

## Guía Meteorológica de Aeródromo:

Josep Tarradellas

Barcelona-El Prat



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización.

**Textos:** Alejandro Méndez Frades, Ramón Pascual Berghaenel y Agustí Pladevall Boix

**Revisión:** María Rosa Pons Reynés y Sergi González Herrero

**Ilustración de la portada:** Julio Aristizábal Arteaga

**Edita:**

© Ministerio para la Transición Ecológica  
Agencia Estatal de Meteorología  
Oficina Programa Cielo Único. Unidad de Meteorología Aeronáutica  
Madrid, 2019

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:  
<http://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 639-19-016-3

<https://doi.org/10.31978/639-19-016-3>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)  
C/ Leonardo Prieto Castro, 8  
28040 Madrid  
<http://www.aemet.es/>

 @Aemet\_Esp

 @Aemet\_Cat

 <https://www.facebook.com/AgenciaEstatalMeteorologia>

# Contenido

---

1.	Introducción .....	5
2.	Situación geográfica .....	7
3.	Fenómenos de impacto .....	11
3.1.	BRISA DE MAR.....	11
3.2.	CIZALLADURA.....	15
3.3.	TORMENTAS .....	17
3.4.	VISIBILIDAD REDUCIDA .....	35
3.5.	LLUVIAS CÁLIDAS INTENSAS .....	39
3.	Impactos .....	42
4.	Resumen .....	48
5.	Summary.....	49
6.	Referencias.....	50
7.	Agradecimientos .....	51



# I. Introducción

---

Una guía meteorológica de aeródromo es un informe técnico en el que se recogen todos los fenómenos meteorológicos que potencialmente son adversos para el desarrollo y regularidad de las operaciones que se llevan a cabo en un determinado aeródromo. El principal objetivo es concienciar a los usuarios aeronáuticos de los riesgos que entraña la fenomenología atmosférica, además de servir de instrumento de asesoramiento en la planificación y toma de decisiones.

## 1.1. El impacto de la meteorología en un aeródromo

El impacto de las condiciones meteorológicas sobre un aeródromo requiere el conocimiento previo de los siguientes conceptos:

- **Fenómeno de impacto:** hecho observable en la atmósfera que potencialmente es adverso en un determinado aeródromo. Representa un nivel de amenaza meteorológica en el marco operativo aeronáutico.
- **Vulnerabilidad:** sensibilidad o predisposición de un aeródromo a ser afectado por la ocurrencia de un fenómeno de impacto.
- **Impacto:** alteración del entorno socioeconómico de un aeródromo como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno meteorológico.

La valoración objetiva del impacto asociado a un fenómeno meteorológico en un aeródromo no solo depende de sus características propias sino que es necesaria la consideración de condicionantes externos. Así, se puede establecer:

$$\text{Impacto} = \text{Fenómeno de impacto} \times \text{Vulnerabilidad}$$

A continuación se muestra un ejemplo de cada uno de los citados términos:

- Fenómeno de impacto: brisa de montaña, tormenta, niebla, etc.
- Vulnerabilidad: el volumen de tráfico en el aeródromo o su dotación tecnológica.
- Impacto: cambios de configuración, aterrizajes frustrados, desvíos a otros aeródromos, etc.

Hay que tener en cuenta que el impacto en la seguridad operacional («safety») ha disminuido en los últimos años, gracias en parte a la mejor dotación tecnológica de las aeronaves y a una mayor sofisticación del sector aeronáutico desde el punto de vista normativo y procedimental. La consideración de escenarios y técnicas permiten gestionar situaciones de riesgo con mayor solvencia.

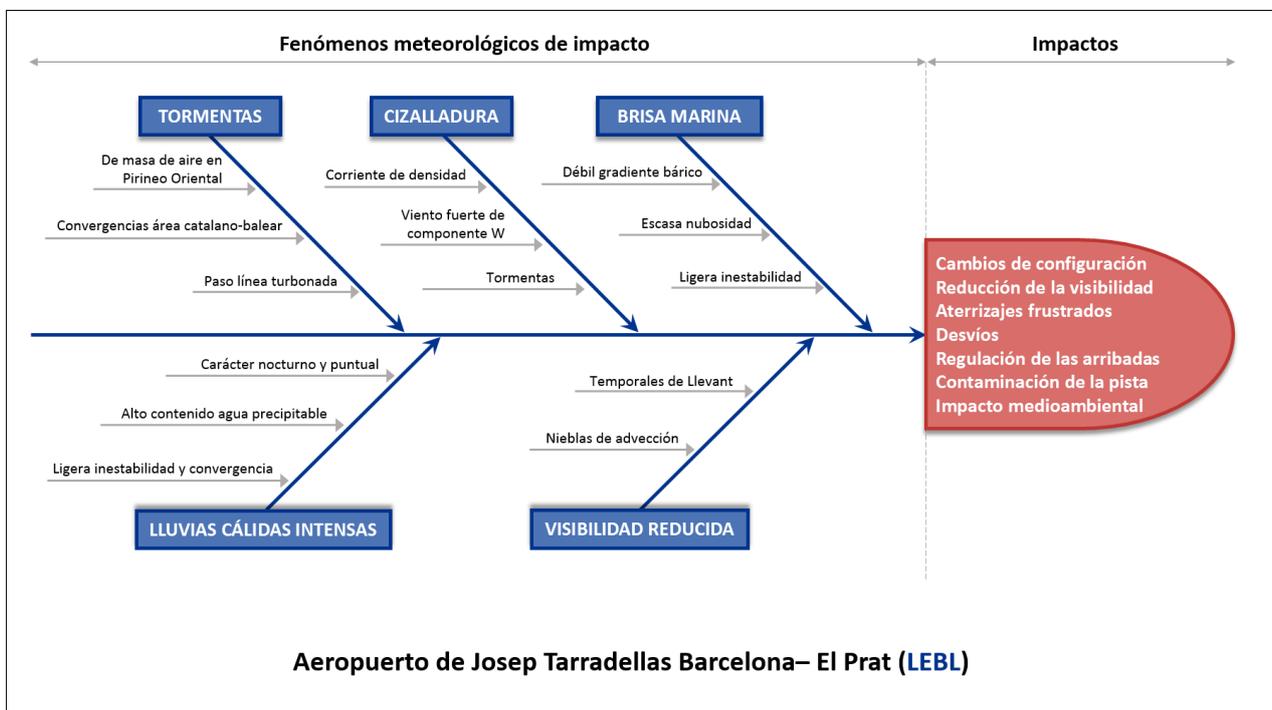
## 1.2. Aplicación para el caso del aeropuerto de Barcelona

