ENAIRE

# Conceptos básicos de Meteorología Aeronáutica

# Contenido

1. La Meteorología en el contexto aeronáutico. 4
1.1. Meteorología y Aviación. 4
1.2. Organización del servicio meteorológico para la Navegación Aérea internacional. 5
1.3. La obtención de datos meteorológicos. 8
2. Conceptos básicos de la Atmósfera. 10
2.1. Composición química de la atmósfera. 10
2.2. El agua en la atmósfera. 11
2.3. Propiedades físicas de la atmósfera. 12
2.4. Presión atmosférica. 12
2.5. Temperatura. 15
2.6. Densidad. 16
2.7. Humedad. 17
2.8. Estructura física de la atmósfera: Capas. 18
2.9. Estabilidad e inestabilidad de la atmósfera. 21
2.10. ANEXO: la atmósfera en la aviación. 21
2.10.1 La atmósfera estándar. 21
2.10.2 Altimetría. 23
2.10.3 Altímetro y su calado. 24
2.10.4 Niveles de vuelo. 25
2.10.5 Altitud, nivel y capa de transición. 26
3. Radiación en la Atmósfera. 27
3.1. Tipos de radiación. 27
3.2. Balance radiactivo. 28
3.3. Intercambio de calor en la atmósfera. 29
4. Circulación general atmosférica. 31
4.1. Modelos. 31
4.1.1 Modelo simple con una tierra inmóvil. 31
4.1.2 Modelo realista con la rotación de la Tierra. 32
4.2. Fuerza de Coriolis. 33
4.2.1 Consecuencias de la Fuerza de Coriolis: vientos. 33
5. Viento: conceptos básicos. 34
5.1. Convergencia/Divergencia. 34
5.2. Subsidencia. 35

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

5.3. Vientos debidos a las zonas de alta o baja presión. 35
5.4. Corriente en chorro. 35
6. Anticiclones y depresiones. 36
7. Masas de aire y frentes. 38
7.1. Masas de aire. 38
7.2. Frentes. 39
8. Variables meteorológicas. 41
8.1. Nubosidad. 41
8.1.1 Formación de las nubes. 41
8.1.2 Clasificación de las nubes. 42
8.1.3 Nubosidad y techo de nubes. 46
8.2. Visibilidad. 47
8.3. Precipitación. 49
8.3.1 Tipos de precipitación. 49
8.4. Viento. 50
8.4.1 Vientos locales: brisas. 51
8.4.2 Vientos locales: Efecto Foehn. 52
9. Fenómenos meteorológicos peligrosos para el vuelo. 53
9.1. Visibilidad reducida. 53
9.1.1 Nieblas y neblinas. 55
9.2. Ilusiones ópticas. 56
9.3. Engelamiento. 56
9.4. Cizalladura. 59
9.5. Turbulencia. 60
9.6. Tormentas. 64
9.6.1 Líneas de turbonada. 67
9.6.2 Microrreventón. 67
9.6.3 Tornado/Tromba marina. 68
9.7. Ciclones tropicales. 69
9.8. Corrientes convectivas. 70
9.9. Temperaturas elevadas. 70

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

# 1. La Meteorología en el contexto aeronáutico.

## 1.1. Meteorología y Aviación.

La Meteorología es la ciencia interdisciplinaria, basada fundamentalmente en la Física de la Atmósfera, que estudia el estado del tiempo, el medio atmosférico, los fenómenos allí producidos y las leyes que lo rigen.

Se debe distinguir entre el tiempo, que la Organización Meteorológica Mundial (0MM) define como el "estado de la atmósfera en un instante dado, definido por los diversos elementos meteorológicos y el clima, definida por la misma organización como la ""síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizadas por estadísticas a largo plazo de los elementos meteorológicos en dicho lugar".

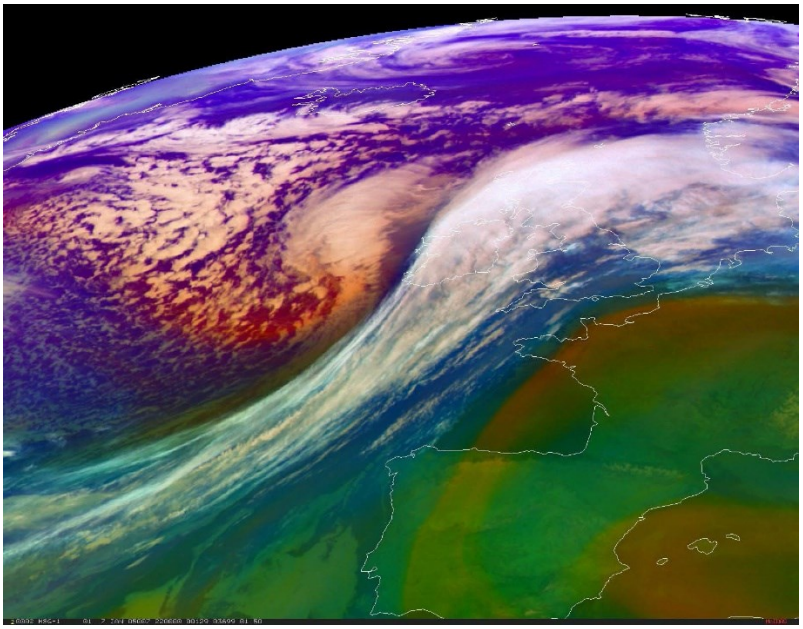


*Imagen de satélite de Europa Occidental, tratada para diferenciar masas de aire.*

Cuando la Meteorología se ocupa de los fenómenos y variables meteorológicos que afectan a las operaciones de las aeronaves, tanto en tierra como en vuelo, se habla de Meteorología Aeronáutica.

La información meteorológica suministrada siempre presenta una doble vertiente:

- la información referente a la situación meteorológica observada en un momento relativamente reciente, que resulta necesaria para la prestación de los servicios aeroportuarios y de tránsito aéreo y que puede afectar tanto a las distintas fases del vuelo como a los movimientos de las aeronaves en plataforma.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

- la información relativa a la situación meteorológica prevista, que permite anticiparse a la misma y adoptar decisiones, al objeto de optimizar las operaciones o mitigar los efectos negativos de los fenómenos meteorológicos. Debido a la propia inexactitud e incertidumbre inherente al desarrollo de los fenómenos atmosféricos, el valor especificado del pronóstico debe entenderse como el valor más probable que pueda tener dicho elemento durante el periodo del pronóstico.

La información meteorológica es primordial y debe estar disponible de forma adecuada para los siguientes destinatarios:

- Los operadores y los miembros de la tripulación de vuelo para la planificación previa al vuelo y durante el vuelo.
- Los proveedores de servicios de tránsito aéreo y de servicios de información de vuelo,
- Las unidades de servicio de búsqueda y salvamento, y
- Los aeropuertos.

## 1.2. Organización del servicio meteorológico para la Navegación Aérea internacional.

El servicio meteorológico prestado a la navegación aérea internacional está regulado por el Anexo 3 de OACI, y establecido de acuerdo con los siguientes principios fundamentales:

a. La finalidad del servicio meteorológico para la navegación aérea internacional es contribuir a su seguridad operacional, regularidad y eficiencia de la navegación aérea internacional.

b. Cada estado miembro determina el servicio meteorológico que presta en el espacio aéreo situado sobre su territorio y, si fuera el caso, sobre aguas internacionales u otras áreas situadas fuera del territorio del Estado interesado. Para ello tiene en cuenta los acuerdos regionales de navegación aérea establecidos para las regiones[1] de OACI a las que pertenezca su espacio aéreo.

En lo relativo a la meteorología aeronáutica, la OACI trabaja en estrecha cooperación con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que es un organismo especializado de las Naciones Unidas.

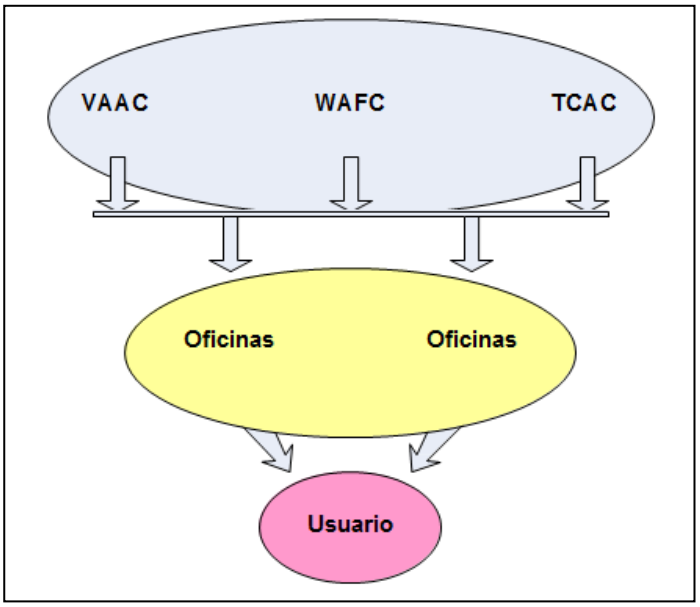
[1] Las regiones de la OACI están explicadas en el Tema de Instituciones y Legislación Aeronáuticas, punto 2.1.5 b)

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

## Conceptos básicos de Meteorología Aeronáutica

El servicio meteorológico a la navegación aérea internacional presta a través de los siguientes centros y oficinas que operan de forma interrelacionada:

| ÁMBITO EN QUE SE PRESTA EL SERVICIO | OFICINA RESPONSABLE |
|---|---|
| Mundial | Centros Mundiales de Pronóstico de Área (WAFC) |
| Regional | Centros de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAAC)<br><br>Centros de Avisos de Ciclones Tropicales (TCAC)<br><br>Centros Meteorológicos Regionales Especializados para el Transporte y Dispersión de Materiales Radiactivos en la Atmósfera (CMRE) |
| FIR[2] | Oficinas de Vigilancia Meteorológica. |
| Aeródromo | Estaciones Meteorológicas Aeronáuticas. |




En el siguiente cuadro podremos ver y comparar cómo funcionan dichos centros

[2] El FIR está explicado en el Tema de Instituciones y Legislación Aeronáuticas, punto 4.7.3

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

## Conceptos básicos de Meteorología Aeronáutica

| | | | |
|---|---|---|---|
| **WAFC** | Función | Centro meteorológico designado para preparar y expedir pronósticos del tiempo significativo y en altitud en forma digital a escala mundial directamente a los Estados utilizando los servicios basados en Internet del servicio fijo aeronáutico. | |
| | Oficinas | –Se compone de dos centros: el WAFC de Londres y el WAFC de Washington.<br>–En caso de interrupción de las actividades de uno de los WAFC, el otro WAFC asume sus funciones. | |
| | Información | Elaboran | • Pronósticos mundiales reticulares a diferentes niveles de viento, temperatura y humedad, etc.<br>• Pronósticos mundiales sobre fenómenos de tiempo significativo. |
| | | Reciben información | • Relativa a la liberación accidental de materiales radiactivos a la atmósfera y pronósticos de su evolución de los Centros Meteorológicos Regionales Especializados para incluirla en sus pronósticos.<br>• Sobre cenizas volcánicas de los Centros de avisos de cenizas volcánicas (VAAC)para incluirla en sus pronósticos.<br>• Sobre los Centros de avisos de ciclones tropicales (TCAC), para incluirla en sus pronósticos. |
| **VAAC** | Función | Centro meteorológico designado en virtud de un acuerdo regional de navegación aérea para proporcionar información de asesoramiento sobre la extensión lateral y vertical y el movimiento pronosticado de las cenizas volcánicas en la atmósfera a:<br>– las oficinas de vigilancia meteorológica,<br>– los centros de control de área,<br>– los centros de información de vuelo y<br>– los centros mundiales de pronósticos de área.<br>– los bancos internacionales de datos OPMET. | |
| | Oficinas | Existen nueve VAAC por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y en estrecha cooperación con la OMM y la Unión internacional de Geodesia y Geofísica (UIGG). | |
| | | Gestión de dichos centros | • Está a cargo de algunos Miembros de la OMM que han aceptado esa responsabilidad y proporcionan información meteorológica en apoyo del sistema de vigilancia de los volcanes en las aerovías internacionales.<br>• Mantendrán la vigilancia 24 horas al día.<br>• En caso de interrupción del funcionamiento de un VAAC sus funciones las llevará a cabo otro VAAC. |
| **TCAC** | Función | Centro meteorológico designado en virtud de un acuerdo regional de navegación aérea para proporcionar a las oficinas de vigilancia meteorológica, a los centros WAFC y a los bancos internacionales de datos OPMET información sobre la posición, la dirección y la velocidad de movimiento pronosticadas, así como de la presión central y el viento máximo pronosticados en la superficie de los ciclones tropicales. | |
| | Oficinas | Los siete TCAC asumen la responsabilidad regional de suministrar avisos y comunicados sobre todos los ciclones tropicales, huracanes o tifones en todo el mundo. | |
| **CMRE** | Función | Se han designado varios Centros Meteorológicos Regionales Especializados (CMRE) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) con la responsabilidad de proporcionar mapas de pronósticos (productos) para la trayectoria y depósitos de materiales radiactivos liberados a la atmósfera. | |
| | Oficinas | Son ocho centros: Beijing, Exeter, Melbourne, Montreal, Obninsk, Tokio, Toulouse y Washington. | |
| **Oficinas de vigilancia meteorológica** | Función | –Mantendrán la vigilancia continua de las condiciones meteorológicas que afecten a las operaciones de vuelo dentro de la región o regiones de información de vuelo asignadas.<br>–Prepararán y difundirán información sobre la presencia prevista de fenómenos meteorológicos en ruta especificados, que puedan afectar a la seguridad de las operaciones dentro de la región o regiones de información de vuelo asignadas.<br>–Proporcionarán la información recibida sobre actividad precursora de erupciones volcánicas, erupciones volcánicas y nubes de cenizas volcánicas. | |

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | –Proporcionarán la información recibida sobre liberación accidental de materiales radiactivos a la atmósfera en el área sobre la que mantienen vigilancia. | |
| | Oficinas | –En España hay dos Oficinas a cargo de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), una en Valencia para el FIR Madrid y para el FIR Barcelona, y otra en Las Palmas de Gran Canaria para el FIR Canarias. | |
| **Oficinas meteorológicas** | Función | –Cada Estado contratante establecerá una o más oficinas meteorológicas de aeródromo para el suministro del servicio meteorológico necesario que permita atender las necesidades de la navegación aérea internacional.<br>–Prepararán pronósticos de las condiciones meteorológicas locales del aeródromo o aeródromos.<br>–Mantendrán una vigilancia meteorológica continua en los aeródromos, para los cuales haya sido designada, para preparar pronósticos<br>–Suministrarán exposiciones verbales, consultas y documentación de vuelo a los miembros de las tripulaciones de vuelo o a otro personal de operaciones de vuelo.<br>–Proporcionarán • Otros tipos de información meteorológica a los usuarios aeronáuticos, así como la información meteorológica disponible.<br>• La información recibida sobre cenizas volcánicas a la dependencia de servicios de tránsito aéreo, a la dependencia de servicios de información aeronáutica y a la oficina de vigilancia meteorológica asociadas. | |
| | Oficinas | Estaciones meteorológicas aeronáuticas (EMAe) | ◊Realizan las observaciones meteorológicas ordinarias y especiales del aeródromo y la vigilancia del tiempo presente (principalmente, informes METAR/SPECI).<br>◊AEMET tiene oficinas meteorológicas en los 40 aeropuertos de la red de AENA y 8 bases aéreas abiertas al tráfico civil. |
| | | Oficinas meteorológicas de aeródromo (OMAe) | ◊Realizan la vigilancia meteorológica y las predicciones de aeródromo para los aeródromos bajo su responsabilidad (principalmente TAF, TREND y avisos de aeródromo).<br>◊Existen 5: Las Palmas, Madrid, Santander, Sevilla y Valencia. |
| **Estaciones meteorológicas aeronáuticas** | Función | Efectúan observaciones ordinarias a intervalos fijos de cada media hora o cada hora (para el METAR) y se completan con las observaciones especiales cuando ocurren cambios especificados con respecto al viento, la visibilidad, etc. | |
| | Oficinas | En España, están asociadas a las oficinas meteorológicas de aeródromo y su equipamiento de medida depende del número de pistas, de las categorías de las operaciones de aproximación y aterrizaje de esas pistas y de las características climatológicas del aeródromo. | |

## 1.3. La obtención de datos meteorológicos.

El objetivo de la observación meteorológica consiste en determinar o estimar el valor de diferentes variables y parámetros físicos que permiten conocer el estado de la atmósfera y preparar análisis, predicciones y avisos meteorológicos, así como realizar la vigilancia del clima. En base a ello:

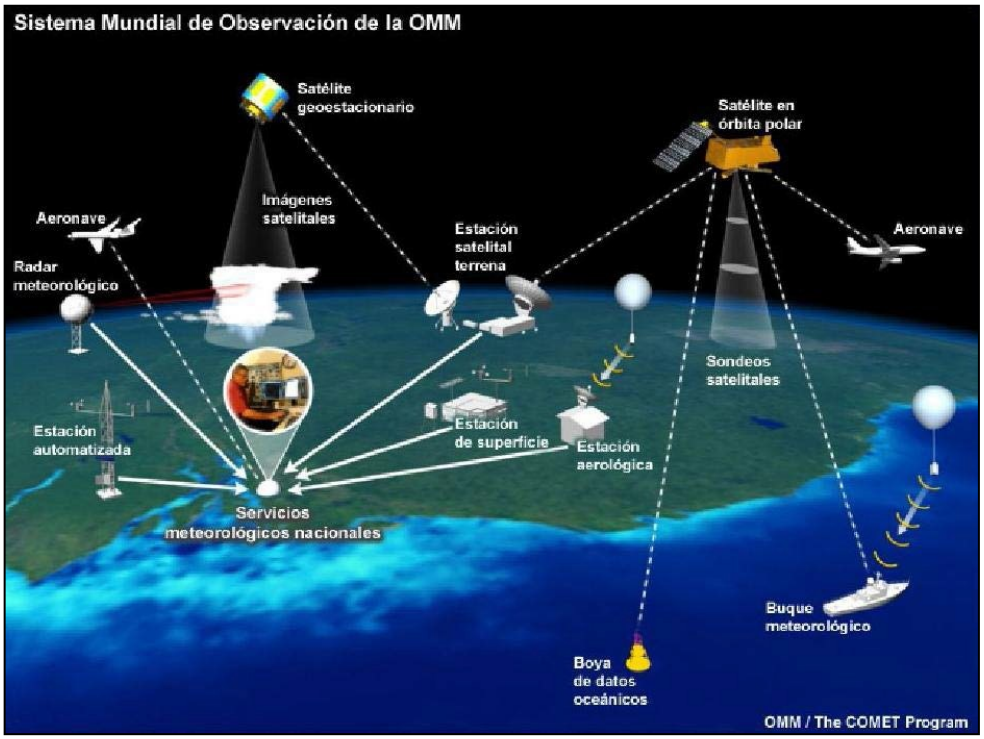
1. Gran parte de las variables se miden mediante sensores electrónicos incorporados a equipos automáticos de medida (presión, temperatura, etc.)
2. Algunas de las variables necesitan la participación experta de un observador de meteorología para su estimación (visibilidad, nubosidad, etc.).

