

METEOROLOGIA AERONAUTICA

Parte III

Temporali, formazione di ghiaccio in quota e al suolo, fenomeni di riduzione della visibilità



TEMPORALI

Il temporale è una perturbazione locale caratterizzata da:

- nubi del tipo cumulonembo
 - breve durata (1-3 ore)
 - fenomeni elettrici (lampi e tuoni)
 - forti raffiche di vento
 - violente correnti verticali
 - rovesci di pioggia (anche grandine)
- All'interno del temporale si possono produrre tutti i fenomeni meteorologici pericolosi per il volo:
 - turbolenza e wind shear
 - ghiaccio
 - riduzione di visibilità

CONDOTTA DI VOLO => EVITARE

CUMULONEMBO



CONDIZIONI FAVOREVOLI ALLA FORMAZIONE DEI TEMPORALI

Le condizioni favorevoli alla formazione dei temporali sono:

- la presenza di aria umida in uno strato considerevole
- la presenza di un meccanismo di sollevamento dell'aria, che può essere:
 - orografico
 - l'aria è costretta a salire in presenza di rilievi montuosi
 - frontale
 - l'aria sale perché sospinta da altra aria che la scalza
 - convergenza
 - l'aria converge in un punto ed è costretta a salire
 - termico
 - l'aria a contatto con il suolo, più calda di quella circostante, è più leggera e sale verso l'alto
- aria instabile:
 - la diminuzione della temperatura con la quota dell'atmosfera è superiore a quella della particella d'aria che si solleva (adiabatica)
 - essa sarà sempre più calda dell'aria circostante e continuerà a salire, e tenderà a formare una nube a forte sviluppo verticale

TIPI DI TEMPORALI

I temporali sono abitualmente divisi in **temporali di massa d'aria** e **temporali frontali**, a seconda del meccanismo che porta alla loro formazione.

- I temporali di massa d'aria:
 - sono prevalentemente di tipo convettivo
 - sono dovuti al riscaldamento del suolo da parte del sole
 - si verificano più facilmente a fine pomeriggio sulla terra, di notte sul mare
- I temporali frontali:
 - sono più frequenti nel fronte freddo che nel fronte caldo, per le caratteristiche dei due fronti
 - nel fronte caldo l'aria calda scorre su quella più fredda, in quello freddo l'aria fredda scalza violentemente l'aria calda
 - si possono formare anche davanti al fronte (temporali prefrontali)