En la **figura 1** se detalla el **diagrama Ishikawa** para el aeropuerto de Barcelona (en adelante, **LEBL**). Este esquema permite mostrar, de forma sintética y jerarquizada, cómo los fenómenos meteorológicos de impacto (*factores causales*), acompañados de sus ingredientes (*causas secundarias*), convergen hacia los impactos observados en el aeródromo (*efectos*).

El objetivo será estudiar un aeródromo en un contexto meteorológico orientado a impactos de modo que, a partir de la *información meteorológica* se extraerá el *conocimiento meteorológico* que es de interés para los usuarios aeronáuticos. Para ello, será crucial la identificación adecuada de los fenómenos de impacto (*variables independientes*) que potencialmente tienen incidencia en el entorno operativo del aeródromo objeto de estudio (*variables dependientes*).

Este diagrama *causa- efecto* permitirá, además:

- Obtener una visión global de un aeródromo en un contexto meteorológico orientado a impactos.
- Identificar los ingredientes que intervienen en cada uno de los fenómenos de impacto considerados.
- Mostrar los impactos específicos que se producen en un aeródromo.
- Diferentes fenómenos meteorológicos pueden producir el mismo impacto. De esta forma, la relación causa-efecto no es unívoca.



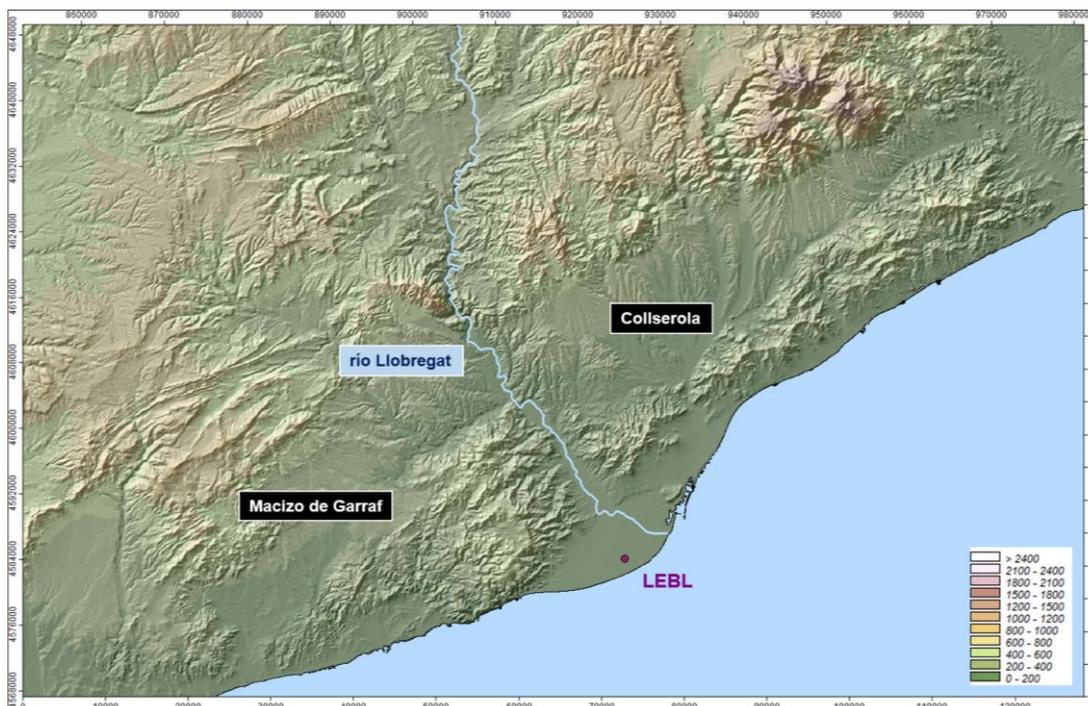
**Figura 1.** Diagrama de Ishikawa para LEBL: la identificación de los fenómenos meteorológicos de impacto exige un conocimiento detallado del entorno meteorológico en el que se encuentra el aeródromo objeto de estudio. Su relación con los impactos observados es el objeto de la presente guía.

## 2. Situación geográfica

El aeropuerto de Barcelona (en adelante, LEBL) se localiza en un delta fluvial, a escasamente 10 kilómetros al sudoeste de la ciudad de Barcelona.

