como cambios en la componente vertical del viento con la distancia horizontal.

Sobre todo cuando es súbito, un encuentro con un fenómeno de *wind shear* crea una situación comprometida para el piloto y cuando es muy intenso, puede ir más allá de la capacidad de recuperación en modernos aviones con pilotos experimentados.

Los fenómenos más intensos de cizalladura en la capa límite suelen estar asociados con nubes de tormenta, con el paso de un frente, una fuerte inversión de temperatura, un máximo de viento a baja altura o una capa de fricción turbulenta. Cuando hay viento fuerte en superficie, la topografía o los edificios pueden agravar la situación.

##### 4.1. “*Wind shear*” de origen topográfico

Los obstáculos, tanto naturales como artificiales, pueden perturbar el flujo laminar del viento y producir cizalladura de intensidad muy variable; depende de la intensidad y dirección del viento respecto del obstáculo. Un cambio de pocos grados en la dirección del viento puede ser suficiente para crear un episodio significativo de “*wind shear*”. Un caso, generalmente fuera ya de la capa límite, puede darse cuando sopla el viento sobre una cadena montañosa, con ondas estacionarias e incluso a veces nubes rotor a sotavento. No es raro asimismo el efecto túnel, cuando el viento sopla a baja altura entre dos colinas o a lo largo de un valle, e incluso entre dos edificios grandes; puede presentarse un cambio en dirección y aumento de intensidad.

En algunos aeropuertos, los edificios terminales cerca de las pistas pueden dar lugar a importantes efectos locales y problemas típicos de “*wind shear*”, tales como pérdida de velocidad o un cam-

bio brusco de componente lateral, que llegan a dificultar el despegue de aviones. Es decir, el estudio climatológico previo de la capa límite puede resultar después poco representativo. En pequeños aeródromos, a veces una línea de árboles basta para enmascarar el flujo del viento y causar aterrizajes bruscos.

Por ejemplo, un avión a 300 metros sobre el suelo, puede tener una componente de cara de 30 Kts. aunque el informe de tierra reporta solo una componente de cara de 10 Kts. en la pista. La diferencia de 20 Kts. puede irse absorbiendo suavemente y el efecto final puede ser el de un gradiente de viento razonable; por el contrario, puede que a 100 metros del suelo todavía haya 30 Kts. de cara. Es evidente que el cambio, cuando ocurra, será mucho más brusco y sus efectos mucho más marcados. El “*wind shear*” implica una capa de transición muy estrecha; puede darse el caso que los 20 Kts. se pierdan en una distancia vertical de sólo algunas decenas de metros.

El mayor peligro está en una pérdida de sustentación cuando ocurre muy cerca del suelo; es el caso de una brusca disminución de la componente de cara o brusco aumento de la componente de cola, unido o no a una descendencia.

#### **4.2. *Wind shear* inducido.**

Damos este nombre a un efecto similar a propio “*wind shear*” pero creado por el mismo avión. (LINÉS, 1992). Es el caso, por ejemplo, de un despegue con viento fuerte seguido por un viraje acusado; el avión pierde sustentación al pasar de un fuerte componente en cara a un viento lateral o de cola.

También puede presentarse en las aproximaciones llamadas “en circuito”, cuando el avión ha de aterrizar, por el viento, en una cabecera no dotada de ayudas de precisión; iniciada una aproximación normal, el avión vuela paralelo a la pista, con viento en cola, hasta rebasar el extremo opuesto, en que realiza una aproximación visual. Al acercarse al suelo, el avión de tener un viento en cola pasa a tenerlo en cara con un progresivo aumento de la sustentación. Evidentemente, el riesgo en este caso es mínimo.

#### **4.3. Tormentas**

La tormenta, considerada en su totalidad, es un fenómeno que va mucho más allá de la capa límite. Por ello, nos ceñiremos a estudiar los flujos de viento alrededor de la base de la nube tormentosa y su incidencia en la capa límite por ser los causantes de los casos más severos de cizalladura.