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

3. Además de estas mediciones dentro del aeródromo, resultan necesarios otros datos en otros puntos de la atmósfera para conocer su estado en ruta, así como para realizar pronósticos de aeródromo y de área por parte de los predictores.
4. Las observaciones meteorológicas en altitud se realizan mediante sondeos, radar, red de descargas eléctricas, satélites meteorológicos y aeronaves.
5. Los sondeos aerológicos realizados en algunos aeródromos miden sobre la vertical de un lugar los valores de presión, temperatura y humedad. Se realizan lanzando globos sonda desde la estación de sondeo a las 00 y 12 UTC.
6. Las observaciones con radar de superficie y de a bordo, así como la red de descargas eléctricas, permiten determinar la posición de cumulonimbos y tormentas, así como relacionar las características de las imágenes obtenidas en la pantalla del radar con fenómenos adversos para el vuelo.
7. Por medio de los satélites meteorológicos se obtienen datos de altitud, medidas de temperatura y humedad y contenido de ozono, entre otros. Su aportación es fundamental en la localización de los sistemas nubosos, su naturaleza, extensión, desarrollo y movimiento.
8. Todo el ingente volumen de datos a nivel mundial necesario para monitorizar el estado de la atmósfera y alimentar los modelos numéricos se obtiene mediante el Sistema Mundial de Observación de la Organización Meteorológica Mundial.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Los diferentes elementos que intervienen en este sistema aparecen de forma esquemática en la siguiente figura:




*Red de elementos que intervienen en la monitorización del estado de la atmósfera.*

# 2. Conceptos básicos de la Atmósfera.

## 2.1. Composición química de la atmósfera.

La atmósfera es la cubierta gaseosa que rodea la Tierra y la envuelve. Aparte de esta masa gaseosa, la atmósfera contiene también, en menor grado, partículas sólidas en suspensión (polvo, humo, aerosoles y hielo) y partículas líquidas (gotas de agua).

La atmósfera en las proximidades del nivel del mar tiene la siguiente composición química:

- 78% de nitrógeno (N2).
- 21% de oxígeno (O2).
- 1% de otros gases (Ar, Ne, CO2, H2, O3…)

Esta mezcla de gases es lo que se define en meteorología como aire seco.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Sin embargo, en la atmósfera existe una cantidad de vapor de agua ($H_2O$ en estado gaseoso) que puede variar entre un 0,2% y un 3%.

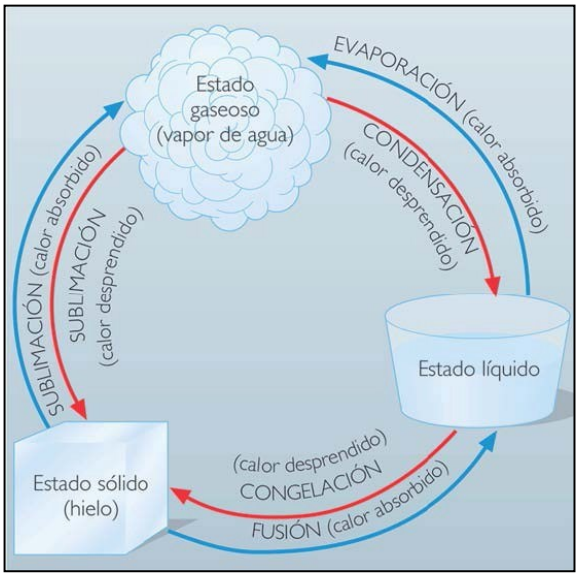
En meteorología se define el aire húmedo como la mezcla de dos gases: el aire seco y el vapor de agua.

## 2.2. El agua en la atmósfera.

El agua en la atmósfera puede encontrarse en tres estados:

- **Estado sólido:** Aparece en forma de nieve, granizo o cristales de hielo en algunas nubes.
- **Estado líquido:** Aparece en forma de lluvia, rocío o gotas de agua en algunas nubes.
- **Estado gaseoso**: Llamado vapor de agua está presente en el seno de la atmósfera casi por completo en la troposfera, y puede variar entre un 0.2% y un 3%. El vapor de agua en la atmósfera se encuentra en proporciones variables.

El agua cambia de un estado a otro mediante los procesos de evaporación, condensación, congelación, fusión y sublimación, como se muestra en la figura siguiente:




*Procesos de cambios de estado del agua*

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

En el ciclo hidrológico, el agua cambia de un estado a otro por distintos procesos naturales, fundamentalmente, evaporación, condensación y precipitación:

1. El agua que se encuentra en los mares y océanos en estado líquido se evapora, al igual que el líquido que reside en la vegetación u otras superficies (evapotranspiración).
2. El vapor de agua resultante reside en el seno de la atmósfera hasta que, en ocasiones y a través de distintos procesos, se condensa, formando las nubes.
3. Las gotitas de agua que forman las nubes crecen hasta que se produce la precipitación, por lo que una parte del agua es devuelta a la tierra y otra parte a los mares y al océano.

## 2.3. Propiedades físicas de la atmósfera.

A continuación, se describen las propiedades físicas que tiene la atmósfera por ser una mezcla de gases.

## 2.4. Presión atmosférica.

La atmósfera ejerce sobre los objetos que se encuentran en ella una presión debida al peso de los gases que la componen. Esta presión se ejerce por igual en todas las direcciones.

La presión atmosférica sobre una superficie es igual al peso ejercido sobre esa superficie por la columna de aire que se extiende desde esa superficie hasta el límite exterior de la atmósfera:

$$P = F/S = mg/S$$

FACTORES QUE AFECTAN A LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

**1. Altura/altitud.**

La presión atmosférica no es la misma en todos los puntos de la atmósfera, sino que depende de la altitud, ya que, a medida que aumenta la altitud desde un punto cualquiera, disminuye la altura de la columna de aire que hay sobre él y, por tanto, el peso que ésta ejerce. Es decir, la presión disminuye según aumenta la altitud.

En términos generales, la relación entre la presión y la altura se puede observar directamente en la fórmula anterior si se sustituye la masa en función de la densidad y el volumen, que es equivalente al producto de la superficie por la altura:

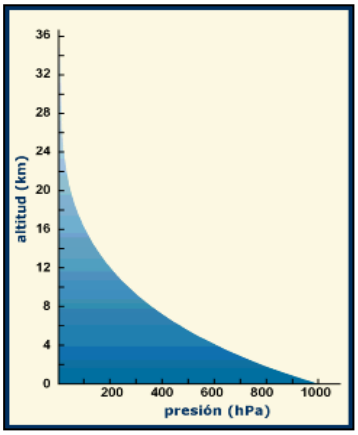
$(m = \rho dV = \rho dSh)$.

$$P = \rho dShg/S = \rho dgh$$

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Siendo “d” la densidad, “S” la sección, “V” el volumen, “h” la altura y “g” la constante gravitatoria.

Sin embargo, el descenso de la presión con la altitud no es lineal. Si bien en los primeros metros la presión disminuye a razón de 1mb por cada 9 metros (30 ft) de altitud de forma aproximadamente lineal, el descenso adquiere después una forma exponencial como la representada en la gráfica siguiente:




*Variación de la presión atmosférica con la altitud*

**2. Temperatura.**

Por otro lado, la presión depende también de la temperatura de la columna de aire en la atmósfera. Por tanto, la presión variará en función de:

a. **El momento del día**: Esta variación es menor de 1hPa en las zonas templadas siendo prácticamente nula en los polos. Presenta dos máximos hacia las 10 y 22 horas y dos mínimos hacia las 4 y 16 horas.

b. La época del año.

c. **El movimiento de las masas de aire**: Un cambio de la masa de aire que afecta a un punto de La Tierra suele tener asociado un cambio en la temperatura. Este cambio de temperatura produce perturbaciones irregulares en la presión.

En general, cuanto mayor es la temperatura del aire menor es su densidad y, por tanto, su presión es menor. Por el contrario, cuanto más fría es su temperatura, mayor es su densidad y, por tanto, la presión aumenta.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

### 3. Orografía.

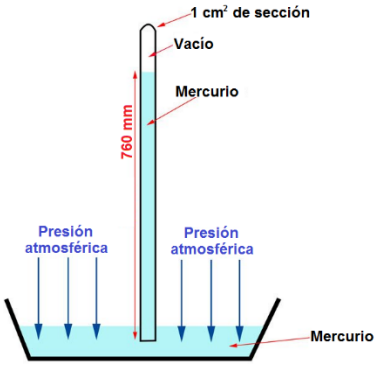
La presencia de accidentes orográficos puede provocar acumulaciones o déficits de masa de aire que, respectivamente, hagan aumentar o disminuir localmente la presión.

UNIDADES DE MEDIDA

Existen varias unidades para indicar la presión. Para establecer las equivalencias entre estas unidades se parte de la definición de la unidad "atmósfera".

Una atmósfera (1013,25 hPa) es igual al peso de una columna de mercurio de 1 $cm^2$ de sección y de 76 cm de altura. Esta unidad se estableció en el experimento de Torricelli, en el que se invirtió un tubo de vidrio lleno de mercurio de 1m de largo por 1cm2 de sección sobre una cubeta que contenía el mismo líquido.

El líquido de mercurio en el tubo descendió hasta una altura de 76 cm, debido a que la fuerza ejercida por la atmósfera fuera del tubo de vidrio estaba equilibrada con la que ejercía el mercurio dentro del tubo de vidrio.




*Experimento de Torricelli*

Equivalencia entre las 3 principales unidades de presión.

| Atmósfera (Atm) | Milímetros de mercurio (mm de Hg) | Milibares/ hectopascales (mb/hPa) |
|---|---|---|
| 1 | 760 | 1013.25 |

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

## 2.5. Temperatura.

La temperatura del aire es la medida de la energía cinética promediada de las moléculas que lo componen, que se hallan en continuo movimiento y que experimentan infinitos choques entre sí.

FACTORES QUE AFECTAN A LA TEMPERATURA

**1. Altura**

Se denomina gradiente térmico vertical a la variación de la temperatura con la altura.

a. Gradiente térmico positivo: la temperatura desciende con la altura.

b. Gradiente térmico negativo: la temperatura aumenta con la altura.

**2. Variación a lo largo del día**

La temperatura del aire presenta una variación diaria, mostrando normalmente un máximo aproximadamente dos horas después del mediodía, y un mínimo poco después del amanecer. El hecho de que los máximos y mínimos no aparezcan exactamente a mediodía o al ponerse el Sol, se debe a que lleva un tiempo el que el aire se caliente o enfríe al recibir la radiación solar (**inercia térmica**).

**3. La nubosidad**

Suaviza los máximos y mínimos al reflejar parte de la radiación solar y absorber parte de la radiación terrestre. Por tanto, la diferencia entre la temperatura máxima y mínima (**amplitud térmica**) es menor.

**4. El viento**

Con el viento se remueve el aire y, por tanto, se mezclan capas de aire a diferente temperatura. Esto hace que la variación diurna sea menos marcada.

**5. La naturaleza de la superficie terrestre en la que se mide la temperatura, así como la de la superficie circundante**

La variación diaria de temperatura será mayor en la superficie terrestre que en el mar y zonas costeras, al tener el agua un calor específico más bajo que las zonas terrestres.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Por otra parte, esta temperatura se verá influenciada por el flujo de aire caliente o aire frío que venga de las zonas circundantes debida a su naturaleza, con lo que también afectará a la variación diaria de temperatura.

ESCALAS

La temperatura se puede medir usando diferentes escalas. La temperatura de fusión y ebullición del agua para cada una de ellas se muestra a continuación:

| | PUNTO DE FUSIÓN DEL HIELO | PUNTO DE EBULLICIÓN DEL AGUA |
|---|---|---|
| ESCALA CENTÍGRADA | 0ºC | 100ºC |
| ESCALA KELVIN | 273,16 K | 373,16 K |
| ESCALA FAHRENHEIT | 32ºF | 212ºF |

*Puntos de fusión y ebullición del agua en las 3 principales escalas de temperaturas.*

Donde la relación entre la equivalencia de temperaturas en las escalas centígrada y Fahrenheit viene dada por la ecuación: $C=\frac{5}{9}\cdot(F-32)$, mientras que la escala centígrada y kelvin se relacionan mediante: K= C + 100.

## 2.6. Densidad.

La densidad es la masa que tiene un gas en la unidad de volumen, por tanto, es también el cociente de la masa entre el volumen del mismo:

$$\rho = m/V$$

Donde ρ es la densidad, m es la masa y V el volumen.

El volumen dependerá de la sección (S) y la altura (h):

$$V = S\,h$$

Sin embargo, la densidad (molar) del aire está relacionada con la presión y temperatura. Esta relación es consecuencia de la ecuación de estado de los gases perfectos que se define a continuación:

$$P= dRT$$

Siendo “P” la presión, “d” la densidad, “R” la constante de los gases ideales (R= 2870 hPa cm3/ Kg K) y “T” la temperatura.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Por tanto, a una presión constante, un aire es menos denso cuanto mayor es su temperatura y viceversa. De aquí se deduce también que, a una presión constante, la columna de aire más caliente será la menos densa y, por tanto, su altura será mayor; es decir, la columna de aire tiende a expandirse cuanto mayor es su temperatura.

## 2.7. Humedad.

La humedad ambiental de la atmósfera es la cantidad de vapor de agua que contiene.

FACTORES QUE AFECTAN A LA HUMEDAD

1. **Temperatura**

La cantidad de vapor de agua que un volumen de aire puede almacenar viene determinada por la temperatura. A mayor temperatura, mayor cantidad de vapor de agua puede almacenar.

Cuando un volumen de aire contiene la máxima cantidad de vapor de agua que puede almacenar se dice que este volumen de aire está saturado.

Los mecanismos por los que un volumen de aire se satura son:

- Disminuyendo la temperatura de un volumen de aire no saturado.
- Inyectando vapor de agua en un volumen de aire no saturado.

Una vez que el volumen de aire está saturado y no admite más vapor de agua, si se añade más vapor de agua o se enfría todavía más, una parte de este vapor de agua se transforma en agua líquida o, lo que es lo mismo, se condensa.

VALORES RELACIONADOS CON LA HUMEDAD

2. **La humedad relativa**

Es el cociente entre la cantidad de vapor de agua que realmente contiene un volumen de aire determinado a una temperatura dada y la cantidad de vapor de agua máxima que puede almacenar ese volumen de aire a la misma temperatura.

Por tanto, cuando el volumen de aire esté saturado, su humedad relativa será del 100%.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

### 3. El punto de rocío

Es la temperatura a la cual hay que enfriar un volumen de aire para saturarlo, manteniéndolo a presión constante. Es decir, es la temperatura a la que hay que enfriar un volumen de aire para que la humedad relativa sea del 100%.

Conocer el punto de rocío en superficie puede ayudar a predecir la posibilidad de presencia de nieblas, que aparecen en ocasiones cuando la temperatura del aire se aproxima o alcanza la del punto de rocío.