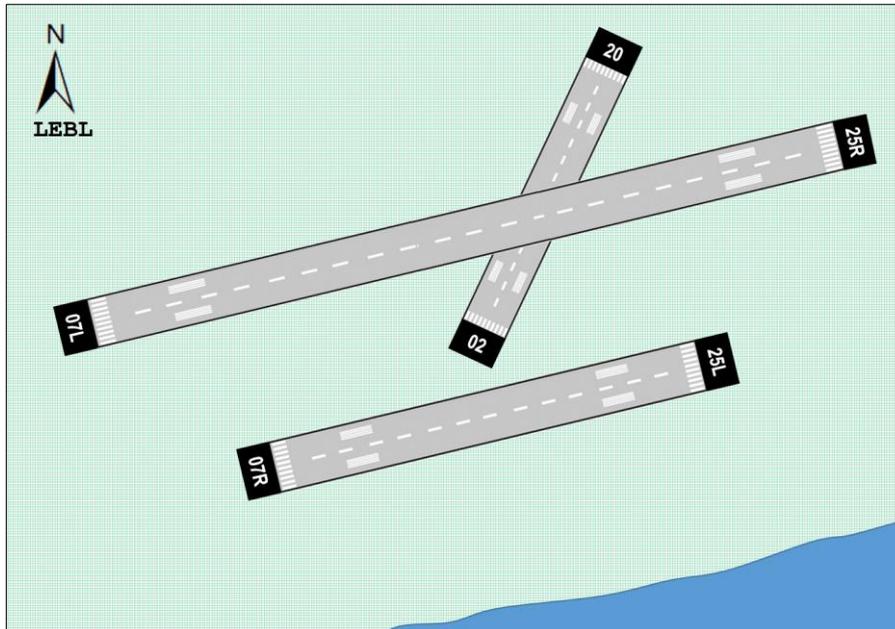
Está flanqueado, al oeste-noroeste, por el macizo del Garraf, cuya cota más alta es la Morella (592 m) y al norte por la sierra de Collserola, una pequeña cordillera montañosa que, sin embargo, tiene el suficiente tamaño como para matizar la configuración de flujos establecidos en sus cercanías. Su cota más alta es el Tibidabo (512 m). Al sur y a escasamente un kilómetro de distancia se encuentra el mar Mediterráneo.

Hay que destacar que el río Llobregat discurre en sus cercanías. De hecho, el brazo principal del río desemboca a unos 4 km al noreste de la cabecera 25. En su tramo final, transcurre por un estrecho valle, de orientación NNW-SSE, encajonado precisamente entre el macizo del Garraf y la sierra de Collserola anteriormente citados y en cuya apertura final forma un delta extremadamente plano, con una pendiente de apenas 0.1 %.



**Figura 2.** Situación geográfica de LEBL: el aeropuerto se localiza en el punto representado. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

En la **figuras 3** se muestra la disposición de las pistas en LEBL. Se trata de dos pistas paralelas (07L/25R y 07R/25L) de orientación suroeste-nordeste y una pista transversal (02/20). La cabecera 25R es la utilizada para la elaboración del METAR.

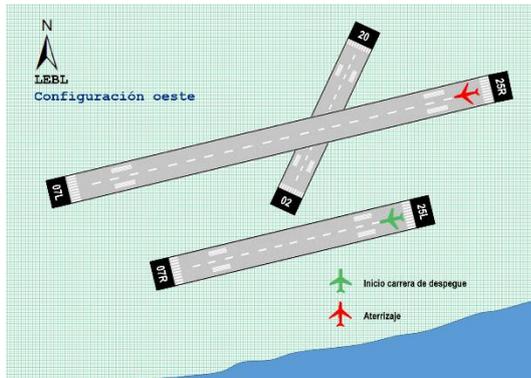


**Figura 3.** Orientación de las pistas en LEBL: dos pistas cuasi paralelas a la línea de costa y una transversal a la pista ubicada hacia el interior.

Teniendo factores tales como el viento medio, la capacidad o el grado de mitigación del ruido en las poblaciones circundantes al aeropuerto, se han establecido diez configuraciones posibles de operación, siendo las más frecuentes las tres que se representan en la **figura 4**.

Como puede observarse, el cifrado de cada una de ellas por tres letras mayúsculas responde a un criterio concreto. Así, teniendo en cuenta la utilización de las dos pistas paralelas, en la que las arribadas y salidas tienen lugar en la misma dirección, la letra inicial correspondería al tipo de configuración operativa, la segunda de ellas a la pista donde tienen lugar las arribadas y la tercera y última de todas ellas, a la pista donde se efectúan las salidas.

Hay que advertir que, si se utilizase una configuración de operación que implicase dos pistas cruzadas, la regla anteriormente citada deja de tener validez, dado que las arribadas y las salidas tienen lugar en diferentes direcciones.



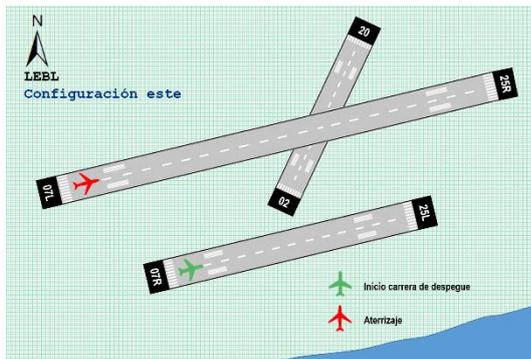
### Configuración WRL (oeste)

**W:** *west*. en relación a las pistas paralelas, el movimiento de las aeronaves es hacia el oeste  
**R:** *right*. Las arribadas se efectúan en la pista de la derecha según la configuración oeste  
**L:** *left*. Las salidas se efectúan en la pista de la izquierda según la configuración oeste

**Arribadas** por la cabecera 25R  
**Despegues** por la cabecera 25L

Configuración preferente diurna

**Capacidad en condiciones óptimas:** 41 arribadas por hora



### Configuración ELR (este)

**E:** *east*. en relación a las pistas paralelas, el movimiento de las aeronaves es hacia el este  
**L:** *left*. Las arribadas se efectúan en la pista de la izquierda según la configuración este  
**R:** *right*. Las salidas se efectúan en la pista derecha según la configuración este

**Arribadas** por la cabecera 07L

**Salidas** por la cabecera 07R

**Capacidad en condiciones óptimas:** 41 arribadas por hora.



### Configuración ENR (nocturna)

**E:** *east*

**N:** *north*

**R:** *right*

En relación a las pistas paralelas, atendiendo a la configuración este, se utiliza la pista la de la derecha para las salidas. Las arribadas se efectúan hacia el norte.