Merecen destacarse los siguientes aspectos de las tormentas:

##### **4.3.a. Gran ráfaga descendente o reventón (*Gust front*).**

Cuando en los comienzos de una tormenta hay una gran descendencia o “reventón” descendente de aire frío, éste fluye en todas direcciones, pero tiene tendencia a ser más intenso en la dirección de la marcha de la tormenta (fig. 2). En los peores casos, las rachas frías alcanzan hasta 20 km. por delante del centro de la tormenta, o más, si se trata de una línea organizada de tormentas, y puede afectar desde el suelo hasta unos 1.500 metros. Todo el área afectada será muy turbulenta y además puede tener una cizalladura vertical muy intensa. El borde delantero del frente (primera

racha) es a menudo un área sin precipitaciones, no detectable por el radar. El avión puede encontrarlo sin preaviso.

A veces, en tormentas menos intensas, hay un período de fuertes rachas justo antes del comienzo de la precipitación intensa, como una especie de frente en miniatura, muy desagradable de atravesar en vuelo.

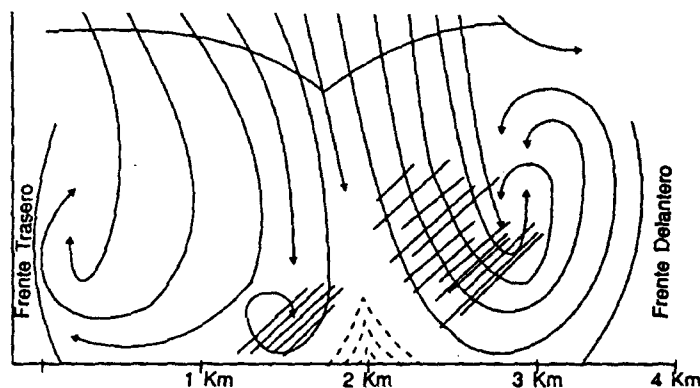


Fig. 2. Esquema típico de una ráfaga descendente. En rayado zonas de flujo más violento. En el centro en puntos, el cono de calma.

#### 4.3.b. Microrreventones (Downburst)

Son unas descendencias de aire muy concentradas y potentes, de a lo sumo unos 5 Km. de diámetro, y una duración de 1 a 5 minutos. Cuando son debidos a una tormenta, han probado ser los mayores riesgos meteorológicos de los conocidos, con velocidades descendentes del orden de 60 Kts. o más. Si en la aproximación final un piloto encuentra una racha descendente de unos 40 kts, el ángulo de planeo descendente pasa de ser unos  $3^\circ$  a ser de unos  $18^\circ$ . Valores mayores en las velocidades de las descendencias muy fácilmente son fatales para los aviones ya muy próximos al suelo. El incremento en el ángulo de descenso  $\zeta$  vale (LEDESMA,1978)

$$\zeta = K w/V$$

donde  $w$  es la velocidad de la racha y  $V$  la del avión y  $K$  un coeficiente de ajuste de unidades.

Una gran caída vertical de aire suele presentarse en las tormentas al iniciarse el estado de madurez; al llegar al suelo tiende a abrirse en todas direcciones, con reducción de su velocidad. Este fenómeno se inicia muy por encima de la capa límite, pero sus peores efectos tienen lugar dentro de ella.

## 5. TURBULENCIA

En la capa de fricción siempre hay cizalladura vertical, aunque normalmente se trata de un cambio gradual de velocidad, con el que están familiarizados todos los pilotos. Sin embargo, puede

existir cierto riesgo cuando aparece súbitamente un cambio de velocidad brusco, lo que puede ocurrir en dos situaciones:

- (a) En noches claras, con una fuerte inversión por radiación se puede formar un máximo de viento a baja cota, justo encima o en el propio límite superior de la inversión.
- (b) En algunas ocasiones, una inversión en baja cota puede desencadenar un flujo de viento relativamente fuerte más arriba, el cual fluye sobre aire en el suelo quieto o muy lento; la capa de separación de ambos puede presentar un fuerte *wind shear*.