## 2.8. Estructura física de la atmósfera: Capas.

La atmósfera se divide verticalmente en cinco capas. Estas capas no son uniformes alrededor del globo terrestre, sino que dependen de la latitud a la que se encuentren en su vertical.

| | | |
|---|---|---|
| **TROPOSFERA** | Extensión | Se extiende desde la superficie hasta una altitud promedio de 8 Km en latitudes altas (tropopausa polar), mientras que en latitudes bajas se extiende desde la superficie hasta una altura promedio de 18 Km (tropopausa tropical) y en latitudes medias, de hasta 12 Km (tropopausa de latitudes medias). |
| | Temperatura y altitud | Desciende con la altitud hasta llegar a los -56,5ºC. |
| | Presión | La presión y la densidad también disminuyen con la altitud. |
| | Densidad | |
| | Vapor de agua | Contiene casi todo el vapor de agua y la mayor parte de la masa de la atmósfera y, además, se producen movimientos verticales muy marcados, lo que implica que la mayor parte de los fenómenos meteorológicos se produzcan en esta capa. |
| | Límite superior | El límite superior de la troposfera se llama **tropopausa** y puede considerarse como una superficie de discontinuidad donde la temperatura se mantiene constante en torno a aproximadamente -56ºC.<br>La tropopausa no es continua alrededor del todo el globo terrestre y existen unas “roturas” entre las tropopausas a diferentes latitudes, en donde se originan corrientes de viento muy fuertes denominadas **corriente en chorro**. |
| **ESTRATOSFERA** | Extensión | Esta capa se encuentra situada encima de la troposfera y se extiende desde la tropopausa hasta unos 50 o 55 Km de altitud. |
| | Temperatura y altitud | La temperatura asciende con la altitud, lo que se debe fundamentalmente a la abundancia de ozono en esta capa. |
| | Presión | La presión continúa descendiendo exponencialmente con la altitud, pero es tan sólo alrededor del 0.1% de la que existe a nivel del mar. |
| | Densidad | |
| | Vapor de agua | Su contenido de vapor de agua es pequeño y apenas hay nubes; sólo nubes nacaradas que se sitúan a 20 o 30 Km de altitud y topes de cumulonimbos que por inercia perforan la tropopausa alcanzando la parte más baja de la estratosfera. |

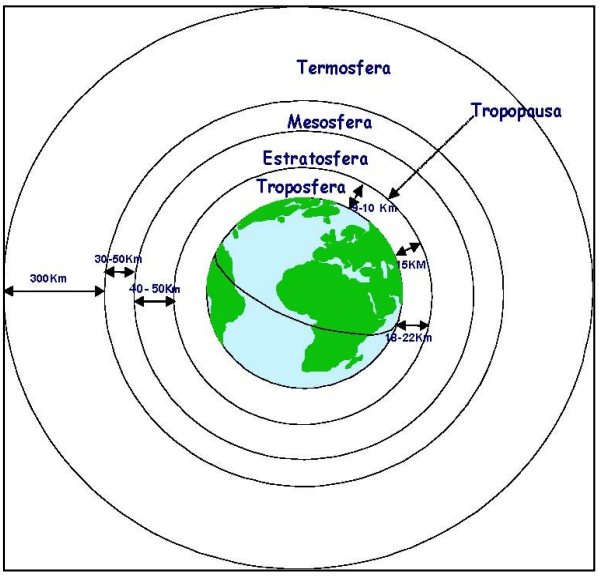
*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

| | | |
|---|---|---|
| | Límite superior | El límite superior de la estratosfera es denominado **estratopausa**, situada a 50 Km de altitud aproximadamente y a partir de la cual la temperatura disminuye de nuevo. |
| **MESOESFERA** | Extensión | Esta capa se encuentra situada encima de la estratosfera y se extiende desde la estratopausa hasta unos 80 Km de altitud. |
| | Temperatura y altitud | La temperatura disminuye con la altitud hasta alcanzar una temperatura de -95ºC aproximadamente. |
| | Presión | Disminuyen la presión y la densidad. |
| | Densidad | |
| | Vapor de agua | En esta capa no se forman apenas nubes, excepto en latitudes altas en las que, cuando el Sol se sitúa entre 5º y 13º, se pueden observar nubes noctilucentes[3]. |
| | Límite superior | El límite superior de la mesosfera se denomina **mesopausa** y se caracteriza porque es el nivel con la temperatura más fría de toda la atmósfera.<br>En este nivel es donde termina la atmósfera con una composición de gases homogénea. Esta zona donde la atmósfera es homogénea y comprende la troposfera, la estratosfera y la mesosfera recibe el nombre de **homosfera.** |
| **TERMOESFERA O IONOSFERA** | Extensión | Esta capa se encuentra situada encima de la mesosfera y se extiende desde la mesopausa hasta unos 500 Km. |
| | Temperatura y altitud | La temperatura aumenta con la altitud debido a la radiación solar, hasta alcanzar una temperatura de 1.100ºC. |
| | Presión | Disminuye. |
| | Densidad | A estas altitudes extremas las moléculas de gas se encuentran ampliamente separadas, quedando por tanto libres los átomos que las constituían. Al estar también libres los iones durante largos períodos de tiempo, la ionización es importante y da lugar a fenómenos como la aurora boreal. En el ámbito de las radiocomunicaciones, los iones presentes en esta capa pueden reflejar las ondas de radio, permitiendo la comunicación entre distintos lugares del globo terrestre. |
| | Vapor de agua | En esta capa no se forma ninguna nube. |
| | Límite superior | El límite superior de la termosfera se denomina termopausa. |
| **EXOSFERA** | Extensión | Esta capa es la última capa de la atmósfera, se encuentra situada encima de la termosfera y su espesor es muy elevado, hasta confundirse con el gas interplanetario. |

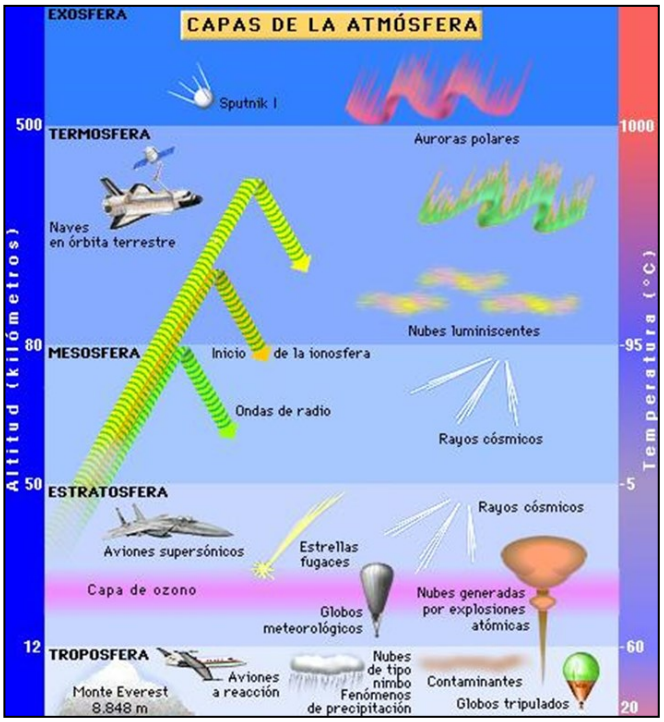
[3] Nubes formadas por cristales y polvo de meteorito que se ven en el crepúsculo con tonos azulados.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

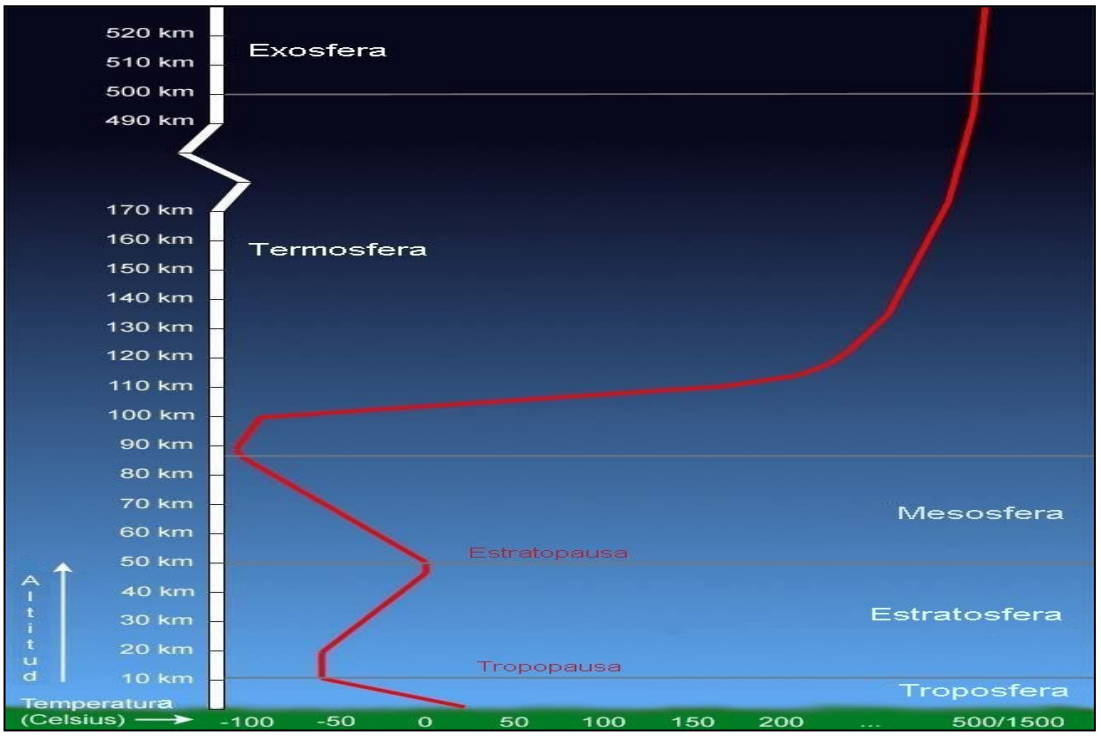
## Conceptos básicos de Meteorología Aeronáutica




Capas de la atmósfera y sus grosores.




Principales fenómenos presentes en cada capa de la atmósfera




Perfil vertical de la temperatura en la atmósfera.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

## 2.9. Estabilidad e inestabilidad de la atmósfera.

En la atmósfera, se define la estabilidad como la capacidad que tiene una masa de aire de resistirse al desplazamiento vertical desde su posición inicial o nivel de equilibrio.

A. La atmósfera será tanto más estable cuanto más difícil sea que se den los movimientos verticales en ella, e inestable en caso contrario.
B. La intensidad de los movimientos verticales dependerá de cuánto más o menos inestable sea la atmósfera.
C. En el aire, la inestabilidad se origina cuando una burbuja de aire está más caliente (es menos densa) que el aire que la rodea, y asciende. La estabilidad es la situación contraria, en la que la burbuja de aire está más fría que su entorno.

| | |
|---|---|
| Aire estable | ○ Cielo despejado o con nubes estratiformes<br>○ En las capas bajas, si hay humedad suficiente y sobre todo en invierno, pueden formarse nieblas.<br>○ El humo y los contaminantes, al no poder elevarse, reducen la visibilidad y disminuyen la calidad del aire. |
| Aire inestable | ○ Nubes a veces muy desarrolladas, chubascos y turbulencia.<br>○ Buena visibilidad, excepto dentro de las nubes y en caso de chubascos. |

## 2.10. ANEXO: la atmósfera en la aviación.

### 2.10.1 La atmósfera estándar.

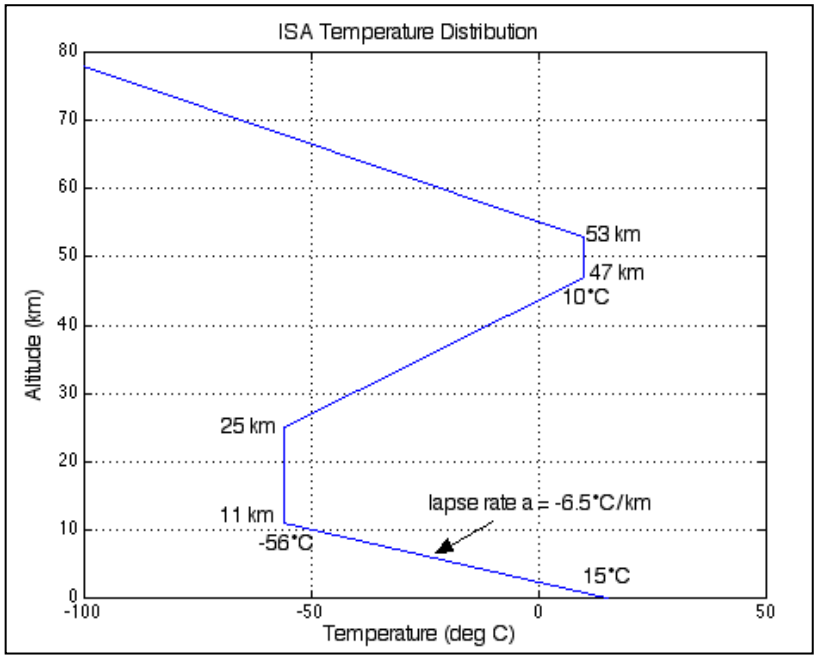
La determinación de la altitud se realiza a partir de una atmósfera ideal, no real, en la que la distribución de la presión, densidad y temperatura en la atmósfera es independiente de la latitud y época del año. Esta atmósfera la definió la OACI y fue denominada **atmósfera ISA** (International Standard Atmosphere).

La atmósfera estándar tiene las siguientes características:

1. Está formada por aire seco, considerado como un gas perfecto que obedece a la ley de los gases perfectos y con una masa molecular media de 0,02896442 kg/mol.
2. A nivel del mar tiene una temperatura de 15ºC (288,15 K), una presión de 1013,25 hPa (760 mm Hg) y una densidad de 1,2250 kg/m3.
3. La temperatura absoluta del punto de fusión del hielo es de 273,15º K.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

4. El gradiente térmico en la troposfera es de 2ºC por cada 1.000 ft de elevación (6,5ºC cada 1.000 metros) desde el suelo hasta la altitud de la tropopausa, donde la temperatura se encuentra alrededor de los – 56,5ºC, siendo el perfil vertical del resto de las capas el que se muestra en la figura siguiente:




*Perfil vertical de temperatura según atmósfera ISA.*

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Por tanto, en la atmósfera estándar queda fijado para cada valor de presión un valor de altitud junto con su temperatura. Algunos de estos valores son:

| ALTITUD (pies) | PRESIÓN (mb) | TEMPERATURA (C°) |
|---|---|---|
| 0 | 1.013,2 | 15 |
| 1.700 | 782 | 1,1 |
| 8.000 | 752 | -0,8 |
| 9.000 | 724 | -2,8 |
| 10.000 | 697 | -4,8 |
| 20.000 | 466 | -24,6 |
| 22.000 | 428 | -28,5 |

*Valores de presión y temperatura de la atmósfera ISA a distintas altitudes.*

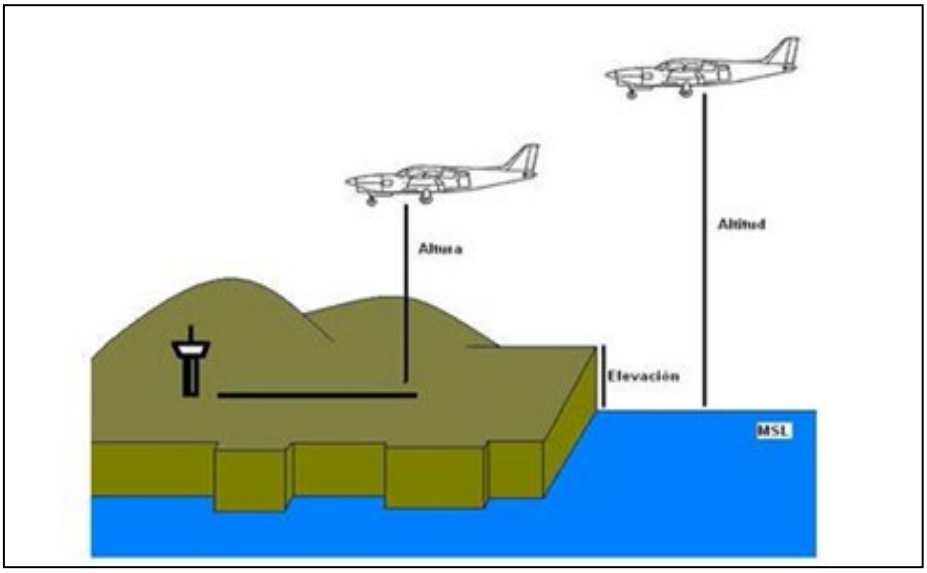
La atmósfera estándar es utilizada sólo para aplicaciones aeronáuticas. En la práctica, las constantes fluctuaciones de la presión y la temperatura en la atmósfera, así como la diferencia de estas variables según la latitud, hacen que la atmósfera real pueda diferir significativamente de la atmósfera ISA.

### 2.10.2 Altimetría.

La altimetría se ocupa de determinar la altitud de vuelo de la aeronave a partir del valor de presión medido.

- **La altura** es la distancia vertical entre un punto en el seno del aire y una superficie horizontal de referencia que generalmente es el suelo o superficie terrestre.
- **La altitud** es la distancia vertical entre un punto en el seno del aire y el nivel medio del mar (MSL).
- **La elevación** es la distancia vertical entre un punto del terreno y el nivel medio del mar.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*




*Representación gráfica de altura, altitud y elevación.*

### 2.10.3 Altímetro y su calado.

Los altímetros son los instrumentos que permiten determinar la posición vertical de la aeronave, indicando la altitud de la aeronave en función de la presión. Miden la presión atmosférica y, mediante el uso de las reglas de la altimetría y según la atmósfera ISA definida anteriormente, convierten dicha presión en la altitud a la que se encuentra el avión. Los altímetros son barómetros aneroides graduados para leer altitudes.

*Altímetro.*

En la atmósfera real se dan variaciones de presión y temperatura, por lo que la presión a nivel del mar en general no es de 1013.25 hPa. Por tanto, las altitudes indicadas por el altímetro obtenidas teniendo en cuenta las condiciones de la atmósfera ISA, pueden presentar diferencias con respecto a las altitudes reales.

Para obtener valores ajustados a las condiciones reales de presión resulta necesario ajustar o calar el altímetro a la presión real existente a nivel del mar o a la presión en un punto de la superficie de

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

altitud conocida. Inicialmente se ajusta el altímetro a cero metros (o al punto de la superficie de altitud conocida que corresponda, en su caso) y, seguidamente y a partir de esta referencia, el altímetro realiza las conversiones de presión a altitud.

**QNH:** Es la presión atmosférica del aeródromo reducida al nivel del mar en condiciones ISA. La indicación del altímetro de la aeronave será la altitud con relación al nivel medio del mar. Por tanto, cuando una aeronave se encuentre en tierra con este calado, el altímetro indicará la altitud del aeródromo en el que se encuentre.

**QFE:** Es la presión atmosférica del aeródromo medida por el barómetro de la oficina meteorológica del aeródromo. La indicación del altímetro será la altura. Por tanto, cuando una aeronave se encuentre en tierra con este calado, el altímetro indicará cero.

**QNE:** Es la presión estándar a nivel del mar. La ventanilla del altímetro se ajustará a la referencia de 1.013,25 hPa y así, la indicación del altímetro será la distancia a la superficie de presión de referencia 1.013,25 hPa. Los reglamentos aéreos establecen que todos los aviones vuelen en ruta con la misma presión de referencia (QNE). De esta manera, los aviones vuelan a determinados niveles de vuelo.

Los valores para reglar un altímetro a QNH o QFE no son fijos, ya que varían con el paso del tiempo y con el lugar de medición, así que es necesario ir actualizando estos valores obteniéndolos de la estación meteorológica más cercana.

En el caso de que el aeropuerto esté al nivel del mar, el QNH coincidirá con el QFE, si el aeropuerto está por debajo del nivel del mar, QNH será menor que QFE y, si está por encima del nivel del mar, QNH será mayor que QFE.

### 2.10.4 Niveles de vuelo.

Los niveles de vuelo son superficies de presión atmosférica constante que se encuentran a una distancia determinada de la superficie de presión 1013,25 hPa calculados a partir de la atmósfera estándar de la OACI. Estos niveles de vuelo son niveles de crucero que siempre quedan por encima de la altitud de transición que más adelante se define. Los niveles de vuelo se expresan en centenares de pies y la separación o distancia entre ellos la establece el Reglamento de Circulación Aérea[4].