**Arribadas** por la cabecera 02

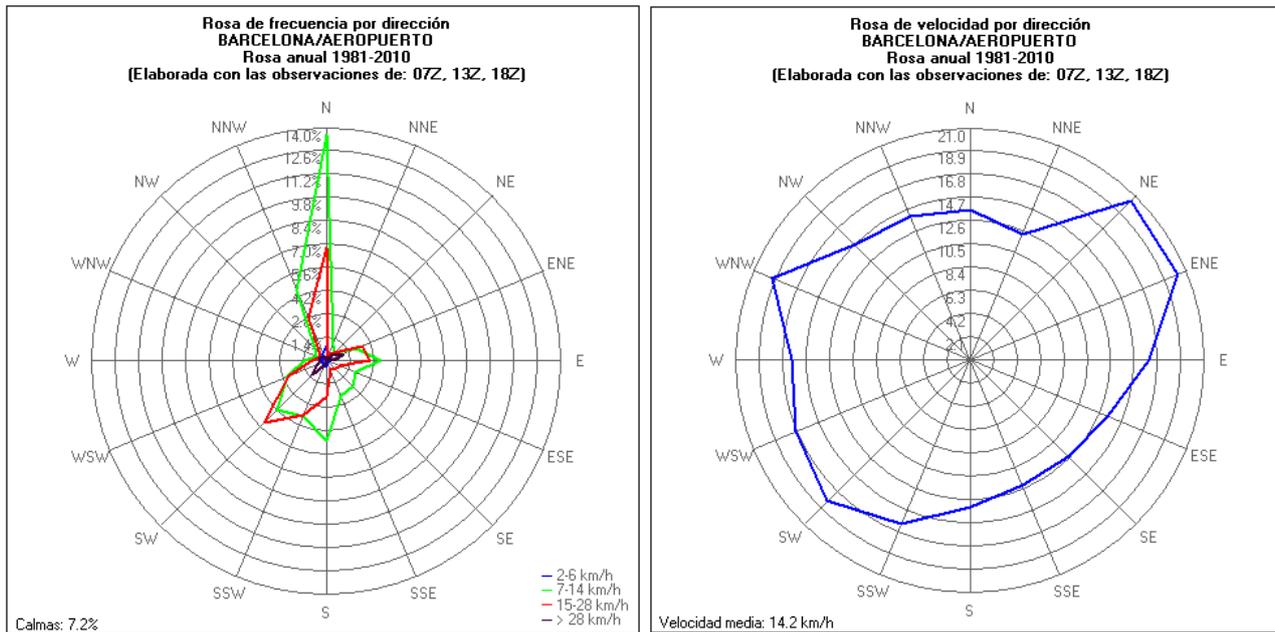
**Salidas** por la cabecera 07R

Configuración preferente nocturna

**Capacidad en condiciones óptimas:** 31 arribadas por hora

**Figura 4.** Síntesis de algunas de las configuraciones de operación en LEBL.

Por otra parte, la [figura 5](#) muestra la rosa de los vientos calculada en LEBL a lo largo del periodo de referencia climatológico 1981-2010. Se trata de un promedio temporal calculado en un punto del espacio gracias a las observaciones obtenidas de la estación sinóptica-climatológica, ubicada en la cabecera 07L.



**Figura 5.** Rosa de vientos de LEBL en el periodo de referencia 1981-2010. Izquierda: frecuencia (en porcentaje) por dirección, en diferentes colores según la velocidad. Derecha: velocidad media (km/h) por dirección.

Lo más relevante puede resumirse en las siguientes tres conclusiones:

1. Preponderancia de los vientos asociados a la célula de brisa marina, apreciándose las direcciones SE y SW (*Garbí*), con máximo de velocidad en esta dirección.
2. Los vientos menos frecuentes son precisamente los más intensos, asociados a las direcciones NE-ENE (*Llevant*) y WNW (*Ponent*).
3. El máximo de frecuencia del N podría asociarse al terral si bien, hay que advertir que éste, por lo general, sopla de NNW (entre 340° y 350°). Esta pequeña discrepancia podría justificarse en base al error asociado al calcular el promedio diario, pues tan solo se están computando tres observaciones diarias: 7 UTC, 13 UTC y 18 UTC.

La [tabla 1](#) resume los datos geográficos más relevantes de LEBL.

Datos geográficos		
Nombre del aeródromo	Josep Tarradellas Barcelona-El Prat	
Indicativo	OACI	LEBL
	IATA	BCN
Latitud	41° 17' 49'' N	
Longitud	2° 4' 42'' E	
Altitud	4 m	

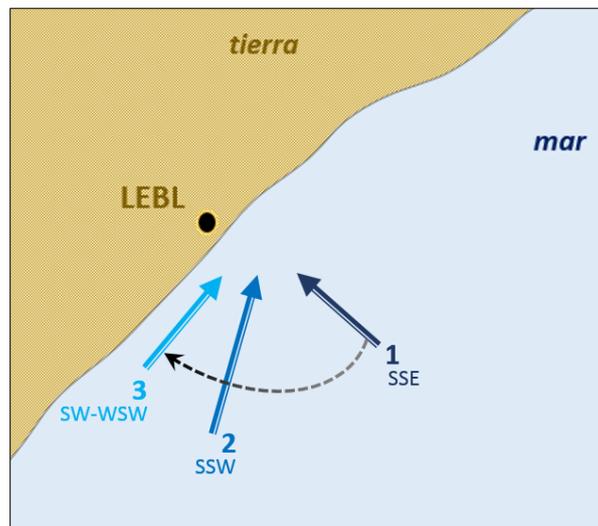
**Tabla 1**

## 3. Fenómenos de impacto

### 3.1. BRISA DE MAR

La brisa de mar es un viento mesoescalar que se origina por la desigual capacidad de calentamiento y enfriamiento que tiene el mar y la superficie terrestre adyacente. La diferencia de la temperatura superficial entre tierra y mar resultante es el mecanismo impulsor de su formación inicial y posterior mantenimiento. Como el de la mayor parte de los fenómenos meteorológicos, su responsable último es el sol.