### 5.1. Capa de fricción turbulenta.

Dentro de la capa de fricción la turbulencia puede originar un potencial peligro por *wind shear* en dos situaciones diferentes:

- (a) Viento intenso en superficie generalmente caracterizado o por fuertes rachas y calmas intermitentes. En términos generales, cuanto mayor es el viento, mayores son las rachas y las calmas.
- (b) En países cálidos, debido al intenso caldeo del suelo, puede darse una capa con considerable turbulencia convectiva; para algunos autores es la capa límite.

### 5.2. Torbellinos de estela

Son producidos en los extremos de los planos y son muy importantes en el caso de aeronaves a reacción, sobre todo si son de fuselaje ancho (fig. 3). Estos torbellinos ofrecen cierto riesgo para la aeronave que viene detrás sobre todo si es ligera. Un viento lateral puede desplazarlos y su duración puede ser de algunos minutos. No parece sencillo evaluar su efecto en la capa límite en un estudio climatológico de la misma.

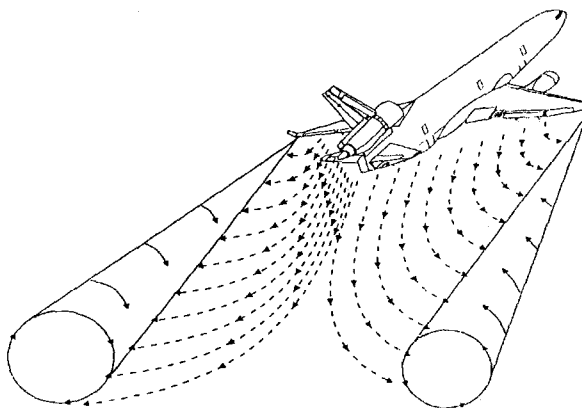


Fig. 3. Torbellinos de estela

## 6. TEMPERATURAS EXTREMAS

Las temperaturas elevadas inciden en el rendimiento de los motores y pueden penalizar sensiblemente la carga comercial del avión. También las ruedas y los sistemas de frenada son sensibles a



las altas temperaturas. En días totalmente encalmados, en las horas de más intensa radiación, la temperaturas sobre la pista puede ser algún grado superior a la registrada en el puesto de observación, ello debido a la intensa radiación infrarroja del pavimento. Este fenómeno no es sencillo de reflejarse en un estudio climatológico del aeródromo.

En tiempo frío, el comportamiento de la capa límite sobre la pista es de notable importancia. La nieve precipitada si posteriormente se hiela por enfriamiento nocturno u otra causa, puede dejar inoperativo al aeródromo, y en cualquier caso, queda muy limitada la frenada y la operación de aterrizaje o despegue con viento cruzado. Es muy recomendable rociar el avión con mezcla antiengelante para impedir una brusca formación de hielo en el despegue, que puede ser fatal en el momento de iniciar el despegue.

## 7. CONCLUSIÓN

El comportamiento de la capa límite en el entorno de un aeródromo, y sus aspectos climatológicos es esencial en el desarrollo de las operaciones de vuelo en dicho aeródromo. La modelización de los parámetros involucrados no resulta sencilla y algunos de ellos no pueden ser analizados solamente por los métodos de la Climatología convencional.

## 8. REFERENCIAS

- GARRATT, J.R. (1992): *"The atmospheric boundary layer"*. Cambridge, Atmospheric and space sciences series.
- LEDESMA JIMENO, M. (1978): *"Turbulencia atmosférica"*. Iberia.
- LINÉS ESCARDÓ, A. (1992): *"Climatología Aeronáutica"*. Iberia.
- LINÉS ESCARDÓ, A. (1992): *"Compendio de la Operación de Vuelo"*. Iberia.
- PAL ARYA. (1988):. *"Introduction to Micrometeorology"*. International Geophysics Series. Acad. Press. Inc. N.York.