[4] El Reglamento de la Circulación Aérea y los niveles de crucero se pueden ver en Manual de Instituciones y Legislación

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

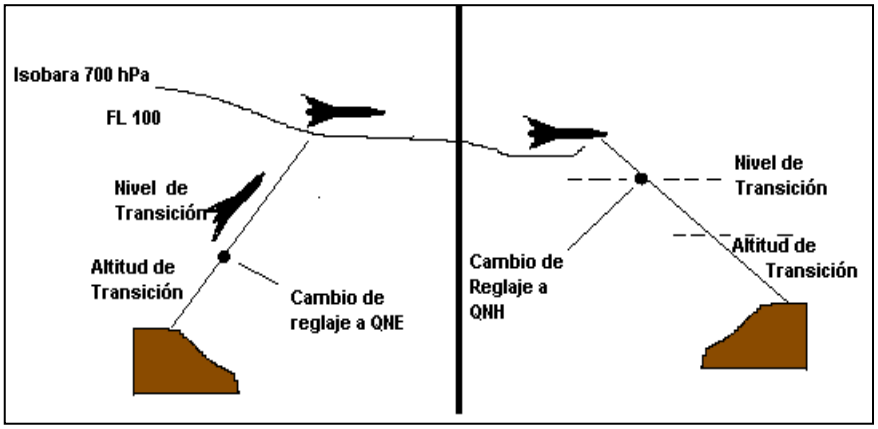
### 2.10.5 Altitud, nivel y capa de transición.

La magnitud de referencia a la que debe calarse el altímetro cambia durante la trayectoria. La referencia escogida para el reglaje del altímetro dependerá del punto en el que se encuentre la aeronave.

Hay dos puntos en los que se debe cambiar la referencia escogida para el reglaje del altímetro:

| | | |
|---|---|---|
| Altitud de transición | Definición y calado | Es la altitud:<br>○ Por debajo de la cual se controla la posición vertical de la aeronave en referencia a altitudes. Por tanto, el altímetro está calado a QNH.<br>○ Por encima de la cual se controla la posición de la aeronave con niveles de vuelo. Por tanto, el altímetro está calado a QNE. |
| | Fase del vuelo afectado | La aeronave tiene en cuenta la altitud de transición en el despegue. Es un valor que se encuentra fijado para cada aeropuerto. |
| | Valores | En España existe tres: Para Madrid TMA: 13000 ft, Para Granada CTA: 7000 ft, Para el resto: 6000 ft. |
| Nivel de transición | Definición y calado | Es el nivel de vuelo más bajo disponible por encima de la altitud de transición:<br>○ Por debajo del nivel de transición se ha de operar en altitudes y el altímetro está calado en QNH.<br>○ Por encima del nivel de transición ha de operar en niveles de vuelo y el altímetro debe estar calado a QNE. |
| | Fase del vuelo afectado | La aeronave tiene en cuenta el nivel de transición en la aproximación para el aterrizaje. |
| | Valores | Su valor depende de las condiciones meteorológicas, pero por lo general debe estar a 1000 ft como mínimo por encima de la altitud de transición. |
| Capa de transición | Es la capa situada entre el nivel de transición y la altitud de transición. Su espesor es variable y siempre mayor o igual a 1000 ft. | |

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*




*Altitud de transición, nivel de transición y cambios de reglaje.*

# 3. Radiación en la Atmósfera.

La atmósfera se encuentra compuesta por varios gases que interaccionan con la radiación solar y la radiación terrestre, como se detalla más adelante.

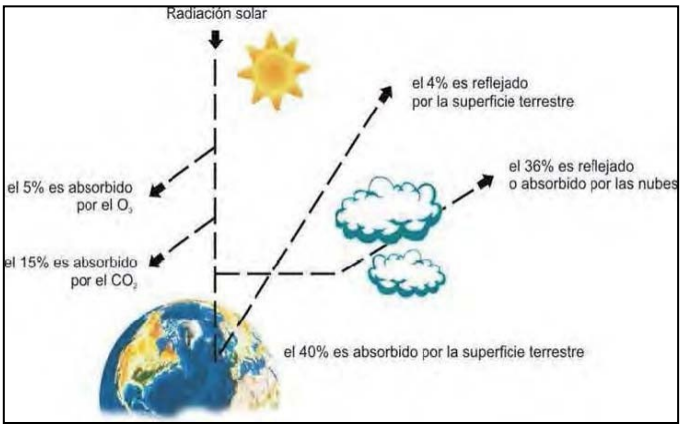
Además, estos gases, por estar a una temperatura determinada, emiten una radiación propia en todas las direcciones.

## 3.1. Tipos de radiación.

| | | |
|---|---|---|
| RADIACIÓN SOLAR | Definición | Es la radiación electromagnética de onda corta procedente del Sol. |
| | Absorción | De la radiación emitida por el Sol, aproximadamente el 36% es absorbido por las nubes o reflejado por sus cimas, el 20% es absorbido por los gases atmosféricos (5% ozono (O3), 15% dióxido de carbono (CO2)), el 4% reflejado por la superficie terrestre y sólo un 40% es absorbido por la corteza terrestre (tierra y océanos). |
| | Efectos | ○ La radiación solar que llega a La Tierra calienta la corteza terrestre con el consiguiente incremento de temperatura.<br>○ Algunos materiales de la corteza terrestre se calientan más que otros con la misma cantidad de radiación solar. Esta diferencia de calentamiento depende de las propiedades del material, que inciden en sus valores de reflectancia, absorbancia y transmitancia.<br>○ El calor específico es la capacidad que tiene un cuerpo para almacenar calor. En la naturaleza, el agua es la sustancia que tiene mayor calor específico. El efecto quizá más notorio de esto es que los mares se calientan y enfrían más lentamente que las zonas terrestres. |

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

| | | |
|---|---|---|
| RADIACIÓN TERRESTE | Definición | Es la radiación de onda larga emitida por la superficie de La Tierra y por los gases, los aerosoles y las nubes de la atmósfera. Es parcialmente reabsorbida dentro de la atmósfera. |
| | Absorción | Los gases que están presentes en la atmósfera son absorbentes selectivos de la radiación terrestre para determinadas longitudes de onda. En particular, algunos de estos gases absorben grandes cantidades de radiación de onda larga emitida por la Tierra al espacio, mientras que son transparentes a la radiación de onda corta que proviene del Sol. |
| | Efectos | ○ Efecto invernadero: es el fenómeno debido a la absorción selectiva de la radiación solar por parte de los gases de efecto invernadero, que inducen un aumento de la temperatura de la atmósfera y la superficie terrestre.<br>○ La radiación terrestre que reflejan las nubes no es muy alta, en general. Sin embargo, cuando el cielo está totalmente cubierto absorben gran cantidad de radiación terrestre y luego la reemiten con una longitud de onda propia. |




## 3.2. Balance radiactivo.

Es el balance entre los flujos de radiación solar y terrestre en la superficie de La Tierra.

La intensidad de la radiación solar recibida no es uniforme en toda la corteza terrestre, sino que depende de la posición del punto considerado con respecto a la posición del Sol, por lo que dependerá de la latitud en la que se encuentre el punto, la época del año y la hora del día. Así, el hemisferio norte recibe máxima radiación alrededor del solsticio de junio, mientras que en el hemisferio sur lo hace alrededor del solsticio de diciembre.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

La radiación que llega a la superficie terrestre no es la misma que se emite al espacio en todas las latitudes, en algunas de ellas se absorbe más de lo que se emite y en otras sucede el efecto contrario. Sin embargo, la temperatura anual media de La Tierra y de la atmósfera varía muy poco, debido a que cada año el sistema atmósfera-Tierra envía al espacio tanta energía como recibe del sol.

### 3.3. Intercambio de calor en la atmósfera.

El Sol es la principal fuente de calor que suministra energía a nuestra atmósfera. Se ha comprobado que la temperatura anual media de La Tierra y de la atmósfera varía poco en intervalos de tiempo no muy amplios. Esto es debido a que existe un intercambio de calor entre los diferentes elementos de La Tierra y capas de la atmósfera, que permiten tener el sistema Tierra-atmósfera en un equilibrio térmico. No obstante, existe la posibilidad de romper el equilibrio por distintos procesos, uno de los cuales es el habitualmente citado “efecto invernadero”. Este efecto se relaciona con la introducción en el eje tierra-atmósfera de una mayor concentración de gases transparentes a la longitud de onda corta entrante, y absorbentes a la longitud de onda larga reemitida por La Tierra (gases de efecto invernadero).

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Además de la radiación explicada anteriormente, el intercambio de calor se puede realizar a través de los siguientes procesos:

| | | |
|---|---|---|
| CONDUCCIÓN | Definición | Es un tipo de transmisión de calor que se realiza por contacto entre dos cuerpos a distinta temperatura. |
| | Efecto | El calor pasa de un punto a otro por colisión molecular, aumentando el movimiento de las moléculas adyacentes. Esto sucede en las pistas de los aeropuertos, donde el calor se conduce desde la superficie de las pistas a las capas de aire que están en contacto con ellas. Además, como el material de la pista es diferente al que suele haber alrededor de la pista, tiene mayor facilidad para calentarse. |
| CONVECCIÓN | Definición | Es un tipo de transmisión de calor que se realiza por el medio de un fluido que transporta calor entre regiones con diferente temperatura. |
| | Efecto | En Meteorología, este tipo de transmisiones de calor origina frecuentemente los movimientos verticales de las masas de aire. |
| ADVECCIÓN | Definición | Es un tipo de transmisión de calor que se realiza por medio de movimientos horizontales de masas de aire. |
| | Efecto | Es muy importante en la formación de nubes orográficas, además de tener un papel primordial en el ciclo del agua. |
| TURBULENCIA | Definición | Es un tipo de transmisión de calor que se realiza por medio de corrientes desordenadas y desiguales que dan lugar a remolinos turbulentos. |
| | Efecto | Sus consecuencias se traducen en aceleraciones verticales u horizontales que pueden modificar los parámetros de vuelo, cambios de altitud y actitud e incluso pérdida momentánea de la gobernabilidad del avión. No todas las aeronaves son igualmente sensibles a la turbulencia, sino que dicha sensibilidad es función del peso, superficie alar, actitud y velocidad de la aeronave |

La transferencia de calor siempre se realiza desde las zonas más calientes a las más frías. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre dichas zonas, más rápidamente se realiza la transferencia de calor.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

1. Como consecuencia de estos gradientes térmicos entre latitudes se desarrollan **las corrientes de convección**, que serán los mecanismos mediante las cuales se transfiere el exceso de energía a las zonas donde hay defecto de la misma.

2. Otro proceso por el que se transfiere energía entre las latitudes es mediante las **corrientes oceánicas** que van de los trópicos a los polos. Estos mecanismos de transferencia de calor entre las latitudes contribuyen a que se mantenga el equilibrio térmico en el sistema Tierra-atmósfera y su temperatura apenas varíe

# 4. Circulación general atmosférica.

En el apartado anterior se acaba de explicar cómo existía un desigual balance de radiación en las diferentes latitudes tal que la radiación recibida en zonas ecuatoriales es mucho mayor que en los polos. Este balance, como se verá inmediatamente, determina, junto a otros factores, la circulación atmosférica terrestre.

Se denomina circulación general atmosférica al flujo de aire alrededor del globo terráqueo por medio del cual se redistribuye el calor sobre la superficie de La Tierra. La circulación general atmosférica abarca todo el planeta y su conocimiento ayuda a comprender el comportamiento de muchos sistemas meteorológicos a menor escala.

## 4.1. Modelos.

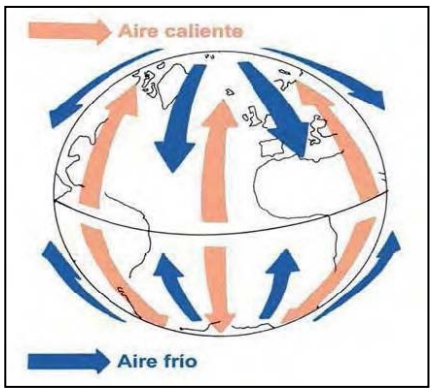
### 4.1.1 Modelo simple con una tierra inmóvil.

En el modelo más simple de circulación general atmosférica, se considera una tierra inmóvil con una superficie uniforme en la que no hay fricción ni calentamiento diferencial entre la superficie oceánica y la continental, y además los vientos existentes se deben exclusivamente a factores térmicos.

1. El exceso de radiación en el ecuador produce un ascenso del aire, y este aire en altura se desplaza desde la latitud más cálida a la más fría, es decir, del ecuador a los polos.

2. En el Polo desciende el aire y se desplaza por la superficie hasta el ecuador para reemplazar el aire ascendente. Este movimiento del aire es llamado **célula de circulación**.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*




*Circulación atmosférica. Modelo simplificado.*

### 4.1.2 Modelo realista con la rotación de la Tierra.

Un modelo más realista **considera la rotación de la Tierra**. Si se incorpora este factor, el esquema de circulación general atmosférica cambia y da lugar a tres células:

a. Célula de Hadley (entre el ecuador y 30º de latitud, aproximadamente),

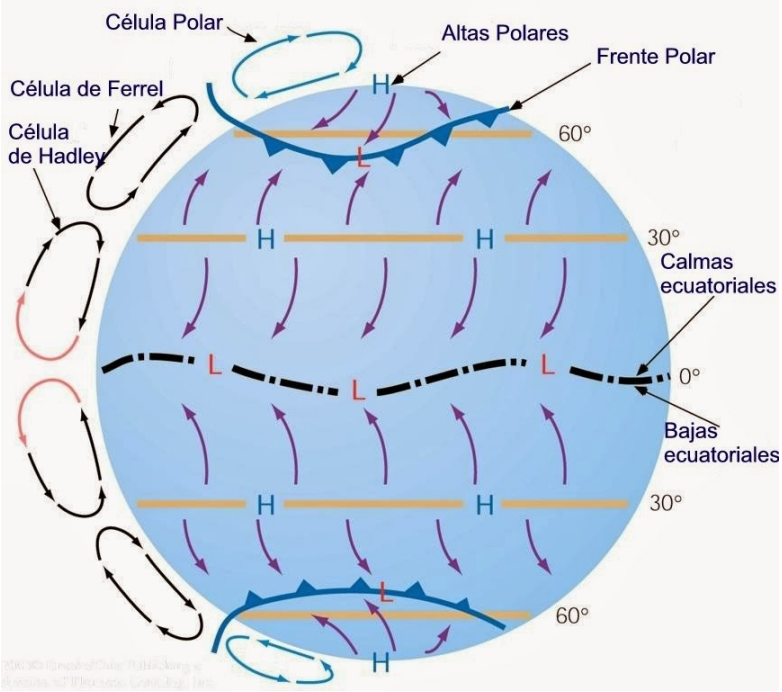
b. Célula de Ferrel (entre 30º y 60º, aproximadamente),

c. Célula Polar (aproximadamente, entre 60º y el polo).

Esto se refleja en la presión a nivel del mar, donde se puede observar:

- un cinturón de bajas presiones hacia los 60º denominado **zona de baja presión subpolar.**
- un cinturón de altas presiones en los 30º denominado **zona de alta presión subtropical.**
- una zona de baja presión en el ecuador, llamada **vaguada ecuatorial**.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*




*Circulación atmosférica. Modelo de 3 células.*

### 4.2. Fuerza de Coriolis.

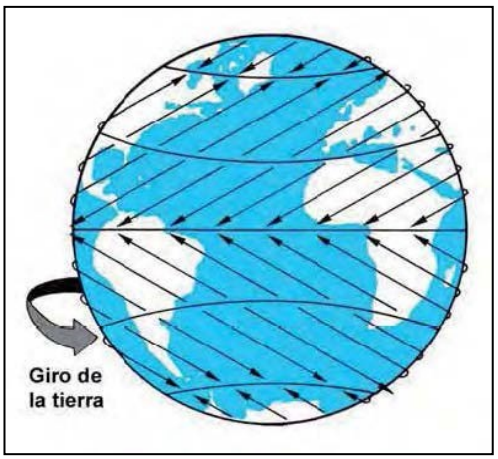
Es una fuerza que se produce debido a la rotación de la Tierra en el espacio y que desvía la trayectoria de los objetos que se encuentran en movimiento sobre la superficie terrestre:

- Hacia la derecha para los objetos que están en el hemisferio norte.
- A la izquierda para los que se encuentran en el hemisferio sur.

#### 4.2.1 Consecuencias de la Fuerza de Coriolis: vientos.

Como consecuencia del gradiente de presión establecido entre las diferentes latitudes, se originan unos vientos que llevan el aire de las altas presiones, a las bajas y que están afectados por efecto de la Fuerza de Coriolis.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*




*Circulación atmosférica afectada por el efecto de Coriolis.*

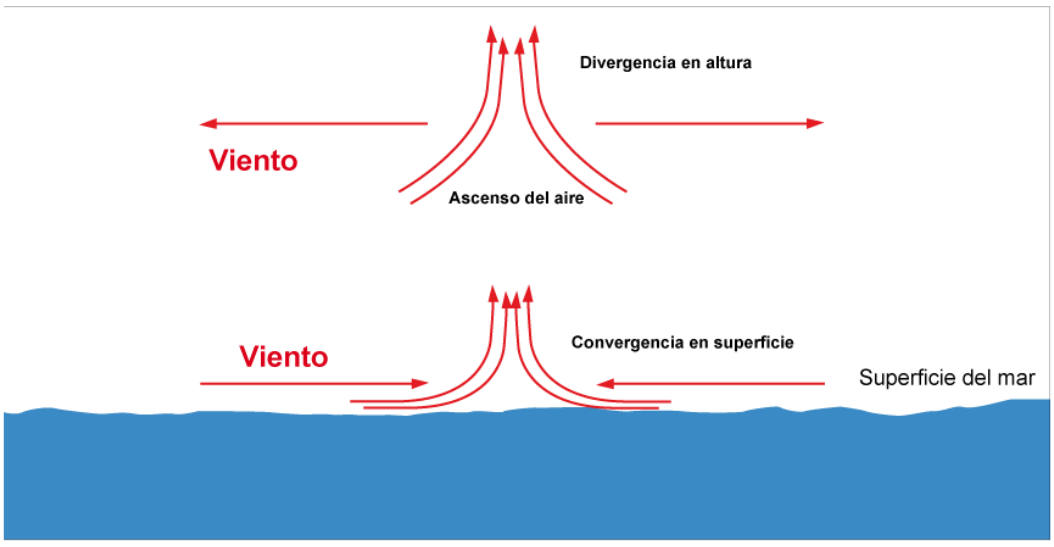
# 5. Viento: conceptos básicos.

Consideramos que el viento es una corriente de aire que se produce en la atmósfera al variar la presión.