Hay que advertir que, una vez establecida, su evolución es tal que comienza soplando con una dirección aproximada de 160°. Con el transcurrir de las horas diurnas y teniendo en cuenta el efecto acumulativo del calentamiento, se intensificará, variando su dirección en sentido horario hacia el tercer cuadrante (figura 6) (Martínez, 1995).

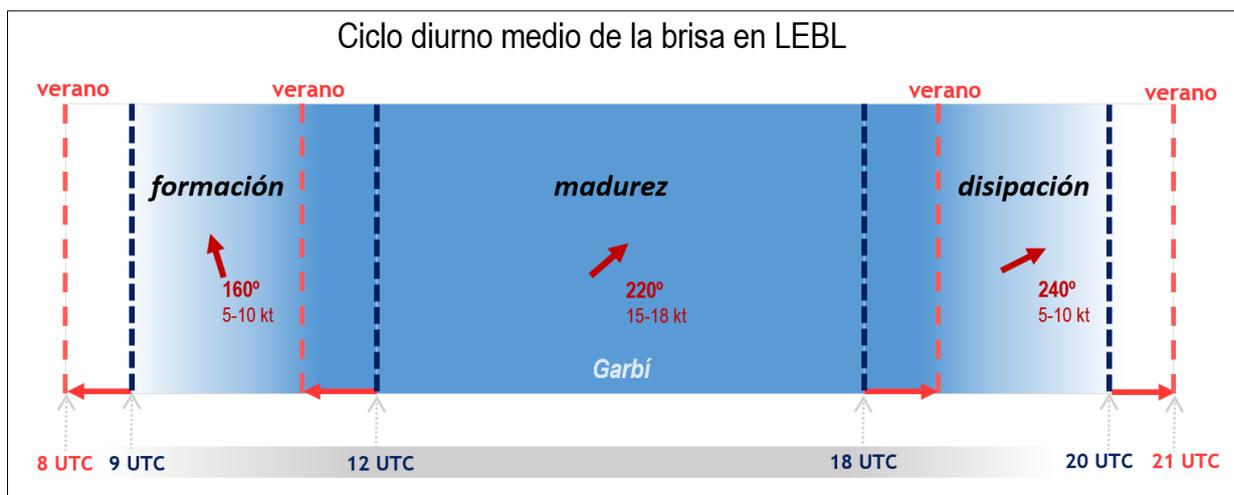


**Figura 6.** Evolución diurna teórica de la dirección de la brisa marina en LEBL. Los números denotan las distintas fase de su ciclo de evolución: 1 formación; 2 madurez y 3 disipación. Adaptado de Martínez (1995).

Por otra parte, cuando una marcada advección cálida en niveles bajos de la atmósfera (entre 925 hPa y 850 hPa) forma una significativa inversión térmica (por ejemplo, una irrupción de aire cálido de procedencia africana), la brisa podría adolecer de la suficiente fortaleza como para manifestarse, a pesar de que la diferencia térmica entre mar y tierra sea significativa.

En estos casos, la existencia de una inversión dificulta los movimientos verticales que comprenden la circulación solenoidal de la brisa, en donde la rama ascendente se encuentra en el frente de brisa y la descendente sobre el mar.

En líneas generales, el ciclo de evolución de la brisa en LEBL podría sintetizarse como se muestra en la [figura 7](#): su comienzo se situaría entre las 9 UTC y 10 UTC con dirección del SE (unos 160° de dirección). La fase en la que se manifiesta notoriamente (madurez) tendría lugar hacia las 14 UTC, siendo su velocidad entre 15 kt y 18 kt y experimentando un giro horario a SSW-WSW, denominado *Garbí* o *Llebeig*. Finalmente, entre las 17 UTC y 19 UTC comenzaría su decaimiento y posterior disipación con el establecimiento del débil terral nocturno del NW.



**Figura 7.** Ciclo diario medio de la brisa en Barcelona. El ensanchamiento o dilatación del ciclo medio, manifestado claramente en la fase de madurez en la que la brisa se manifiesta con toda notoriedad, coincide con la estación climatológica de verano.

Los meses en los que se manifiesta con mayor notoriedad son junio y julio. A partir de la segunda quincena de agosto tiende a debilitarse dado el aumento de la temperatura superficial del mar y la consiguiente disminución del contraste térmico entre tierra y mar.

Su impacto en la operatividad de LEBL podría resumirse en los dos siguientes puntos:

- En algunas ocasiones, antes de que se forme la brisa diaria, al principio se observa una rodada en sentido horario, que va desde el NE al SE (*marinada* incipiente), para posteriormente estabilizarse en SSW durante el resto del día. Cuando la mencionada transición inicial se prolonga durante más de una hora y el viento alcanza una intensidad cercana a los 8-10 kt, puede causar un cambio transitorio de configuración debido a la componente en cola del viento en las cabeceras 25, cuando previamente se está operando en la configuración preferente diaria (WRL: arribadas por la cabecera 25R y salidas por la 25L). En estos casos, en poco tiempo se sucede la siguiente secuencia en lo que a configuración de pistas se refiere: WRL → ELR → WRL. En otras ocasiones, se pasa directamente del terral nocturno a la brisa diaria SSW, escenario muy favorable para la operatividad de LEBL.
- El principal impacto de la brisa diaria es su capacidad de retrasar la activación de la configuración preferente nocturna (ENR), muy necesaria para reducir la contaminación

acústica sobre las poblaciones asentadas en el delta del Llobregat (arribadas por la cabecera 02 y salidas por la 07R). Así, a lo largo de los meses de junio y julio, cuando la brisa aparece muy reforzada, su persistencia puede alargarse más allá de las 20-21 UTC, instante en el que, por lo general, suele activarse la configuración nocturna. Este escenario fuerza a que se prolongue la configuración diurna precedente, de modo que los despegues sobrevuelan núcleos con mayor población como Gavà o Castelldefels, a diferencia de la zona Franca o el Puerto de Barcelona, los cuales sobrevolaría si la configuración nocturna estuviera activada. Por otra parte, cabe la posibilidad de que la brisa diurna cuente con un reforzamiento sinóptico que la haga manifestarse más allá del ocaso.