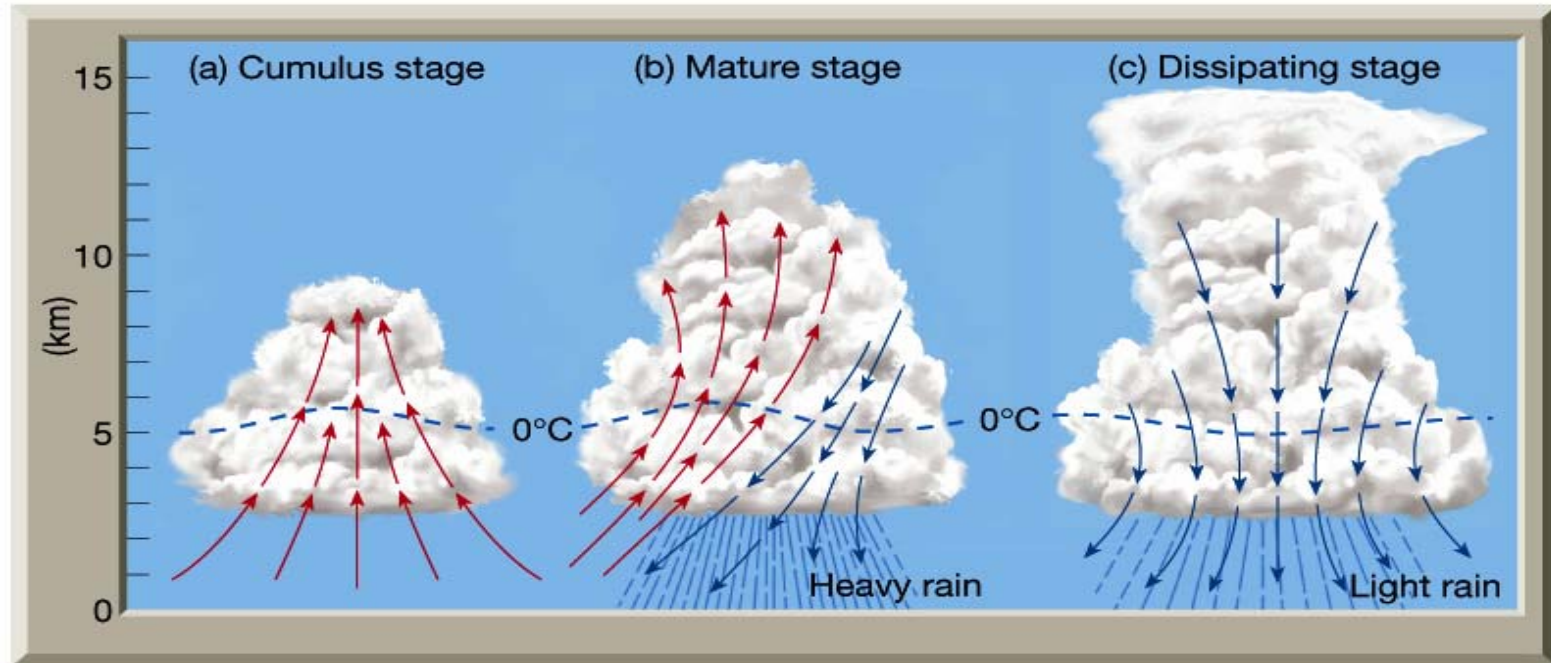
TEMPORALI DI MASSA D'ARIA

- I temporali di massa d'aria possono essere composti da una o più celle temporalesche.
- Il diametro di ciascuna cella è inferiore a 10 km.
- Lo sviluppo di una singola cella avviene in tre distinte fasi, dette **ciclo vitale del temporale**:
 - la fase di formazione o di cumulo
 - la fase di maturità o di massimo sviluppo
 - la fase di dissolvimento
- Il ciclo vitale di ciascuna cella temporalesca dura mediamente da 1 a 2 ore.

CICLO VITALE DEL TEMPORALE

- Fase di formazione, o di cumulo:
 - caratterizzata dalla formazione della nube temporalesca, inizialmente un towering cumulus (TCU), nella quale prevalgono le correnti ascendenti
- Fase matura:
 - inizia con la precipitazione
 - è caratterizzata dalla presenza di lampi e tuoni
 - la circolazione all'interno della nube è ben organizzata e presenta correnti ascendenti associate a correnti discendenti
 - in questa fase si presentano il gust front e le forti correnti discendenti (microburst)
 - è la fase più pericolosa per il volo
- Fase di dissipazione:
 - è caratterizzata da sole correnti discendenti

CICLO VITALE DEL TEMPORALE



ICING

CONTAMINAZIONE DA GHIACCIO

Definizione: formazione di un deposito di ghiaccio sulla struttura dell'aeromobile o sul motore.

Questo può avvenire nei seguenti due modi:

- per congelamento di acqua sopraffusa
- attraverso il processo di deposizione, nel quale il vapore d'acqua è trasformato in ghiaccio senza passare dallo stato liquido

Pericoli per il volo: crescita di peso, alterazione delle proprietà aerodinamiche dell'aereo. Nel motore può portare a perdita di potenza.

Si può formare: in volo nelle nubi, in volo in aria chiara, a terra

ICING IN VOLO NELLE NUBI

- I fattori che contribuiscono alla formazione del ghiaccio in volo in nube possono essere suddivisi in **fattori meteorologici**, causati cioè dalle condizioni meteorologiche, e **fattori aerodinamici**, che coinvolgono il velivolo.
 - I fattori meteorologici sono:
 - il contenuto di acqua sopraffusa
 - il contenuto di cristalli di ghiaccio
 - la temperatura
 - l'umidità
 - la distribuzione delle gocce e dei cristalli
 - I fattori aerodinamici sono:
 - l'efficienza di cattura delle gocce da parte del velivolo
 - la velocità del velivolo
 - la temperatura superficiale del velivolo

ICING IN VOLO NELLE NUBI

Perché si formi ghiaccio in nube sono necessarie due condizioni fondamentali:

- la presenza di gocce di acqua allo stato di sopraffusione
- che la temperatura ambiente e/o delle superfici dell'aeromobile sia inferiore a 0°C

L'acqua sopraffusa è:

- acqua liquida anche con temperature inferiori a 0°C
- è frequente a temperature comprese tra 0° e -15°C
- è uno stato di equilibrio critico facilmente perturbabile
 - ogni perturbazione provoca l'immediato ghiacciamento delle gocce, quindi anche il contatto con un corpo solido
 - » anche le superfici dell'aeromobile

CONGELAMENTO

Generalmente il processo di congelamento avviene perché una goccia che si trova a temperature inferiori a 0 °C incontra i nuclei di congelamento, attorno ai quali si attiva il processo.