## 5.1. Convergencia/Divergencia.

a. Cuando el campo de viento es tal que se produce la compresión de la masa de aire al encontrarse dos corrientes en una zona hablamos de convergencia

b. Cuando el campo de viento es tal que se produce la separación de la masa de aire, hablamos de divergencia.




*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

### 5.2. Subsidencia.

Se puede definir como el descenso del aire hacia el suelo en la troposfera. En la atmósfera terrestre, la subsidencia está causada normalmente por el desplazamiento hacia el suelo de aire frío y denso desde capas medias y altas de la atmósfera a las bajas, lo que determina a su vez que el aire menos denso que se encuentra en la superficie se desplace hacia arriba.

### 5.3. Vientos debidos a las zonas de alta o baja presión.

a. Los vientos que surgen entre la vaguada ecuatorial (zona de baja presión) y la zona de alta presión subtropical se denominan vientos alisios. Estos vientos soplan del NE en el hemisferio norte y del SE en el hemisferio sur, convergiendo en el ecuador en una zona denominada Zona de Convergencia Intertropical.

b. Los Vientos del Oeste son los vientos de esa componente que surgen entre la zona de baja presión subpolar y la zona de alta presión subtropical.

c. Entre los polos y la zona de baja presión subpolar se originan unos vientos que soplan desde el NE hacia el sur en el hemisferio norte y desde el SE hacia el norte en el hemisferio sur, siempre ligeramente desviados por efecto de la fuerza de Coriolis.

### 5.4. Corriente en chorro.

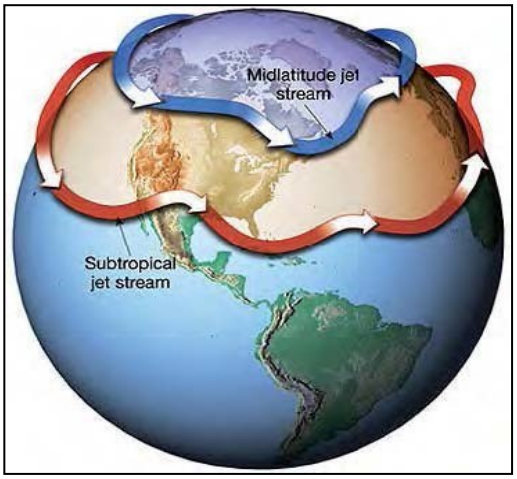
Se define la corriente en chorro (jet stream) como una fuerte y estrecha corriente concentrada a lo largo de un eje casi horizontal en la alta troposfera o en la estratosfera, caracterizada por fuerte cizalladura horizontal y vertical del viento, y que presenta uno o varios máximos de velocidad.

Por tanto, es un flujo de aire que va circulando:

- en altura y a gran velocidad.
- alrededor del planeta.
- de oeste a este.
- de manera ocasionalmente discontinua, presentando ondulaciones tanto en el plano vertical como en el horizontal (ondas de Rossby).

Aunque las corrientes en chorro más intensas son las polares, existen también corrientes en chorro subtropicales en ambos hemisferios.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*




*Corrientes en chorro polar y subtropical en el Hemisferio Norte*

Generalmente y en ausencia de otros factores como condiciones meteorológicas adversas previstas en ruta, cuando las aeronaves fijan sus trayectorias en ruta tratan de tener el viento en cola para, ayudándose de él, ahorrar combustible. Esto es particularmente útil en el caso de las corrientes en chorro que, además de ser intensas, soplan aproximadamente a la altura habitual de vuelo en ruta.

## 6. Anticiclones y depresiones.

Debido a la circulación general atmosférica se desarrollan zonas de alta y baja presión en grandes extensiones de la superficie terrestre que se denominan anticiclones y depresiones, respectivamente.

| | | | |
|---|---|---|---|
| ANTICICLÓN | Definición | Región de la atmósfera donde la presión es más alta que en las áreas circundantes. | |
| | Características | La circulación general es horaria en el hemisferio norte y anti-horaria en el hemisferio sur. | |
| | | Los vientos asociados a dicha circulación son flojos en el centro y más fuertes en el exterior. | |
| | Tipos | Fríos | De naturaleza térmica, deben su formación a las bajas temperaturas y alta densidad que da lugar a áreas de alta presión. |

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | Cálidos | De naturaleza dinámica, se caracterizan por convergencia de aire en altura, subsidencia y corrientes descendentes del aire, que originan altas presiones y divergencia de aire en superficie. |
| | Tiempo | El tiempo asociado a los anticiclones generalmente es estable, con vientos flojos en superficie y cielo despejado. | |
| | | Las condiciones de estabilidad de la atmósfera asociadas a los anticiclones facilitan la formación de nieblas en invierno por lo que es probable que en los aeródromos se den condiciones de baja visibilidad. | |
| DEPRESIÓN | Definición | Región de la atmósfera donde la presión es mucho más baja que en las áreas circundantes. También denominadas borrascas. | |
| | Características | | |
| | | Su extensión horizontal es muy variable. | |
| | | Los vientos circulan en sentido anti-horario en el hemisferio norte y en sentido horario en el hemisferio sur, siendo normalmente fuertes en el centro y más débiles en el exterior. | |
| | Ejemplos característicos | Ciclón tropical | Llamados en el Océano Atlántico y Pacífico Nororiental huracanes, y en el Pacífico noroccidental tifones, son un tipo particular de borrasca que se forma en océanos y mares calientes, generalmente tropicales. Llevan asociado un centro aislado de bajas presiones en superficie, a veces muy profundo, y altas presiones en altura. En superficie generan fuertes vientos y lluvias fuertes, ocasionalmente torrenciales. A diferencia de los ciclones de otras latitudes (extratropicales) los vientos en altura suelen ser flojos. |

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | D. aislada en niveles altos (DANA) | Antiguamente conocido como *Gota Fría*. Se forma cuando en la Circulación del Oeste se produce una ondulación de gran amplitud que se rompe y se separa del flujo creando un embolsamiento de aire frío en altura con reflejo difuso en superficie. La zona de bajas presiones relativas resultante suele tener un diámetro de 200 Km o más y una trayectoria difícil de predecir. En su seno el aire es inestable y habitualmente genera intensas precipitaciones. |
| | | Borrascas de latitudes medias | Depresiones asociadas a los frentes polares de ambos hemisferios. Pueden ser de gran extensión, afectando a muchas regiones. En ocasiones son profundas y generan fuertes vientos y lluvias que complican las operaciones. |

# 7. Masas de aire y frentes.

## 7.1. Masas de aire.

Se llama masa de aire a un cierto volumen de aire de grandes dimensiones (miles de kilómetros), que posee unas propiedades físicas (presión, temperatura, humedad, etc.) homogéneas horizontalmente. Las principales características que identifican a una masa de aire son la temperatura y la humedad.

Las características de la masa de aire han sido adquiridas paulatinamente por permanecer durante un cierto periodo de tiempo sobre una gran superficie, terrestre o marítima, denominada región manantial o fuente. Así, por ejemplo, si la superficie sobre la que se encuentra es fría, la masa de aire tenderá a enfriarse, mientras que, si la superficie sobre la que se encuentra es marítima, tenderá a adquirir humedad.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

En base a sus características, se establece la siguiente clasificación y designación:

| | |
|---|---|
| Según la temperatura y dependiendo de la latitud donde se genera: | Ártica |
| | Polar |
| | Tropical |
| | Ecuatorial |
| Según la humedad: | Seca: si la región fuente es continental |
| | Húmeda: si la región manantial es marítima |

Por tanto, la combinación de estas dos características dará lugar a la clasificación de las masas de aire según su origen en 8 posibles tipos de masas de aire.

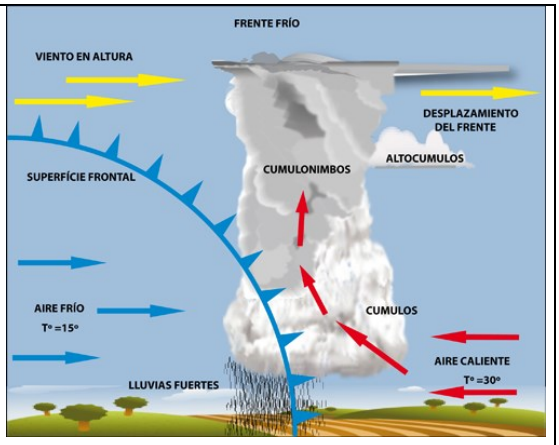
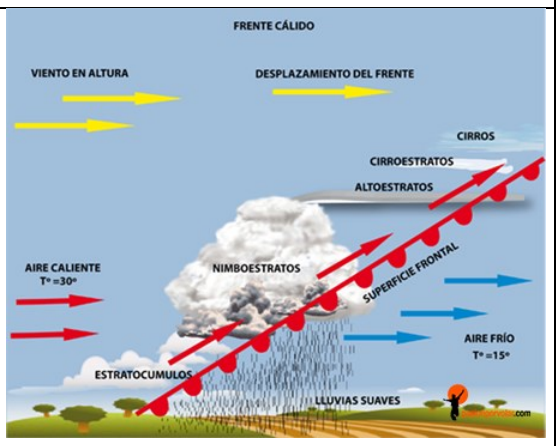
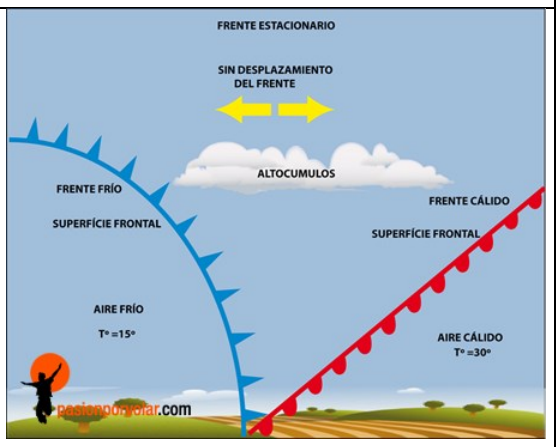
Las características de la masa de aire adquiridas de su fuente manantial varían en el tiempo conforme se desplaza sobre diferentes superficies. Los cambios en sus propiedades dependen de las propiedades iniciales de la masa de aire, la velocidad de desplazamiento y la naturaleza de la superficie sobre la que se desplace.

## 7.2. Frentes.

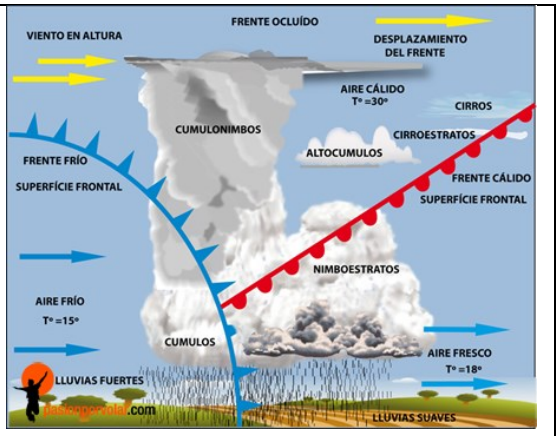
Un frente es la frontera entre dos masas de aire de diferentes temperaturas y densidades. Los frentes no pueden mezclarse de forma inmediata debido a que sus densidades son distintas, así pues, en lugar de mezclarse, la masa más ligera y caliente empieza a ascender por encima de la masa fría y densa. El frente se encuentra entonces en la transición entre ambas, es decir, es la franja de separación entre las dos masas de aire.

Los frentes están asociados a depresiones y se clasifican en función de la masa de aire que empuja.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

| | | |
|---|---|---|
| Frío | Cuando una masa de aire frío desplaza a una caliente ocupando su lugar, avanzando como una cuña y obligando al aire caliente a ascender. Si en el aire que asciende se produce la condensación del vapor de agua, aparecen nubes de desarrollo vertical y precipitaciones |  |
| Cálido | Cuando una masa de aire caliente es la que desplaza a la fría. En este caso, el aire caliente asciende por encima del frío, lo que puede provocar un enfriamiento y la posterior condensación con la consiguiente formación de nubosidad y precipitaciones. Al igual que en los frentes fríos, las características del tiempo dependerán del grado de humedad y estabilidad de la masa de aire |  |
| Estacionario | Cuando se encuentran las dos masas, pero no hay desplazamiento y, por tanto, ninguna de las características de las masas de aire prevalece sobre la otra. En estos frentes, el viento tiende a soplar paralelo al frente y en sentidos opuestos. Pueden provocar periodos de precipitaciones prolongados si las masas de aire que intervienen son muy húmedas |  |

© 2023 ENAIRE
La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.
No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.

| | | |
|---|---|---|
| Ocluido | Cuando un frente frío, que por regla general se mueve más rápido que uno caliente, alcanza el frente cálido y eleva el sector cálido en altura. En tal caso, el frente resultante en superficie es una combinación de los dos frentes anteriores |  |
| | La oclusión puede ser de dos tipos, oclusión de **tipo frío** y oclusión de **tipo caliente**, en función de si el aire que se encuentra detrás de la oclusión es más frío o caliente que el aire que está situado delante de la oclusión | |

# 8. Variables meteorológicas.

## 8.1. Nubosidad.

Las nubes están formadas por un conjunto de partículas minúsculas de agua líquida y/o de hielo que se encuentran en suspensión en la atmósfera.

### 8.1.1 Formación de las nubes.

Para que tenga lugar la formación de las nubes es necesario que:

- El volumen de aire tenga una alta humedad relativa (cantidad de vapor de agua suficiente).
- Se active un mecanismo por el que el volumen de aire llegue a la saturación, como el enfriamiento.
- Existan núcleos de condensación (partículas higroscópicas que facilitan el proceso de condensación).

El enfriamiento es el mecanismo más común en los procesos que se desarrollan en la atmósfera. Este enfriamiento de la masa de aire puede darse en la atmósfera, cuando:

a. La masa de aire entre en contacto con una superficie muy fría (casos de advección y radiación).

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

b. En una expansión adiabática, denominada así porque el enfriamiento se produce sin que haya apenas intercambio de calor entre la masa de aire y el aire circundante. Este enfriamiento sucede en casos como:

- Expansión en una columna de aire ascendente (enfriamiento convectivo).
- Ascenso forzado del aire en una ladera.
- Convergencia del aire en superficie originando un ascenso del mismo (enfriamiento frontal).
- Turbulencia del aire en las capas bajas, que transporte calor y humedad a niveles distantes del suelo.

### 8.1.2 Clasificación de las nubes.

Las nubes pueden clasificarse de diferentes maneras en función del criterio establecido.

La mayor parte de las nubes se encuentran en un rango de altitudes que varían entre el nivel del mar y el nivel de la tropopausa (0 Km - 13 Km en latitudes medias). Por convención, esta parte de la atmósfera en la que se encuentran las nubes ha sido dividida en tres pisos: alto, medio y bajo.

| Región polar | Región templada | Región tropical |
|---|---|---|
| 3 Km-8 Km | 5 Km-13 Km | 6 Km-18 Km |
| 10000 ft - 25000 ft | 16500 ft - 45000 ft | 20000 ft - 60000 ft |
| 2-4 Km | 2- 7 Km | 2- 8 Km |
| 6500 ft - 13000 ft | 6500 ft - 23000 ft | 6500 ft - 25000 ft |
| 0 km-2 Km | 0 km- 2 Km | 0 km- 2 Km |
| 0 ft- 6500 ft | 0 ft- 6500 ft | 0 ft- 6500 ft |

*Pisos bajo, medio y alto en las regiones tropical, templada y polar. Fuente: Compendio de apuntes para la formación del personal meteorológico de la clase IV (B.J. Retallack)*

Por su parte, las nubes se clasifican, en función del piso en el que se encuentren, en cuatro tipos de familias: **bajas, medias, altas y de desarrollo vertical.**

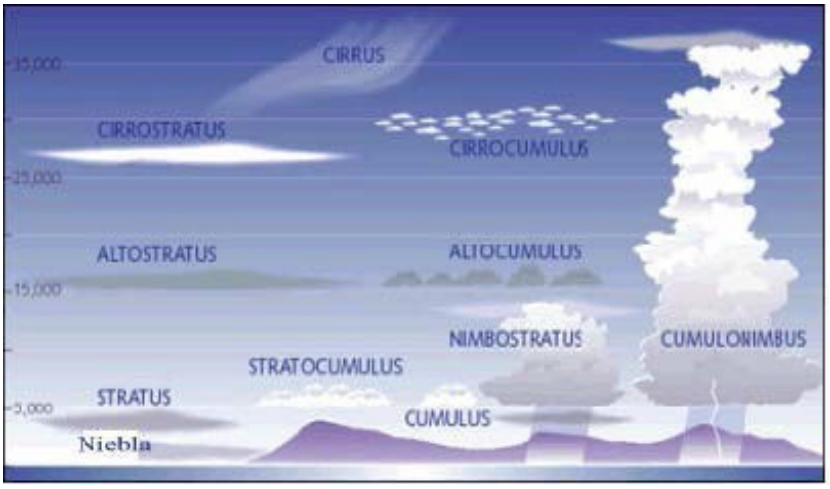
En el Volumen I del Atlas Internacional de Nubes, publicado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM-Nº407, 1993), las nubes se clasifican en 10 géneros en función de su forma y características.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

| Familias | Géneros (Símbolos) | Base Media (m) | Tope medio (m) |
|---|---|---|---|
| Nubes altas | Cirros (Ci)<br>Cirrostratos (Cs)<br>Cirrocúmulos (Cc) | 6.000 | 12.000 |
| Nubes medias | Altocúmulos (Ac)<br>Nimbostratos (Ns) [5]<br>Altoestratos (As) | 2.500 | 6.000 |
| Nubes bajas | Estratos (St)<br>Estratocúmulos (Sc) | 150 - 600<br>600 - 1.500 | 750<br>2.400 |
| Nubes de desarrollo vertical | Cúmulos (Cu) (2)<br>Cumulonimbos (Cb)[6] | 300 - 2.400<br>600 - 2.400 | 6.000<br>12.000 |

*Principales géneros de nubes, con la altura de sus bases y topes.*

La clasificación de las nubes en función de la familia y el género es la que aparece en la imagen. Cada uno de estos géneros se puede subdividir en especies en función de las peculiaridades y la estructura interna de la nube, y variedades, según las disposiciones de los elementos macroscópicos y el mayor o menor grado de transparencia.