En algunas ocasiones, cuando no se puede habilitar la configuración preferente nocturna ENR, suele recurrirse a la configuración WLL (pista única 07R/25L). A pesar de tener menos capacidad, su cercanía al mar favorece que el tráfico se aleje de las áreas más habitadas y circundantes al aeropuerto.

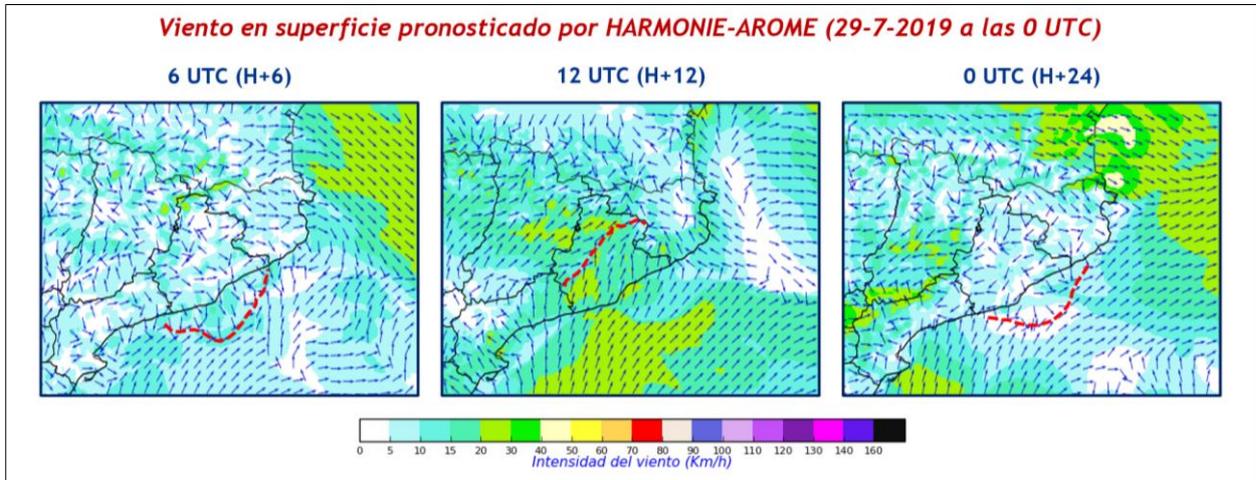
Hay que tener en cuenta que el terral nocturno no tiene mucho impacto en la operatividad. En efecto, bajo la consideración de que LEBL opera en la configuración preferente nocturna ENR, este sería un viento de cara para las aeronaves que llegan (arribadas por la cabecera 02) y cruzado para las que despegan (salidas por la cabecera 07R), siendo su intensidad difícilmente superior a 18-20 kt, que es el valor que se suele escoger como umbral para ser considerado a efectos de impacto en el caso de viento cruzado.

La [tabla 2](#) resume lo anteriormente citado.

La brisa marina en LEBL		
Ingredientes	Impacto	
Ligera inestabilidad o inexistencia de inversiones térmicas significativas en los primeros centenares de metros en la vertical Nubosidad escasa, que permita la incidencia de los rayos solares	La persistencia de la brisa marina más allá del ocaso (20 UTC en los meses de verano) puede llegar a retrasar la activación de la configuración nocturna preferente ENR	
Temperatura media del mar en superficie menor que la del aire Escaso gradiente bórico: viento sinóptico flojo	<th>Necesidades del usuario</th>	Necesidades del usuario
	Predicción del final del episodio	

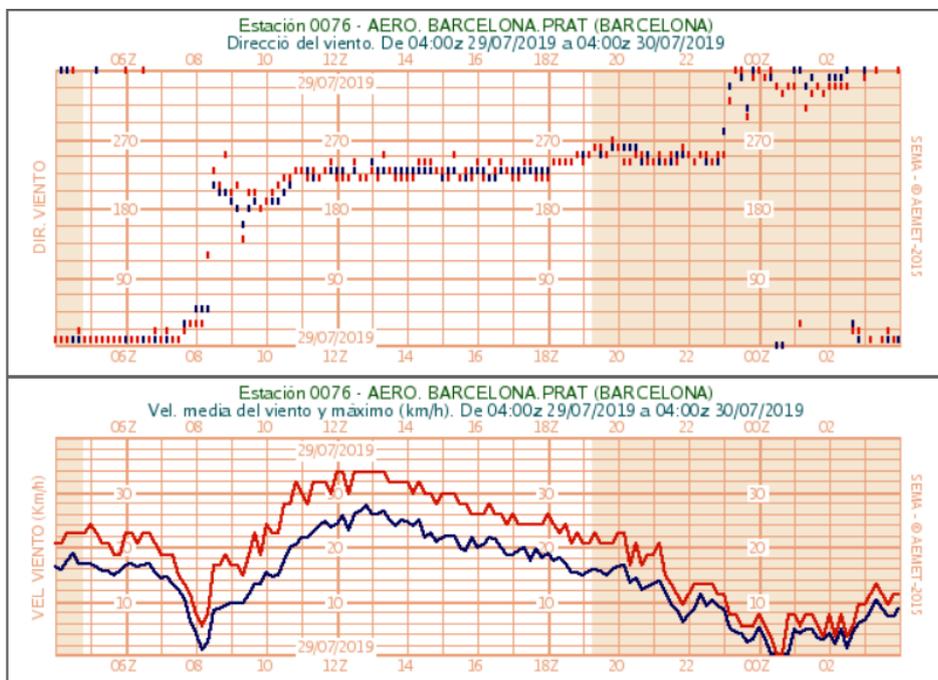
**Tabla 2**

Un ejemplo típico de brisa marina sería el acaecido el **29 de julio de 2019**: la situación sinóptica estaba definida por una dorsal en altura y altas presiones en superficie en el área mediterránea. En la [figura 8](#) se muestra el viento en superficie previsto por el modelo de predicción de área limitada HARMONIE-AROME (resolución espacial de 2.5 km) para ese día en tres horas diferentes pero representativas de forma que muestran claramente su ciclo diurno: a primeras horas prevalece el terral, a las 12 UTC se observa claramente el dominio de la brisa y finalmente a las 0 UTC regresa el terral, más débil.