I nuclei di congelamento sono:

- attivi a temperature inferiori a -15°C
- in numero crescente al decrescere della temperatura
- più frequenti in gocce grosse
 - Le gocce di pioggia (diametro maggiore di 1 mm) congelano a temperature comprese tra -15°C e -20°C
 - Le gocce di nube (10-20 micron) congelano a t circa -30°C
 - Anche le più piccole sono congelate a t=-40°C
 - quest'ultima è la temperatura limite entro la quale si può trovare acqua sopraffusa in nube

CONGELAMENTO

- L'impatto delle superfici dell'aeromobile con l'acqua sopraffusa provoca il congelamento.
 - Se le gocce di nube sono piccole e la temperatura è inferiore a -20°C , poiché la temperatura della goccia (che si trova a 0°C) è più alta dell'aria circostante, il processo è immediato
 - Se le gocce di nube sono grandi e la temperatura è attorno a 0°C il processo è più lento perché è complicato dal rilascio di calore latente da parte del cambiamento di stato, che rallenta il processo stesso
 - di conseguenza le gocce hanno il tempo di spalmarsi sulla superficie del velivolo prima di congelare

QUINDI:

- Se la temperatura ambiente è di poco inferiore a 0°C:
 - il congelamento è più lento
 - ogni goccia ha il tempo di spalmarsi sulla superficie dell'aeromobile
 - le gocce si fondono assieme prima di congelare
 - la formazione di ghiaccio che ne consegue è ben aderente, compatta e solida
 - » si chiama **ghiaccio vetrone**
- Se la temperatura ambiente è molto bassa:
 - le gocce congelano prima di unirsi
 - la formazione di ghiaccio è friabile
 - » si chiama **ghiaccio granuloso**

CONTENUTO DI ACQUA IN NUBE

Altro fattore meteorologico che va tenuto in considerazione è il contenuto complessivo di acqua nella nube.

Valori indicativi:

- Il valore massimo si ha nelle nubi tropicali ($0,008 \text{ kg/m}^3$) a circa 8 km sopra la base della nube e attorno a -10°C
- Nelle regioni temperate il valore è $0,005 \text{ kg/m}^3$ a 6 km sopra la base della nube a circa -25°C
- Occorre però analizzare a parte i casi di **nubi miste**, dove sono cioè presenti contemporaneamente acqua e cristalli di ghiaccio, e il caso in cui vi sia presenza di precipitazione.

CONTENUTO DI ACQUA IN NUBE

- Nelle nubi miste:
 - La presenza di ghiaccio induce il congelamento dell'acqua sopraffusa eventualmente presente, diminuendo così la possibilità di formazione di ghiaccio
 - I cristalli fungono infatti da nuclei di congelamento
 - In una nube recente il fenomeno è attivo solo se la temperatura è inferiore a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - In una nube di vecchia formazione è necessario un meccanismo di rimpiazzo del vapore, come nel caso di nubi convettive e fronti
- La precipitazione ha due effetti contrapposti:
 - Le gocce d'acqua sopraffusa diminuiscono per coalescenza (le gocce di nube si uniscono alle gocce di pioggia ingrossandola)
 - La precipitazione d'altro canto aumenta il contenuto d'acqua della nube per caduta dagli strati superiori della nube

In sintesi si può dire che il contenuto di acqua in nube è difficile da determinare.

FATTORI AERODINAMICI

- Efficienza di cattura delle gocce da parte della superficie del velivolo:
 - Minore è il raggio di curvatura e maggiore il numero delle gocce catturate
 - il ghiaccio si forma più facilmente sulle superfici a cuspidi, sulle ali, sulle antenne ecc.
 - L'efficienza di cattura aumenta all'aumentare della velocità aereo
 - L'efficienza di cattura aumenta all'aumentare della dimensione delle gocce
 - le nubi con gocce più grosse – nubi di tipo cumuliforme – sono più pericolose
- Temperatura della superficie dell'aereo:
 - Deve essere inferiore a 0°C
 - La temperatura può aumentare a causa dell'energia cinetica (per attrito dell'aria e compressione delle gocce a contatto con l'aereo)
 - L'effetto è ridotto volando in nube perché il calore prodotto viene assorbito dall'acqua