*Géneros de nubes y su aspecto.*

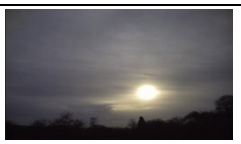
[5] La base de los Ns puede llegar hasta la superficie terrestre y considerarse nube baja.

[6] La extensión vertical de los Cu y Cb es tan grande que puede alcanzar el piso medio y alto.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Altas | Están formadas por cristales de hielo | | |
| | Cirros<br><br>(i) | Se componen de largos, finos y etéreos filamentos blancos y delicados formados por cristales de hielo. A esas altitudes los vientos son muy fuertes y alargan los filamentos. Los cirros son normalmente blancos y, en ocasiones, indican la aproximación de una perturbación. | |
| | Cirrostratos<br><br>(Cs) | Velo nuboso, transparente y blanquecino, de aspecto fibroso (como cabellos) que cubre total o parcialmente el cielo. El Sol o la Luna pueden brillar atravesándolo, produciendo halos. Estos halos se forman por la refracción y reflexión de la luz en los cristales de hielo que componen la nube | |
| | Cirrocúmulos<br><br>(Cc) | Banco, manto o capa delgada de nubes generalmente blancas sin sombras, compuesta por elementos muy pequeños en forma de granos, rizos, grumos, ondulaciones, etc., unidos o separados y distribuidos con mayor o menor regularidad | |
| Medias | Están formadas por gotas de aguas, muchas de las cuales están superenfriadas o en subfusión, a veces también por cristales de hielo. | | |
| | Altocúmulos<br><br>(Ac) | Banco, capa delgada o capa de nubes blancas o grises, o a la vez blancas y grises, que tienen sombras compuestas por losetas, masas redondeadas, rodillos, etc., las cuales son a veces parcialmente fibrosas o difusas y que pueden estar unidas o no. Si se ven en una mañana húmeda y templada, indican que por la tarde pueden aparecer tormentas. | |

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Nimbostratos<br><br>(Ns) | Capa nubosa gris con la base rasgada y con un aspecto velado por la precipitación de lluvia o nieve que cae más o menos continuadamente desde ella. Frecuentemente aparecen nubes debajo de ella. El espesor de esta capa es suficiente para ocultar completamente el sol. Pueden llegar a extenderse hasta la superficie terrestre y por tanto considerarse nubes bajas con lluvia. Se incluyen dentro del grupo de nubes medias, aunque en ocasiones pueden alcanzar el nivel bajo y alto. | |
| | Altoestratos<br><br>(As) | Manto o capa nubosa que habitualmente cubre el cielo completamente y tiene un color gris o azul grisáceo. Tiene partes suficientemente delgadas que permiten distinguir vagamente el Sol, como a través de un vidrio deslustrado. Los altoestratos, a diferencia de los Cirrostratos, no producen halos. |  |
| Bajas | Están formadas, generalmente, solo por gotas de agua líquida | | |
| | Estratos<br><br>(St) | Capa nubosa generalmente gris que suelen cubrir todo el cielo. Los estratos normalmente parecen niebla que no llega al suelo. | |
| | Estratocúmulos<br><br>(Sc) | Nubes en forma de anco, manto o capa, grumosas y grises o blanquecinas, a veces presentan ambos colores. Suelen formar hileras con trozos de cielo azul visible entre ellas. | |
| | Pueden llegar a alcanzar los tres pisos, presentando una combinación de partículas características de las nubes altas, medias y bajas. | | |

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| De desarrollo vertical | Cúmulos (Cu) | Nubes aisladas, densas y blancas. Parecen enormes bolas de algodón flotando con bordes bien definidos, la base plana y relativamente oscura y las zonas más altas con forma de coliflor. | |
| | Cumulonimbos (Cb) | Nube densa y potente, con una dimensión vertical considerable, en forma de montaña o enormes torres. Dan lugar a precipitaciones como tormenta o chubascos. Puede crecer hasta alturas que lleguen a la tropopausa, donde comienza un estrato estable que impide la flotabilidad, llegando a crecer algo más allá si las corrientes convectivas son muy fuertes. La base es oscura y pueden aparecer nubes desgarradas. | |

### 8.1.3 Nubosidad y techo de nubes.

Una descripción completa de la nubosidad incluye la altura, la cantidad de cielo cubierto y los tipos de nubes presentes en cada una de las diferentes capas de nubes que se observen.

Para estimar la nubosidad, el cielo se divide en ocho partes y se cuenta el número de partes que cada capa de nubes cubre, desde la más baja a la más alta. Cada una de estas ocho partes se llama octa.

Las abreviaturas OACI utilizadas en los mensajes aeronáuticos para proporcionar el nivel de nubosidad, son las siguientes:

**OVC:** cielo cubierto.

**BKN:** nuboso (de 5 a 7 octas de cielo cubierto).

**SCT:** nubosidad dispersa (de 3 a 4 octas de cielo cubierto.

**FEW**: algunas nubes (de 1 a 2 octas de cielo cubierto).

**NSC:** Sin nubes de importancia para las operaciones.

**CAVOK**: Sin nubes, sin fenómenos significativos y con visibilidad mayor que 10 kilómetros.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Se denomina **techo de nubes** a la altura sobre el suelo (tierra o agua) a la que se encuentra la base de la capa de nubes más baja, siempre que ésta cubra más de la mitad del cielo (BKN/OVC) y se halle a una altura inferior a 20.000 ft (6.000 m).

Se denomina **nube de importancia para las operaciones** a la nube en la que la altura de la base es inferior al valor más elevado entre 1.500 m (5.000 ft) y la altitud mínima de sector más alta, o una nube cumulonimbo o cúmulo de desarrollo vertical a cualquier altura.

## 8.2. Visibilidad.

Según Anexo 3 OACI, en sentido aeronáutico se entiende por visibilidad horizontal al valor más elevado entre los siguientes:

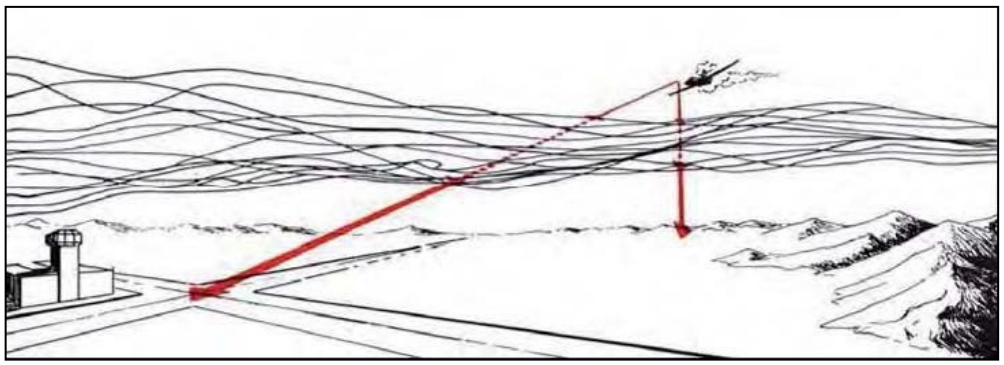
- La distancia máxima a la que pueda verse y reconocerse un objeto de color negro de dimensiones convenientes, situado cerca del suelo, al ser observado ante un fondo brillante. Este valor está representado por el alcance óptico meteorológico (MOR, *Meteorological Optical Range*). Generalmente, la visibilidad se determina de esta manera durante el día.

- La distancia máxima a la que puedan verse e identificarse las luces de aproximadamente 1.000 candelas ante un fondo no iluminado. Esta distancia puede variar con la iluminación del fondo. Generalmente, la visibilidad se determina de esta manera durante la noche.

Por otro lado, la **visibilidad vertical** es la visibilidad máxima a la cual se puede ver un globo que asciende. Aeronáuticamente es la distancia vertical a partir de la cual el piloto tiene visión de la pista.

La **visibilidad oblicua** es la distancia desde la cual un piloto, mirando a lo largo de la senda de planeo, puede ver la pista. Cuando un piloto realiza una aproximación, es la distancia desde la cual ve las ayudas para el aterrizaje del umbral de la pista. Como el segmento correspondiente a la distancia entre el avión y un objeto situado en superficie es normalmente superior a la de la correspondiente proyección horizontal y vertical de ese segmento, normalmente la visibilidad oblicua es inferior a la vertical y a la horizontal. En relación con la visibilidad oblicua, en aeronáutica se utiliza el alcance visual en pista, RVR (Runway Visual Range) que se define como la distancia hasta la cual el piloto de una aeronave que se encuentra sobre el eje de una pista puede ver las señales de superficie de la pista o las luces que la delimitan o que señalan su eje

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*



*Representación gráfica de la visibilidad oblicua.*

La visibilidad es un parámetro de importancia esencial en las operaciones de vuelo. Aunque las nuevas tecnologías permiten operar con visibilidades bajas, es muy importante proporcionar un valor de la visibilidad lo más ajustada posible.

La visibilidad se mide normalmente en metros. Su estimación puede variar según las condiciones en las que se realiza, y según la dirección. Los principales factores que influyen en ella son la humedad relativa, la posición del sol y la dirección en la que sopla el viento.

Otros factores que también influyen en la estimación de la visibilidad son el tamaño y color del objeto, la iluminación (artificial, del sol o de la luna), la agudeza visual del observador y la posición desde la que se estima la visibilidad.

*Luces que señalan el eje de una pista.*

En los informes meteorológicos aeronáuticos METAR/SPECI, se cifra la denominada visibilidad reinante, que es el valor máximo de la visibilidad, observado de conformidad con la definición de visibilidad en sentido aeronáutico, al que se llega dentro de un círculo que cubre por lo menos la mitad del horizonte o por lo menos la mitad de la superficie del aeródromo de forma continua o

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

discontinua. Cuando la visibilidad fluctúe rápidamente y no pueda determinarse la predominante, se cifra la visibilidad mínima.

En el apartado 8.1 se detallará el impacto que las situaciones de baja visibilidad pueden producir en las operaciones aéreas.

### 8.3. Precipitación.

Se denomina precipitación al conjunto de partículas líquidas o sólidas que, procedentes de las nubes, alcanzan el suelo.

Para que se produzca precipitación es necesario que las gotas de agua o cristales de hielo adquieran un tamaño adecuado para que venzan las corrientes ascendentes y caigan libremente por efecto de la gravedad.

Según sea la altura a la que ha comenzado la caída y la distribución de temperaturas del aire por donde pasa en su descenso, la precipitación será de agua, nieve, aguanieve, lluvia helada (gotas que se congelan en el momento del contacto) o granizo.

| TIPO NUBE | TIPO PRECIPITACIÓN |
|---|---|
| De desarrollo vertical: Cumulonimbos (Cb) y ocasionalmente Cúmulos (Cu), cuando el desarrollo vertical es de gran extensión. | Precipitaciones, intensas y en forma de chubasco, frecuentemente en forma de tormenta. |
| Nubes estratiformes, sobre todo Altoestratos (As) y Nimbostratos (Ns). | Precipitaciones de carácter continuado e intensidad moderada. |
| Altoestratos. | Precipitaciones débiles o moderadas y continuas. |

#### 8.3.1 Tipos de precipitación

- Chubascos: Tipo de precipitación que se inicia y cesa bruscamente, es relativamente intensa y de no mucha duración. Los chubascos pueden ser de agua, de nieve o de agua y nieve mezcladas. Las gotas son relativamente grandes comparadas con las observadas en otro tipo de precipitación, y proceden de nubes convectivas.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

- Precipitaciones intermitentes: No son necesariamente continuas en la superficie terrestre, aunque las nubes que las originan forman un manto más o menos continuo. Además, el principio y final de los períodos de precipitación no son normalmente bruscos, como en los chubascos. Dado que este tipo de precipitación no está asociado normalmente a nubosidad de tipo convectivo, la observación del tipo de precipitación permite inducir el tipo de nubosidad que la produce.

- En ocasiones, especialmente cuando la humedad relativa es baja y/o la temperatura elevada, las precipitaciones se evaporan antes de llegar al suelo creando estructuras filamentosas bajo la nube denominadas virgas.

Las precipitaciones afectan a las operaciones:

- En vuelo, reduciendo la visibilidad (según la intensidad de la precipitación acontecida).
- Generando cizalladura vertical y horizontal debido a las corrientes de aire verticales originadas por la caída de las gotas.
- Por engelamiento, adhiriendo hielo en el avión en caso de que las temperaturas sean inferiores a 0ºC.
- En el aterrizaje, ya que disminuyen la eficacia de frenado y pueden producir aquaplanning si existen charcos de agua o placas hielo en la pista. En relación a lo segundo, para evitar la formación de hielo en las pistas después de una nevada se considera necesario limpiarlas ya que, si las temperaturas descienden por debajo de 0ºC y no se limpian, se forma hielo.
- En el rodaje, ya que, si existen placas de hielo o depósitos de nieve en las calles de rodadura, disminuye la velocidad de la aeronave y aumentan los tiempos de ocupación de los viales y de la pista.

### 8.4. Viento.

El viento es el flujo de aire en la atmósfera.

El movimiento del aire es originado principalmente por la fuerza que resulta de la diferencia o gradiente de presión que existe entre dos masas de aire, siendo proporcional a éste. Sin embargo, el movimiento del aire también resulta influenciado por otras fuerzas como son las de la rotación de la tierra (fuerza de Coriolis), la fuerza centrífuga y el rozamiento con la superficie terrestre (fuerza de rozamiento).

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

El viento es un vector que consta de dos magnitudes llamadas intensidad y dirección, y se expresa por su velocidad. La intensidad se expresa en millas/hora (nudos) que es la medida aeronáutica estándar, pero también en metros/segundo o en kilómetros/hora en otros contextos. La dirección, por su parte, se expresa en relación a su procedencia y en grados sexagesimales. Para ello se toma como 0º el norte verdadero (norte geográfico) y se mide en el sentido de giro de las agujas del reloj el ángulo formado entre la dirección de donde procede el viento y el norte geográfico.

Uno de los fenómenos meteorológicos más críticos en las maniobras de aterrizaje y despegue en pista es el viento. Los aviones deben realizar las operaciones de aterrizaje y despegue en contra del viento. Sin embargo, es posible realizar estas operaciones con ligero viento en cola. El valor máximo admisible de componente de viento en cola depende del tipo de avión y de la longitud de la pista.

La componente transversal del viento a la pista limita la posibilidad de realizar el aterrizaje o despegue con seguridad. El límite máximo de componente transversal que toleran las aeronaves varía entre 15 y 35 kt, y depende del tipo de aeronave y de las condiciones de la pista.

*Aeronaves en pista preparándose para el despegue.*

### 8.4.1 Vientos locales: brisas.

Son vientos a escala local que soplan de día del mar hacia tierra (brisa de mar) y durante la noche al revés (brisa de tierra).

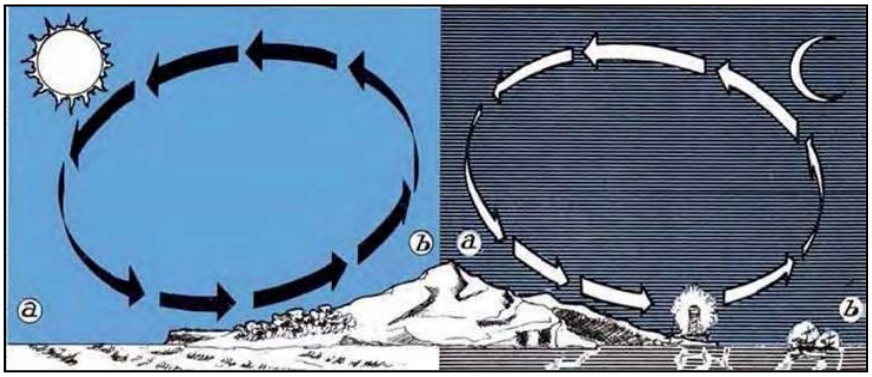
La causa principal de este movimiento de aire es el diferente calentamiento de la superficie del mar y de la tierra causado por la radiación solar. Esta diferencia en el calentamiento es debida a la diferencia de calores específicos de la tierra y del mar.

Durante el día, la tierra se calienta más que el mar; por tanto, la columna de aire que está encima de la tierra se dilata y tiende a elevarse. En consecuencia, la presión en tierra será menor que la presión a la misma altura en el mar. Al haber una diferencia de presión, se produce un desplazamiento de

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

aire en superficie de mar a tierra, donde la presión es menor. Este desplazamiento se denomina brisa de mar. Por otro lado, al ascender y enfriarse el aire, éste se expande hacia el mar, cerrando el circuito.

Durante la noche sucede lo contrario; la tierra se enfriará más rápidamente que el mar, produciéndose un área de alta presión sobre la tierra y otra de baja presión al mismo nivel sobre el mar. Esta diferencia de presión produce un desplazamiento de aire de la tierra al mar, que es lo que se denomina brisa de tierra.




*Circulación de la brisa de mar y la brisa de tierra.*

En ausencia de vientos no locales, las brisas son predominantes en zonas de costa y siguen un ciclo diario idéntico y repetitivo y, por tanto, predecible, Esto sígnica que los aeropuertos situados cerca de zonas costeras pueden adaptar los ejes de sus pistas y sus configuraciones fácilmente siguiendo el patrón de brisas en el área en la que se sitúan.

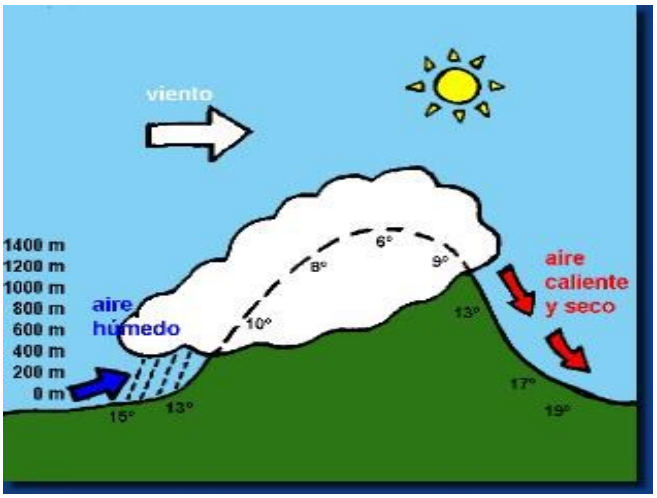
### 8.4.2 Vientos locales: Efecto Foehn.