**Figura 8.** Viento en superficie previsto por HARMONIE-AROME el día 29 de julio de 2019 en los sucesivos alcances de las 6 UTC, 12 UTC y 0 UTC, este último del día 30 de julio. Se ha señalado la línea de convergencia que marca la frontera entre el terral y la brisa de mar.

En la figura 9 puede observarse que el terral (componente N) pasa a SW (tercer cuadrante) rolando en sentido horario, siendo su velocidad media entre 20 km/h y 30 km/h entre las 12 UTC y las 14 UTC. Su decaimiento se registra hacia las 21 UTC.



**Figura 9.** Viento en superficie observado por la estación automática sinóptica-climatológica en LEBL, ubicada en la cabecera 07L, entre las 4 UTC del 29 de julio de 2019 y las 4 UTC del día posterior. La gráfica superior representa la evolución temporal de la dirección mientras que la inferior la intensidad. En azul se denota el viento medio y en rojo el viento máximo (racha).

## 3.2. CIZALLADURA

La cizalladura es el cambio en la dirección y/o intensidad del viento en un plano y en una distancia espacial. Se produce cuando capas de aire adyacentes tienen una acusada diferencia entre sus velocidades respectivas.

La cizalladura puede presentarse en todos los niveles de la atmósfera, siendo especialmente importante para la aviación cuando se detecta por debajo de los 2000 ft (cizalladura a baja altura o *Low Level Windshear LLWS*) ya que es donde las aeronaves llevan a cabo las operaciones de aproximación y ascenso del aeródromo. En estas fases del vuelo, la velocidad y la altura de las aeronaves se acercan a valores críticos, por lo que el margen de maniobra para que el piloto pueda corregir la trayectoria es menor.

Las situaciones más propicias para la presencia de cizalladura en LEBL son las tormentas, el viento sinóptico fuerte de componente W y la corriente de densidad atrapada en la costa de Barcelona. A diferencia de las dos primeras, esta última tiene lugar en un ambiente atmosférico estable.

Las tormentas son el fenómeno meteorológico más frecuente en lo que a la presencia de cizalladura se refiere en un entorno atmosférico inestable. Dada su importancia, en el presente trabajo se las considerará detalladamente en el apartado 3.3.

### 3.2.1. Viento sinóptico fuerte de componente W

Cuando un viento sinóptico fuerte de componente W atraviesa las cordilleras Prelitoral y Litoral adyacentes a LEBL, genera a sotavento un flujo racheado que favorecería la presencia de cizalladura y turbulencia.

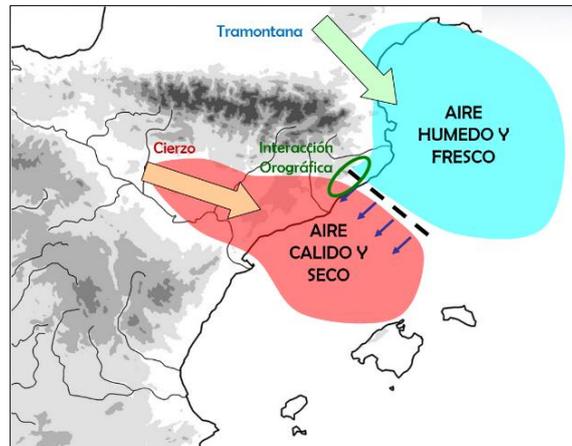
### 3.2.2. Corriente de densidad atrapada en la costa de Barcelona

La presencia de cizalladura en LEBL en un ambiente estable suele estar provocada por el establecimiento de una corriente mesoescalar que está impulsada por una diferencia de densidad entre dos masas de aire colindantes que es ligeramente distorsionada por la orografía circundante.

Para que tenga lugar, además de la estabilidad atmosférica reinante, es preciso que previamente esté establecido el sistema de vientos regionales Tramontana y Cierzo-Mestral tal y como se ha descrito anteriormente.

En este caso, la Tramontana aporta al litoral catalán una masa de aire húmeda y fría, mientras que el Cierzo-Mestral una relativamente cálida y seca. Consecuentemente, acabaría formándose una discontinuidad horizontal en la densidad que sería la responsable del establecimiento de una corriente mesoescalar retenida a lo largo de la costa de Barcelona por acción de la fuerza de Coriolis (desviación hacia la derecha en el sentido del movimiento por

tratarse del hemisferio norte) y la altura de la inmediata cordillera costero-catalana (figura 10).



**Figura 10.** Esquema conceptual de una corriente de densidad atrapada en la costa de Barcelona. Los colores identifican la naturaleza térmica de las masas de aire involucradas. El avance de la masa de aire húmeda y fría sobre la más seca y cálida es precursor de un entorno favorable a cizalladura horizontal sobre el litoral de Barcelona. Fuente: **González et al. (2018)**.

En LEBL esta corriente de densidad se percibiría como un cambio brusco en la dirección e intensidad del viento, siendo muy probable la formación de una línea de convergencia en las mismas pistas, identificable en la lectura de los anemómetros en cada una de las cabeceras de pista (figura 11).



**Figura 11.** Secuencia del viento observado en superficie en las cabeceras de pista de LEBL, episodio del 10 de septiembre de 2017. El viento en cola observado en todas las cabeceras de pista evidencia la presencia de una línea de convergencia. Su persistencia fuera del alcance de los anemómetros de las cabeceras de pista, aunque muy próxima a éstas, tuvo impacto en las operaciones. Fuente: **Méndez et al. (2019)**.