ICING IN VOLO NELLE NUBI

- Concludendo, si può dire che l'icing in nube è pericoloso tra 0°C e -10°C, ed è più frequente tra -4°C e -10°C
 - se le temperature sono inferiori a -10°C si forma ghiaccio più friabile
 - se le temperature sono inferiori a -40°C il problema non esiste
- Le nubi più pericolose per l'icing sono, nell'ordine:
 - cumuli e cumulonembi
 - hanno un alto contenuto di gocce
 - contengono gocce di dimensioni maggiori
 - nembostrati
 - nella parte inferiore hanno una consistente densità di gocce d'acqua
 - sotto la nube in presenza di precipitazioni congelatesi
 - nubi stratiformi in generale
 - in caso di lunga permanenza in nube
 - con temperature molto basse

ICING IN VOLO IN ARIA CHIARA

- In aria chiara (priva di nubi) si può formare ghiaccio al carburatore:
 - l'aria aspirata nel carburatore si espande raffreddandosi
 - anche la benzina sottrae calore all'aria per evaporare
 - se entra aria umida:
 - può raffreddarsi sotto 0°C e sotto il punto di rugiada
 - i depositi di ghiaccio diminuiscono la sezione di aspirazione
 - diminuzione potenza del motore
- Rimedi:
 - termometro per monitorare la temperatura del carburatore
 - dispositivo di riscaldamento del carburatore

ICING A TERRA

- Per quanto riguarda l'icing che si può formare su un aeromobile a terra si fornisce l'esempio di un incidente:
 - Stoccolma, 1991, caso dell'MD81
 - Atterra dopo un lungo volo in quota
 - Viene lasciato la notte all'aperto con:
 - molto carburante nei serbatoi alari
 - temperatura ambiente prossima a 0°C
 - forte umidità atmosferica
 - una leggera precipitazione
 - Il carburante possiede un'elevata inerzia termica, dunque mantiene temperature inferiori a 0°C anche dopo ore
 - Si formò una forte formazione di ghiaccio sulla parte superiore delle superfici alari (venne controllata solo la parte inferiore)
 - Il deicing venne fatto, ma solo nella parte inferiore
 - Al decollo blocchi di ghiaccio si staccarono e colpirono i motori
 - Spegnimento dei motori e principio incendio
 - L'atterraggio di emergenza riuscì, ma l'aereo venne distrutto

PRINCIPALI TIPI DI GHIACCIO

- **Ghiaccio brinoso**, hoar frost:
 - aspetto di cristalli di ghiaccio leggero, simile a brina
 - si forma in aria chiara per sublimazione del vapore acqueo
 - si forma a terra e in volo; fa da base per la formazione di altri tipi di ghiaccio
- **Ghiaccio granuloso**, rime ice:
 - struttura opaca, porosa
 - si forma per congelamento di piccole gocce di acqua sopraffusa
 - si forma nelle nubi e nella pioviggine, tra -10°C e -20°C
- **Ghiaccio vetrone**, clear ice:
 - ghiaccio chiaro, compatto, trasparente, aderente
 - si forma per congelamento di grosse gocce di acqua sopraffusa
 - si forma nelle nubi tra 0°C e -10°C

ICING - CLASSIFICAZIONE

- **Tracce** (traces): Ice becomes perceptible. Rate of accumulation slightly greater than rate of sublimation. It is not hazardous even though deicing/anti-icing equipment is not utilized, unless encountered for an extended period of time - over one hour.
- **Leggero** (light): The rate of accumulation may create a problem if flight is prolonged in this environment (over one hour). Occasional use of deicing/anti-icing equipment removes/prevents accumulation. It does not present a problem if the deicing/anti-icing equipment is used.
- **Moderato** (moderate): The rate of accumulation is such that even short encounters become potentially hazardous and use of deicing/anti-icing equipment or diversion is necessary.
- **Severo** (severe): The rate of accumulation is such that deicing/anti-icing equipment fails to reduce or control the hazard. Immediate diversion is necessary.