Es un fenómeno meteorológico que se produce en el lado de sotavento de una cadena montañosa. Se caracteriza por el aumento de temperatura y disminución de la humedad relativa del aire que se produce en un punto de ese lado, en relación con un punto a la misma altura en el lado de barlovento.

Una masa de aire asciende por una zona montañosa en el lado de barlovento. Este ascenso, y por tanto enfriamiento, se supone adiabático (sin intercambio de calor con la atmósfera circundante). Esta masa de aire, si contiene suficiente cantidad de vapor de agua, puede condensarse al llegar a una cierta altura, formar nubes y originar precipitación en forma de agua o nieve, perdiendo así parte de su humedad y ascendiendo según el gradiente adiabático saturado, que es menor que el seco. Posteriormente, desciende por la ladera opuesta calentándose por compresión adiabática, según el

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

gradiente adiabático seco. Por su más rápido recalentamiento en la ladera de sotavento, la temperatura de este aire seco al llegar al valle tras el ascenso será significativamente superior a la que tenía inicialmente cuando ascendía la cadena montañosa desde la misma altitud. Este fenómeno de recalentamiento y resecamiento es el que se conoce como efecto Foehn.




*Descripción gráfica del efecto Foehn.*

# 9. Fenómenos meteorológicos peligrosos para el vuelo.

## 9.1. Visibilidad reducida.

En el apartado 7.2 se introdujo el concepto físico de la visibilidad. Hay que tener en cuenta que la visibilidad que percibe el piloto desde el aire no es la misma que la medida en el suelo, ya que pueden darse fenómenos meteorológicos locales como la niebla que afectan a la visibilidad en superficie. Puede ocurrir que, al iniciar una maniobra de aproximación, el piloto tenga buena visibilidad y que, después, pase a una situación de mala visibilidad por encontrarse con una densa niebla en la pista.

*Pista en condiciones normales y de visibilidad reducida.*

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Cuando la visibilidad es inferior a 1.500 m, se debe cifrar el alcance visual en pista (Runway Visual Range, RVR). Como se vio anteriormente, este parámetro mide la distancia hasta la cual el piloto de una aeronave que se encuentra a 5 m de altura sobre el eje de una pista puede ver las señales de superficie de la pista o las luces que la delimitan o que señalan su eje. En los informes meteorológicos se corresponde con el valor promedio de los 10 minutos anteriores a la hora de observación. Este parámetro se obtiene de transmisómetros (o visibilímetros) que se colocan a una altura de 2,5 m sobre el suelo, separados unos 100 metros del eje de la pista en la zona de toma de contacto del avión.

La visibilidad en superficie se ve afectada por diversos fenómenos meteorológicos. Algunos de ellos son:

- Nieblas,neblinas,.
- Ventiscas.
- Calimas (partículas de polvo en suspensión) o
- Contaminación del aire y/o humo.
- Smog.
- Torbellinos de polvo o arena.
- Nubes bajas.
- Precipitaciones intensas (lluvia, llovizna, nieve y/o granizo).

En el caso de que en el aeródromo se dé reducción de visibilidad por niebla o neblina, o por partículas de contaminación o de humo, la estabilidad de la atmósfera es un factor muy importante a tener en cuenta para valorar el tiempo que puede prolongarse dicha reducción de visibilidad. La inestabilidad favorece la aparición de chubascos o corrientes de aire verticales que arrastran polvo y arena, mientras que la estabilidad asociada, por ejemplo, a una inversión térmica, puede dificultar la disipación de un estrato de niebla.

Entre todos los factores mencionados, el que normalmente influye más en la reducción de la visibilidad es la niebla.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

### 9.1.1 Nieblas y neblinas.

La formación de la niebla es consecuencia de la condensación del vapor de agua que puede producirse por efecto del enfriamiento o por la adición de vapor de agua.

Se define la niebla como una nube estratiforme en contacto con el suelo o a muy poca altura, y que restringe la visibilidad a valores inferiores a 1.000 metros. Si la reducción de la visibilidad es superior a 1000 m con una humedad relativa superior al 70%, esta nube se llama neblina. Un caso particular de neblina es la bruma, que se da cuando la reducción de visibilidad es causada por partículas de agua y otras partículas higroscópicas en suspensión, mayormente de sal. Se puede considerarse un tipo de neblina típica de zonas costeras.

La extensión vertical de las nieblas es variable, pudiendo ir de unos pocos metros a unos cientos de metros. En el caso de que la extensión vertical no supere los 2 m de altura, se dice que la niebla existente es niebla baja. También pueden tener una extensión variable horizontalmente y constituir un manto continuo o discontinuo (en bancos).

Cuando las nieblas son delgadas, es corriente que los aviones que sobrevuelan el aeródromo vean la pista, pero al iniciar la aproximación, la pierdan o al menos perciban una disminución muy sensible de la visibilidad. Cuando la niebla es baja y densa, las marcaciones y luces de la pista pueden llegar a quedar ocultas.

*Ejemplo de situación de niebla en un valle.*

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

### 9.2. Ilusiones ópticas.

Es importante destacar el efecto que las ilusiones ópticas tienen sobre lo que el piloto percibe desde la aeronave. Éstas pueden llevar a creer al piloto que vuela a una altura y/o distancia diferente de la real.

Estas ilusiones ópticas vienen dadas por algunos factores como los que se nombran a continuación: características y condiciones de la pista (pendiente de la pista: ascendente o descendente, anchura de la pista, etc.), inclinación del terreno, el agua en el parabrisas, falta de contraste de las luces de balizaje de la pista con el terreno, fenómenos meteorológicos, condiciones de luminosidad en el momento de la maniobra, etc.

### 9.3. Engelamiento.

El engelamiento consiste en la formación de hielo sobre la estructura del avión y/o en el motor, tanto en tierra como en vuelo, cuando el agua líquida subfundida (gotas de agua con temperatura igual o menor que 0º C) se congela al impactar con la aeronave.

El engelamiento en vuelo se forma cuando el avión penetra en una zona donde hay gotas de agua en forma visible (gotas de nube, o lluvia) y la temperatura del aire en el punto de encuentro del avión con estas gotas de agua sea menor o igual que 0º C, aunque en ocasiones puede haber engelamiento incluso con temperaturas ligeramente superiores.

El hielo se adhiere principalmente a aquellas zonas que más sobresalen de la célula del avión y a los elementos expuestos al viento relativo que experimenta la aeronave. El engelamiento constituye uno de los mayores riesgos meteorológicos en aviación porque puede reducir la eficiencia de la aeronave.

Algunos de los efectos que puede producir son los siguientes:

- Aumento de peso y de resistencia al avance.
- Falsas indicaciones de los instrumentos e interferencias en las comunicaciones.
- Reducción de visibilidad.
- Alteraciones en las propiedades aerodinámicas de la aeronave en vuelo: disminución en la sustentación y reducción de maniobrabilidad por el agarrotamiento de las superficies de control.
- Pérdida de efectividad de los frenos y de todo el tren de aterrizaje.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

- Pérdida de potencia.
- Vibraciones que provocan fatiga estructural.
- Mal funcionamiento y daños estructurales en los motores.

*Engelamiento sobre aeronaves.*

La intensidad del engelamiento se mide en función de la velocidad de acumulación del hielo y los efectos que produce sobre el avión. Así, se tiene:

a. **Ligero:** el crecimiento del depósito de hielo no crea problemas al vuelo, salvo si es muy prolongado.

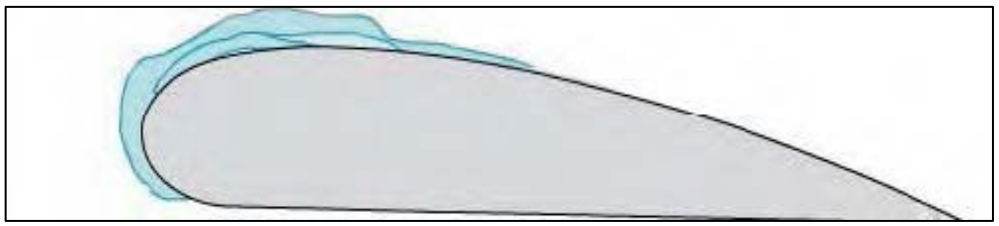
b. **Moderado:** el crecimiento del depósito de hielo es rápido incluso en periodos de tiempo muy cortos. Puede crear problemas al vuelo, aunque los equipos de defensa de a bordo son capaces de deshacer el depósito.

c. **Fuerte:** el crecimiento del depósito de hielo es tan rápido que los equipos de a bordo no pueden resolver el problema por sí solos. Se requiere un cambio de altitud inmediato.

El engelamiento en vuelo se puede presentar debido a cuatro procesos distintos que se analizan a continuación:

- Formación de hielo claro o transparente.
- Formación de hielo granulado.
- Lluvia engelante.
- Depósito de nieve húmeda o escarcha.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*



*Depósito de hielo en el ala.*

Tipos de engelamiento:

1. El **hielo claro** (clear icing) es un tipo de depósito de hielo homogéneo casi transparente, de aspecto vidrioso y con una superficie exterior lisa. Posee una gran adherencia a la superficie. La congelación de las gotas subfundidas, en este caso, es lenta. Es un tipo de engelamiento muy peligroso para la seguridad de las operaciones.

Las condiciones más favorables para que se deposite este tipo de hielo y, por tanto, las más peligrosas son:

- Temperatura del aire entre 0ºC y -10ºC.
- Temperatura del avión ligeramente por debajo de 0ºC.

2. El **hielo granulado** (rime icing) es un tipo de depósito de hielo de color blanco y opaco, de aspecto áspero, rugoso y granular que posee una mala adherencia. La congelación de las gotas subfundidas en este caso es rápida. Este tipo de engelamiento no presenta grandes problemas para las operaciones.

Las condiciones más favorables para su formación y, por tanto, las más peligrosas son:

- Temperatura del aire entre 0ºC y -40ºC (habitualmente entre -10ºC y-20ºC).
- Temperatura del avión ligeramente por debajo de 0ºC.

3. La **lluvia engelante** se forma cuando las gotas de precipitación líquida que procede de una capa con temperatura superior a 0ºC se sobreenfrían cuando atraviesan capas que se encuentran por debajo de 0ºC. Es el engelamiento más peligroso para las aeronaves, puesto que, además de ser un hielo transparente, se une el hecho de que cuando las gotas subfundidas impactan sobre el avión se congelan uniformemente por todas las partes del mismo.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

4. El **engelamiento por escarcha o nieve húmeda** se caracteriza porque este tipo de nieve está compuesta por cristales de hielo que coexisten con gotas de agua subfundidas. Este tipo de engelamiento puede generarse tanto en tierra como en vuelo.

En el caso de que este engelamiento se produzca sobre aviones aparcados a la intemperie, el depósito de hielo que se forma puede ser altamente peligroso si se inicia un vuelo sin haberlo retirado. El hecho de que el hielo esté muy adherido a la superficie metálica altera el perfil aerodinámico, disminuyendo la sustentación y aumentando la resistencia a la aeronave pudiendo obligar a cancelar el despegue.

### 9.4. Cizalladura.

La cizalladura del viento ( wind shear, en inglés) es un cambio en la velocidad y/ o la dirección del viento entre dos puntos próximos. La cizalladura puede ser horizontal, vertical o la combinación de ambas. Cuanto menor es la distancia en la que se produce el cambio y mayor es la velocidad a la que ésta ocurre, más fuerte es la cizalladura.

La cizalladura en niveles altos de la atmósfera favorece la aparición de turbulencia. En los niveles bajos, representa un peligro para las operaciones de aterrizaje y despegue. Es de especial importancia debajo de la capa de fricción, donde afecta a la senda del planeo obligando al piloto a tomar una acción correctora sobre los mandos del avión.

Algunos de los fenómenos atmosféricos que pueden dar lugar a la aparición de cizalladura son:

- Tormentas, por ejemplo, en los microcrorreventones (*microburst*), que se verán con detalle en el apartado 8.7, o los frentes de racha, que son ráfagas fuertes que se producen en la frontera entre el aire frío de la tormenta y el aire más cálido del entorno, y que forman parte del ciclo normal de formación de las tormentas.
- Tornados, frecuentemente asociados también a las tormentas.
- Frentes fríos o cálidos. Cuando dos masas de aire de diferente velocidad entran en contacto se produce una capa de turbulencia por cizalladura del viento, que puede producirse tanto en el plano horizontal como en el vertical.
- Vientos fuertes, perturbados por el relieve local.
- Inversiones térmicas cerca del suelo asociadas a zonas frontales, brisas (sobre todo marinas),y vientos catabáticos.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

## 9.5. Turbulencia.

La turbulencia es un estado del flujo de aire en el cual las velocidades muestran fluctuaciones irregulares. Cuando un fluido es turbulento, presenta vórtices o remolinos que viajan inmersos en la corriente de aire y dan lugar a variaciones en la intensidad y dirección del viento.

La velocidad del remolino se suma o resta a la del viento predominante, provocando variaciones bruscas, tanto en su intensidad como en su dirección. En aviación se considera que existe turbulencia cuando los efectos de esta afectan al movimiento del avión. Estos efectos se manifiestan en forma de aceleraciones generalmente verticales que se experimentan como violentos y abruptos ascensos y descensos.

La intensidad de la turbulencia se clasifica de la siguiente manera:

a. **Ligera:** causa pequeñas variaciones en la altitud del avión.

b. **Moderada**: las variaciones son de mayor envergadura y suele exigir la intervención del piloto.

c. **Fuerte:** causa variaciones amplias y violentos en altura y en el ángulo de ataque del avión.

d. **Extrema:** el avión es zarandeado violentamente y es prácticamente ingobernable.

Frecuentemente se clasifica la turbulencia según la causa que la origina:

- **Turbulencia convectiva**: Este tipo de turbulencia es típica en los días calurosos del verano o cuando una masa de aire frío se mueve por encima de una superficie con una temperatura más cálida. En estos días la tierra se calienta y transmite calor por conducción a las capas bajas más próximas y, como consecuencia, se originan corrientes convectivas verticales.

  Las corrientes ascendentes tienen intensidades muy variables y, en caso de presencia de humedad e inestabilidad en capas medias y altas, pueden ir acompañadas de grandes nubes de desarrollo vertical. En el caso de que la atmósfera sea estable, la convección afectará solamente a las capas bajas, y, solo si el contenido de humedad es suficientemente elevado, se desarrollarán cúmulos de poco desarrollo, quedando por encima de ellos una capa estable.

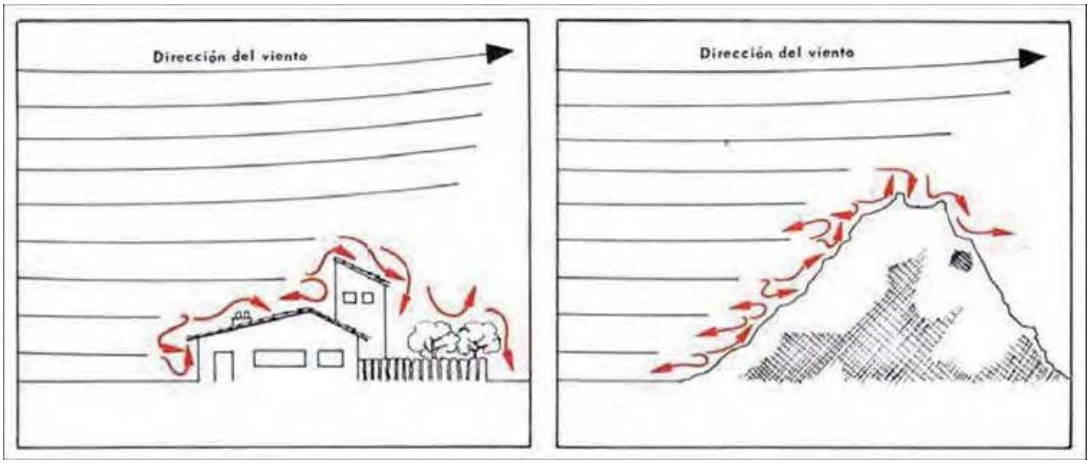
  Aunque por cada corriente ascendente hay una descendente para llenar el vacío que se origina, en aeronáutica sólo se considera el efecto de las ascendentes por ser más violento.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

- **Turbulencia mecánica**: Es aquella que se forma por la presencia de algún obstáculo material en la marcha del viento. La intensidad de la turbulencia dependerá del tamaño de los obstáculos, de la velocidad del viento y de la rugosidad del terreno. El tamaño de los obstáculos puede variar desde grupos de árboles o edificios hasta cadenas de montañas. La turbulencia debida a montañas se conoce como turbulencia por ondas de montaña, siendo una de las más peligrosas, y se tratará específicamente más adelante.

  Si el aire es inestable se forman remolinos grandes y la turbulencia afecta a un espesor mayor de la atmósfera.

  Si el aire es estable los remolinos son más pequeños y la turbulencia afecta a un espesor menor.




*Turbulencia mecánica y turbulencia orográfica.*

- **Turbulencia de estela (wake turbulence)**: Este tipo de turbulencia es producida por los aviones en vuelo, en el aterrizaje y en el despegue cuando dejan tras de sí remolinos de aire que se desplazan con el viento y que tardan en disiparse. Detrás de la aeronave se producen vórtices turbulentos cuya intensidad depende del tamaño del avión, de su velocidad y de la configuración de las alas.

  Este fenómeno es especialmente crítico en las maniobras de despegue y el controlador debe tener presente que tras el despegue de un avión pesado el aire encima de la pista queda revuelto y puede ser peligroso autorizar en seguida otro despegue.

- **Turbulencia asociada a frentes**: El cambio de presión que origina el paso de un frente se traduce en un cambio de dirección y de intensidad del viento. La intensidad de la turbulencia

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

depende de la violencia del cambio. Generalmente, la turbulencia es mayor en frentes fríos que en cálidos. Si, además del frente, existe convección y vientos sinópticos fuertes, la intensidad de la turbulencia aumenta.

- **Turbulencia por onda de montaña**: Se origina cuando el flujo de aire choca con una cadena montañosa, dando lugar a un comportamiento ondulatorio del flujo de aire, que lleva asociado ascensos y descensos del mismo una vez pasado el obstáculo orográfico. Estas ondas son muy peligrosas y han causado numerosos accidentes. Afectan a todas las aeronaves en el ascenso, pero especialmente a las ligeras en el descenso.

  La onda de montaña suele desaparecer en niveles muy altos; sin embargo, cuando hay una corriente en chorro más o menos perpendicular a la montaña, la cizalladura generada por esta corriente en chorro refuerza la acción de la onda.