EFFETTI DEL GHIACCIO SULL'AEROMOBILE

- Alterazione del flusso aerodinamico
 - i profili aerodinamici vengono deformati dagli accumuli di ghiaccio
 - diminuzione della portanza e aumento della resistenza
- Ostruzione delle prese d'aria di alimentazione
 - diminuzione della potenza erogata dai motori
- Mancanza di visibilità anteriore
- Ostruzione della presa dinamica
 - indice anemometrico a zero o su valori inattendibili
 - blocco avvisatore di stallo
- Disturbi alle comunicazioni
 - comunicazioni radio e ricezione segnali di radionavigazione
 - per accumulo di ghiaccio su antenne

VISIBILITA'

- I fenomeni meteorologici di riduzione della visibilità sono:
 - la nebbia
 - la foschia
 - la caligine
 - il fumo
 - le nubi basse
 - le tempeste di sabbia
 - le tempeste di polvere
 - le eruzioni vulcaniche
 - forti precipitazioni
 - le tempeste di neve
- Nei nostri aeroporti il fenomeno più frequente e che porta a riduzioni di visibilità più critiche è la **nebbia**

VISIBILITA', DEFINIZIONI

- **Meteorological Visibility, MOR**

- Di giorno: la massima distanza alla quale un oggetto di notevoli dimensioni, nero alla radiazione visibile, può essere visto sullo sfondo del cielo all'orizzonte
- Di notte: massima distanza alla quale può essere vista una lampada di moderata intensità
 - è una misura della trasparenza dell'atmosfera in direzione orizzontale
 - è misurata al suolo

- **Runway Visual Range, RVR (Portata Visuale di Pista)**

- la massima distanza, nella direzione del decollo o dell'atterraggio, alla quale la pista o le luci di pista o gli appositi contrassegni che la delimitano sono visibili da una posizione situata sopra un determinato punto sul suo asse, ad un'altezza corrispondente al livello medio degli occhi del pilota al punto di impatto. A tale scopo, un'altezza di circa 5 metri è considerata come corrispondente al livello medio degli occhi del pilota al punto di contatto.
- Si misura nel caso in cui la visibilità meteorologica lungo la pista sia al di sotto di 1500 m.

NEBBIA

- **Definizione:** il fenomeno meteorologico di riduzione della visibilità orizzontale al di sotto di 1000 m dovuta alla presenza di gocce d'acqua o cristalli di ghiaccio. Quando la visibilità è ridotta a valori inferiori a 5000 m e superiori a 1000 m si parla di **foschia**.

La nebbia, a seconda del meccanismo che porta alla sua formazione, può essere suddivisa in:

- Nebbia di massa d'aria, a sua volta divisa in nebbia da irraggiamento e nebbia da avvezione
- Nebbia frontale

NEBBIA DA IRRAGGIAMENTO

Si verifica per raffreddamento dovuto alla perdita radiativa di calore da parte del suolo.

- I requisiti per la sua formazione sono:
 - alta umidità al suolo
 - aria stabile
 - assenza di nubi
 - vento debole
- I fattori meteorologici che ne favoriscono la formazione sono:
 - lunghe notti e basse temperature al suolo (inverno)
 - precipitazioni il giorno precedente
- La massima frequenza si manifesta:
 - nelle prime ore del mattino, all'alba

NEBBIA DA IRRAGGIAMENTO

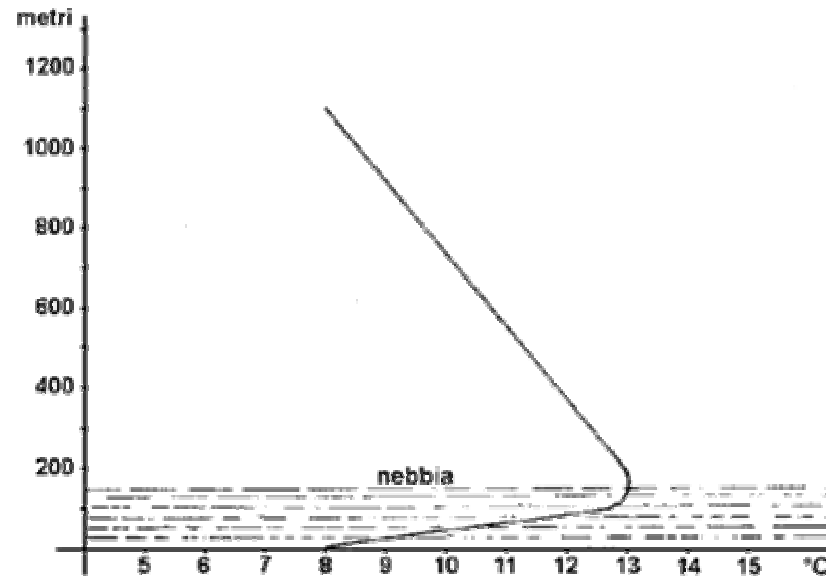
- Meccanismo di formazione:
 - nelle ore più fredde, il suolo perde il calore accumulato durante il giorno e raffredda gli strati d'aria immediatamente sovrastanti
 - se la temperatura raggiunge la temperatura di rugiada l'umidità presente nell'aria condensa e forma una nube al suolo (la nebbia)
 - **temperatura di rugiada**: la temperatura a cui si ha l'inizio della condensazione se l'aria è raffreddata a pressione costante senza aggiunta o sottrazione di vapore
 - quando la temperatura e la temperatura di rugiada sono uguali l'**umidità relativa** è pari al 100%
 - l'aria deve essere stabile
 - si forma una inversione termica al suolo