  En niveles bajos la onda de montaña más peligrosa se produce asociada a rotores, torbellinos que se forman bajo las crestas de las ondas siendo el más peligroso el que se forma debajo de la primera onda.

  Las condiciones que favorecen la aparición de ondas de montaña son las siguientes:

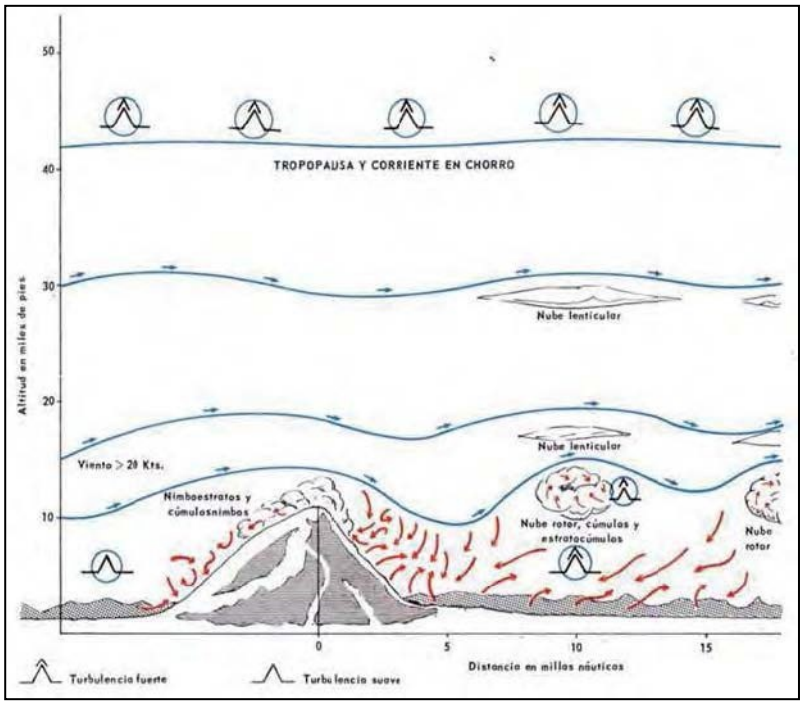
  - La intensidad del viento en la cima debe ser superior a 15 nudos, aunque en caso de que la montaña sea muy alta, puede ser superior. La intensidad del viento también debe aumentar con la altura.
  - La dirección del viento debe ser inferior a 30º respecto a la perpendicular al eje de la montaña y ser constante. Cuanto menor sea este ángulo, más intensa será generalmente la onda de montaña.
  - Por encima de la la cima de la montaña debe existir una capa estable para que se produzca el descenso del aire y su consiguiente movimiento ondulatorio.

  Cuando hay humedad, las ondas de montaña pueden presentar una serie de nubes en los tramos de ascenso de aire, como son:

  - Nubes lenticulares (altocumulos y altoestratos).
  - Peligrosas nubes rotor con aire en su interior girando en el eje horizontal (fractocúmulos y fractostratos).
  - Nubes de ladera y cresta (cumulonimbos y nimbostratos).

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

- Nubes orográficas de tipo bonete o sombrero (estratiformes).




*Onda de montaña típica y turbulencia en aire claro (TAC).*

- **Turbulencia en aire claro (TAC):** Es un tipo de turbulencia que aparece en vuelos de alta cota y muchas veces, fuera de nubes.

  En general, la turbulencia de aire claro es ligera y sólo en algunos casos puede ser severa.

  Generalmente la TAC se presenta:

  - En estratos de poco espesor y, con mayor frecuencia, en capas estables de niveles altos con fuerte cizalladura vertical del viento. La parte superior de la capa estable se desliza con respecto a la inferior, generando cizalladura y, a continuación, ondulaciones. Conforme la cizalladura vertical aumenta se rompen estas ondulaciones dando lugar a los remolinos turbulentos.

  - En lugares cercanos a la corriente en chorro, debido a que la cizalladura vertical que origina es muy intensa. También puede aparecer asociada a ondas de montaña o a dorsales y vaguadas en niveles altos.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

La turbulencia en aire claro se presenta intermitentemente en forma de repentinos baches y meneos intensos y frecuentes. Cuando se presenta en forma de baches, el avión sufre un cambio de altitud. Sin embargo, cuando sufre meneos la aeronave no experimenta grandes variaciones de altitud, sino que sufre sacudidas hacia arriba y hacia abajo produciendo un ruido similar a un martilleo.

Es importante para la gestión del tráfico aéreo el conocimiento de la presencia de corrientes en chorro en el área de gestión, ya que el piloto que experimente una intensa y persistente TAC solicitará cambios de ruta o de nivel para poder evitarla.

- **Turbulencia por tormenta**: Estas turbulencias pueden generarse tanto en el interior de la nube convectiva como en los alrededores. Generalmente esta turbulencia se produce por las intensas corrientes convectivas que se desarrollan y los vientos fuertes en altura que contribuyen a la cizalladura.

### 9.6. Tormentas.

Una tormenta se produce cuando existen nubes de tipo cumulonimbo acompañadas de aparato eléctrico (rayos y truenos).

Para que se forme una tormenta deben darse las condiciones necesarias para que se desarrollen nubes del tipo cumulonimbo, es decir: presencia de energía en forma de calor (sobre todo en superficie), atmósfera inestable, humedad suficiente y, en algunos casos, un mecanismo de elevación que genere intensas corrientes ascendentes de aire (convergencia de vientos a baja cota, ascendencia orográfica del terreno, etc.).

Las tormentas suelen ir acompañadas de chubascos (aunque en climas secos puede haber tormentas secas, sin precipitación, o que ésta no llegue al suelo) e incluso de granizo; producen turbulencias fuertes o extremas, acompañadas de viento fuerte y racheado; además también puede presentarse engelamiento y cizalladura. Es decir, que una tormenta reúne todos los elementos capaces de dañar a un avión en vuelo, por lo que son altamente peligrosas.

Las tormentas pueden clasificarse en función del origen de la formación de los cumulonimbos en:

a. Tormentas frontales: La formación de tormentas frontales se debe a que el aire cálido ascienda por encima de la superficie frontal. Si las tormentas están asociadas al frente frío, se extienden a lo largo del mismo durante varios centenares de kilómetros. Si son de frente cálido, abarcan

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

un área de grandes dimensiones, aunque, en general con menor desarrollo que en los fríos, quedando inmersas en los nimbostratos característicos del frente cálido.

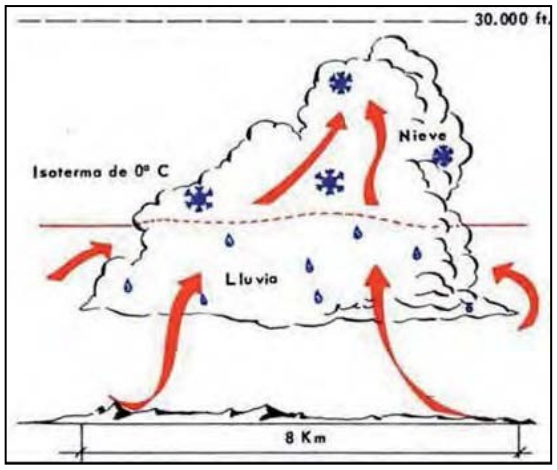
Las tormentas frontales aparecen como encadenadas unas a otras, con lo que en general son más duraderas que las células tormentosas aisladas. Las líneas tormentosas generalmente se van desplazando con el avance del frente, aunque a veces son estacionarias.

b. Tormentas de masa de aire: Las tormentas de masa de aire se producen en una atmósfera inestable, generalmente debido al calentamiento diurno. Normalmente tienen dimensiones de decenas de kilómetros cuadrados. Pueden ser de origen térmico, de origen orográfico o de mezcla turbulenta.

   En las zonas ecuatoriales se dan en cualquier época del año, en latitudes medias aparecen preferentemente en las tardes de verano y primavera y en zonas de latitud superior, donde el calentamiento solar prácticamente no existe, este tipo de tormentas es muy raro.

La vida de una tormenta es relativamente corta, de dos a tres horas. Su evolución puede considerarse dividida en tres fases:

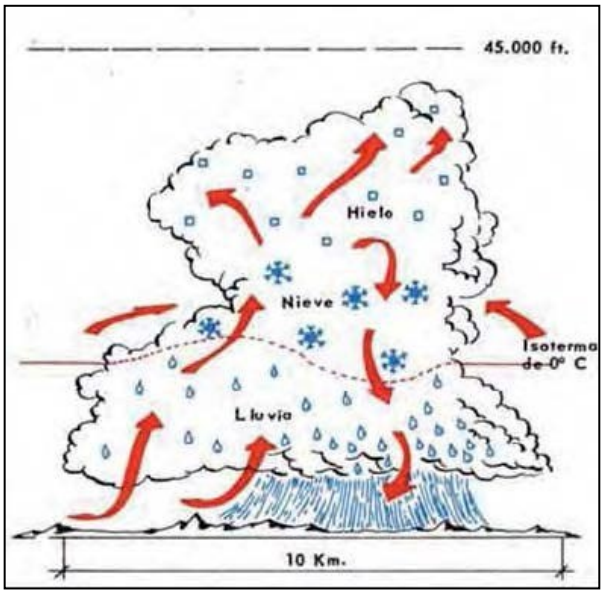
1. **Formación**: Se caracteriza por la existencia de corrientes ascendentes que elevan el aire húmedo, enfriándolo hasta alcanzar la condensación para dar lugar a los Cumulonimbos. Esta condensación libera suficiente energía como para que el aire húmedo siga subiendo, dando lugar a nuevas condensaciones y al crecimiento de las gotas de agua. También se comienzan a generar corrientes descendentes fuera de la nube, pero mucho menos intensas que las ascendentes.




*Etapa de formación de una tormenta.*

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

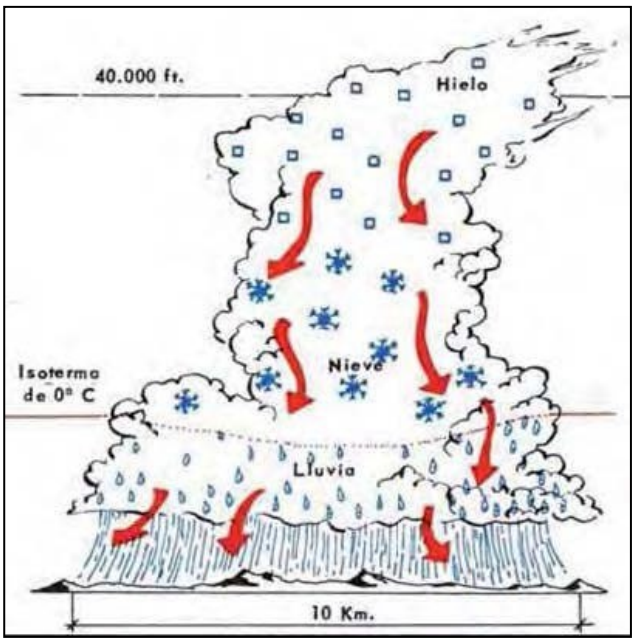
2. **Madurez:** Comienza cuando las gotas de agua líquida o de hielo comienzan a caer (chubascos y granizo) debido al peso que ejercen. La caída de precipitación genera unas corrientes descendentes de aire que, al llegar al suelo, forman el frente de racha. Se generan igualmente fuertes torbellinos que dan lugar a fenómenos de cizalladura y turbulencia. En esta fase, las corrientes descendentes coexisten con corrientes ascendentes, que alcanzan su máxima intensidad, y la nube puede llegar a presentar la forma de yunque en su parte superior. También se dan frecuentes descargas eléctricas.




*Etapa de madurez de una tormenta*

3. **Disipación**: Comienza cuando desaparecen las corrientes ascendentes. Las corrientes descendentes se extienden en todo el nivel inferior de la nube y se van suavizando. Las precipitaciones disminuyen y la nube comienza a disiparse.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*




*Etapa de disipación de una tormenta*

### 9.6.1 Líneas de turbonada.

Una línea de turbonada es una línea de tormentas muy activas que puede alcanzar una dimensión de hasta cientos de kilómetros de longitud y de 20 a 50 Km de anchura, siendo su velocidad de desplazamiento variable, pero de unos 25 kt en promedio

La línea de turbonada está asociada a condiciones de tiempo severo, como:

- Vientos fuertes y destructivos.
- Turbulencia severa.
- Granizo fuerte.
- Tornados.

### 9.6.2 Microrreventón.

El microrreventón es una fuerte corriente de aire descendente de aire frío y denso que se origina desde una nube convectiva. Las corrientes de aire descendentes pueden llegar hasta los 60 kt, velocidad que supera el régimen de descenso de un avión.

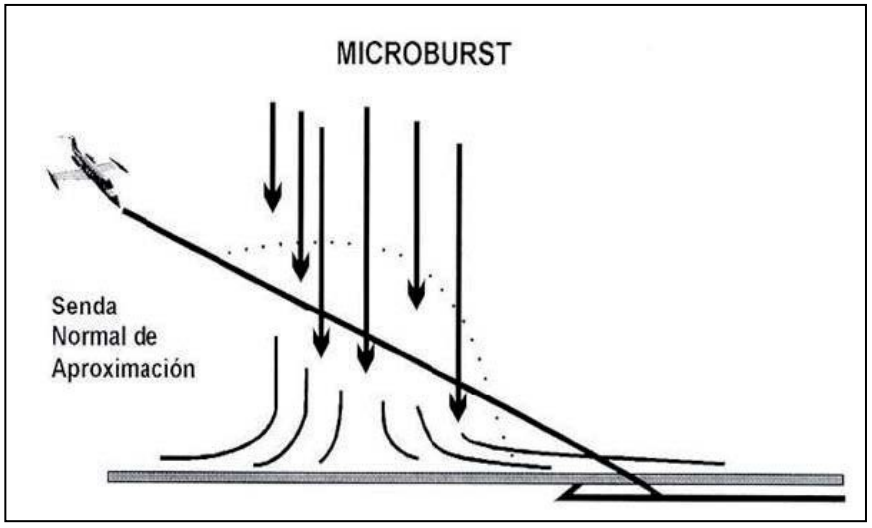
Cuando el aire descendente alcanza el suelo, se extiende horizontalmente con violencia formando uno o más torbellinos horizontales, que se curvan alrededor de la columna descendente (vórtices anulares). Estos torbellinos pueden alcanzar hasta 1 Km de altura sobre el suelo y no siempre son simétricos.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Su escala espacial y temporal es muy pequeña: suelen abarcar una distancia de hasta 5 Km y duran entre 1 y 5 minutos, nunca más de 15 minutos desde que llega al suelo hasta que desparece.

Un microrreventón genera vientos que pueden llegar a alcanzar valores de hasta 150 kt, con variaciones en la velocidad de más de 50 kt, dando lugar a una fortísima cizalladura. El microrreventón también genera variaciones de presión que pueden alterar el funcionamiento de los instrumentos de vuelo.

Por último, el microrreventón puede ir acompañado de precipitación, en cuyo caso se denominada **microrreventón húmedo**. En caso contrario, se denomina **microrreventón seco**.




*Microburst en una maniobra de aproximación.*

### 9.6.3 Tornado/Tromba marina.

Un tornado es una columna de aire que rota violentamente. Se origina en la base de un cumulonimbo, extendiéndose hasta el suelo. Su giro ciclónico produce una succión del aire que existe en su interior generando una caía de presión en el mismo.

El diámetro de un tornado puede variar desde menos de 10 metros hasta 1 kilómetro. Se desplaza sobre el suelo a una velocidad media de 25 kt aproximadamente, llegando a provocar vientos en superficie con valores superiores a 270 kt. Cuando el torbellino no alcanza la superficie terrestre se llama **tuba** (funnel cloud) y si la formación del tornado tiene lugar sobre el mar, se forma la llamada tromba marina, en la que el agua es aspirada hasta centenares de metros de altura.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

*Tornado con embudo tocando el suelo.*

*Tromba marina.*

## 9.7. Ciclones tropicales.

Ciclón, Huracán o Tifón son términos utilizados para designar un ciclón tropical según la zona en la que se observa. En el Atlántico norte occidental, la parte central y oriental del Pacífico norte, el mar Caribe y el Golfo de México se denomina "Huracán", mientras que en la Bahía de Bengala y el Mar Arábigo se denomina "Ciclón". El término Tifón se utiliza en las Islas Filipinas, Taiwán, China y Japón.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*

Las depresiones tropicales son depresiones no frontales que se forman entre los 25ºN y los 25ºS, aproximadamente, cuando el agua del mar está muy caliente (aproximadamente por encima de 27ºC). El sistema de bajas presiones empieza a ganar energía que se manifiesta en forma de energía cinética mediante el aumento de velocidad en el giro del viento a su alrededor.

A medida que la intensidad del viento en superficie aumenta, una depresión tropical recibe las siguientes denominaciones:

- Perturbación tropical, con vientos en superficie ligeros.
- Depresión tropical, con vientos máximos en superficie de hasta 33 kt.
- Tormenta tropical, con vientos máximos dentro del rango de 34 a 63 kt.
- **Huracán, Ciclón o Tifón**, con vientos máximos en superficie mayores a 64 kt.

La presencia de un Ciclón, Tifón o Huracán es razón suficiente para suspender toda actividad aérea.

### 9.8. Corrientes convectivas.

El calentamiento del suelo provoca movimientos verticales o corrientes convectivas. El aire que se encuentra inmediatamente por encima del suelo caliente se calienta igualmente por conducción, se hace menos denso y asciende. Al ascender, este aire se expande y se enfría por lo que en algún momento volverá a descender.

Las corrientes convectivas pueden provocar turbulencia y a veces súbitos y bruscos ascensos y descensos de las aeronaves.

### 9.9. Temperaturas elevadas.

En los aeródromos donde se alcanzan temperaturas por encima de los 30ºC se produce una disminución de la densidad del aire que puede condicionar el recorrido de despegue del avión, por lo que es necesario que tengan pistas lo suficientemente largas, o bien que se reduzca el peso máximo autorizado para que el avión pueda despegar.

*© 2023 ENAIRE*
*La información aquí expuesta es propiedad de ENAIRE.*
*No puede ser usada, reproducida y/o transmitida por ningún medio, sin la autorización expresa de ENAIRE.*