STABILITA' DELL'ARIA E INVERSIONE TERMICA

- L'aria si dice stabile quando la temperatura decresce con la quota ad un rateo inferiore a quello adiabatico. Questo significa che una particella d'aria che si solleva adiabaticamente dal suolo, per un meccanismo qualsiasi (sospinta da una superficie frontale, per riscaldamento del suolo, per effetto dell'orografia) sarà più fredda dell'aria circostante e tenderà quindi a scendere nuovamente
- Quando il suolo, per radiazione, raffredda l'aria immediatamente sovrastante, questa si troverà ad avere una temperatura inferiore all'aria che ha sopra, dunque la temperatura cresce anziché decrescere con la quota. Questo è il fenomeno dell'inversione termica. Una inversione termica blocca del tutto i movimenti verticali verso l'alto, e dunque intrappola la nebbia all'interno dello strato in cui è presente l'inversione.
- Durante il giorno, se il riscaldamento del suolo da parte del sole è sufficiente, l'aria nelle vicinanze del suolo si riscalda, e l'inversione si rompe. La nebbia si può dissipare.

INVERSIONE TERMICA

- Si ha inversione termica quando la temperatura di uno strato d'aria aumenta con la quota anziché diminuire
- L'inversione blocca i moti verticali e quindi impedisce la dissipazione della nebbia



NEBBIA DA AVVEZIONE

- La parola avvezione indica spostamento orizzontale di aria. In questo caso è necessaria la presenza di vento.
- La nebbia da avvezione si forma quando aria calda e umida si sposta su una superficie relativamente più fredda
 - l'aria si raffredda per contatto e può condensare, se la sua temperatura raggiunge quella di rugiada
- Vi sono due specie di nebbia da avvezione:
 - Le nebbie marittime
 - si formano quando l'aria da una zona calda si sposta verso una zona fredda oceanica
 - Le nebbie costiere
 - in questo caso l'aria calda marittima si sposta verso la terraferma più fredda
 - questa può verificarsi anche sulle rive di piccole distese acqua (laghi)

- **NEBBIA FRONTALE**

- è associata al passaggio di un fronte caldo
 - si forma principalmente per l'evaporazione delle precipitazioni nell'aria fredda sottostante
 - in questo caso è l'aggiunta di vapore che provoca la saturazione dell'aria fredda
- si può formare anche davanti al fronte (nebbia pre-frontale), come formazione di una nube al suolo
- può interessare zone molto estese per lungo tempo

- **NEBBIA DI VAPORE**

- è un tipo particolare di nebbia
- si forma quando l'aria fredda si sposta su una superficie di acqua più calda
- si ha evaporazione di una parte del vapore
- il vapore condensa nell'aria fredda sovrastante
 - effetto di “mare fumante”
- la durata e la persistenza sono inferiori alle nebbie da avvezione

PREVISIONE DELLA NEBBIA

La previsione della nebbia si basa sulla previsione delle condizioni meteorologiche che ne favoriscono la formazione.

- Nebbie da irraggiamento
 - aria umida nei bassi strati
 - cielo sereno o poco nuvoloso
 - natura del terreno (il cemento perde più calore del bosco)
 - vento debole
 - utilizzo del sondaggio termodinamico per verificare la stabilità dell'aria, la sua umidità al suolo e l'altezza dell'inversione termica
- Nebbie da avvezione
 - analisi sinottica
 - verifica della presenza di afflusso di aria caldo-umida
 - analisi locale
 - presenza di un meccanismo di raffreddamento superficiale