En la [figura 11](#) se muestra la evolución temporal de la intensidad y dirección del viento medido en superficie en LEBL, en el episodio del **10 de septiembre de 2017**. A causa del viento en cola en todas las cabeceras de pista, el ACC (en adelante, Centro de Control de Área) emitió una regulación para disminuir el RATE e incluso reducirlo a cero, lo que llevó a desviar aeronaves a otros aeropuertos alternativos.

En conclusión, los **ingredientes** fundamentales para la ocurrencia de este fenómeno son los siguientes:

- Fuerte gradiente horizontal de densidad (temperatura y humedad)
- Efecto de Coriolis: favorece que la masa de aire húmeda y fría, según avanza hacia el SW, se desvíe progresivamente hacia la derecha, es decir, «tierra adentro».
- Entorno atmosférico estable: supone un impedimento para que la masa de aire húmeda y fría remonte las adyacentes cordilleras Litoral y Prelitoral.
- Curvatura del litoral de Barcelona y valle del Llobregat: podrían ayudar intensificar la corriente de densidad en la zona.

Para mayor información meteorológica, se recomienda consultar el artículo elaborado por [González et al., \(2018\)](#) y la Nota Técnica 26 de [Méndez et al. \(2019\)](#). Asimismo, en la [tabla 3](#) se resume lo más relevante.

La cizalladura en LEBL: corriente de densidad	
Ingredientes	Impacto
<b>Gradiente horizontal de densidad:</b> discontinuidad en el campo de densidad (temperatura pseudopotencial equivalente)	Aterrizajes frustrados Desvíos Retrasos Congestión en los circuitos de espera
<b>Efecto de Coriolis:</b> la masa de aire húmeda y fría, según avanza hacia el SW, se desvía progresivamente hacia la derecha, es decir, «tierra adentro»	
<b>Entorno atmosférico estable:</b> supone un impedimento para que la masa de aire húmeda y fría remonte las adyacentes cordilleras Prelitoral y Litoral	
<b>Curvatura del litoral de Barcelona y valle del Llobregat:</b> en su desplazamiento, la corriente de densidad se intensifica en las cercanías de LEBL	

**Tabla 3**

### 3.3. TORMENTAS

Las tormentas son un fenómeno meteorológico de impacto de gran interés para los usuarios aeronáuticos. Además de ser precursoras de la presencia de cizalladura en un ambiente inestable y en la aproximación a un aeródromo (como ya se advirtió en el apartado 3.2 precedente), pueden afectar de forma notoria a otras operaciones en el lado aire, como las labores de repostaje, la instalación de pasarelas móviles de acceso entre la terminal y las aeronaves, demoras, etc.

Hay que tener en cuenta que no es necesario que las tormentas alcancen LEBL para que tengan impacto. Su simple presencia en distintos sectores del TMA que lo engloba, que son zonas de alimentación de tráfico, podrían dar lugar a desvíos a aeropuertos alternativos o esperas.

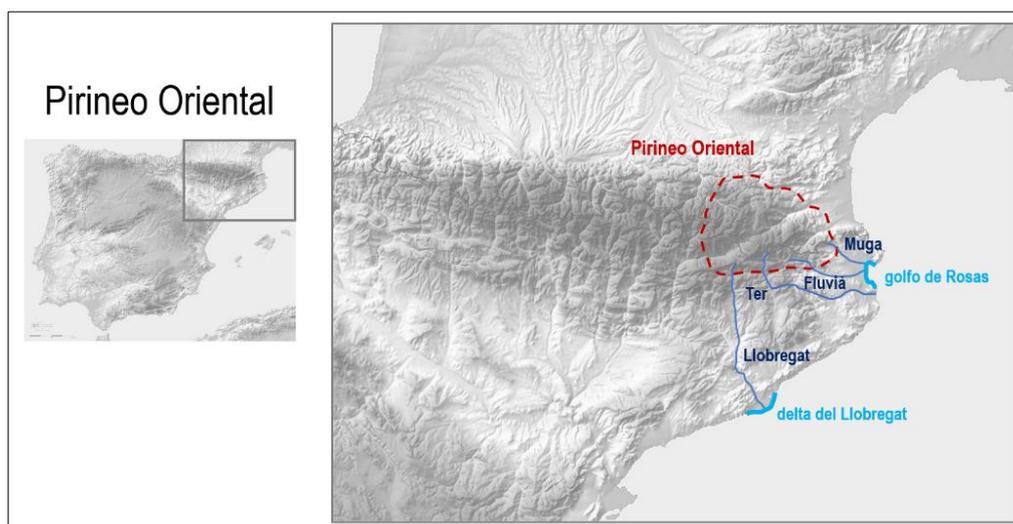
Conceptualmente, se han considerado tres tipos: tormentas de masa de aire formadas en el Pirineo Oriental, tormentas formadas por convergencias en el área catalano-balear y el paso de una línea de turbonada del oeste.

### 3.3.1. Tormentas de masa de aire formadas en el Pirineo Oriental

Este tipo de tormentas, a diferencia de las de carácter frontal que se forman en la frontera de separación entre dos masas de aire, tienen lugar en el seno de una única masa de aire, más o menos homogénea. El Pirineo Oriental constituye una región muy favorable para su formación y posterior desarrollo, habida cuenta de su cercanía al Mediterráneo, su elevado gradiente altitudinal y la exuberante vegetación existente. Se localiza en el extremo nordeste de la Península, concretamente al este de la Cerdanya (o bien, al este del Principado de Andorra).

En lo que respecta a su intrincada orografía, además de sus elevadas cumbres y cordales, hay que mencionar los valles por los que discurren los ríos que, ordenados de sur a norte, los más relevantes son: Llobregat, Ter, Fluvià, y Muga. Todos ellos parten de las elevadas cumbres pirenaicas y se dirigen hacia el mar siguiendo una trayectoria aparentemente errática y claramente definida por los accidentes geográficos más inmediatos, hasta desembocar en el mar Mediterráneo por el delta del Llobregat y el golfo de Rosas (figura 12).

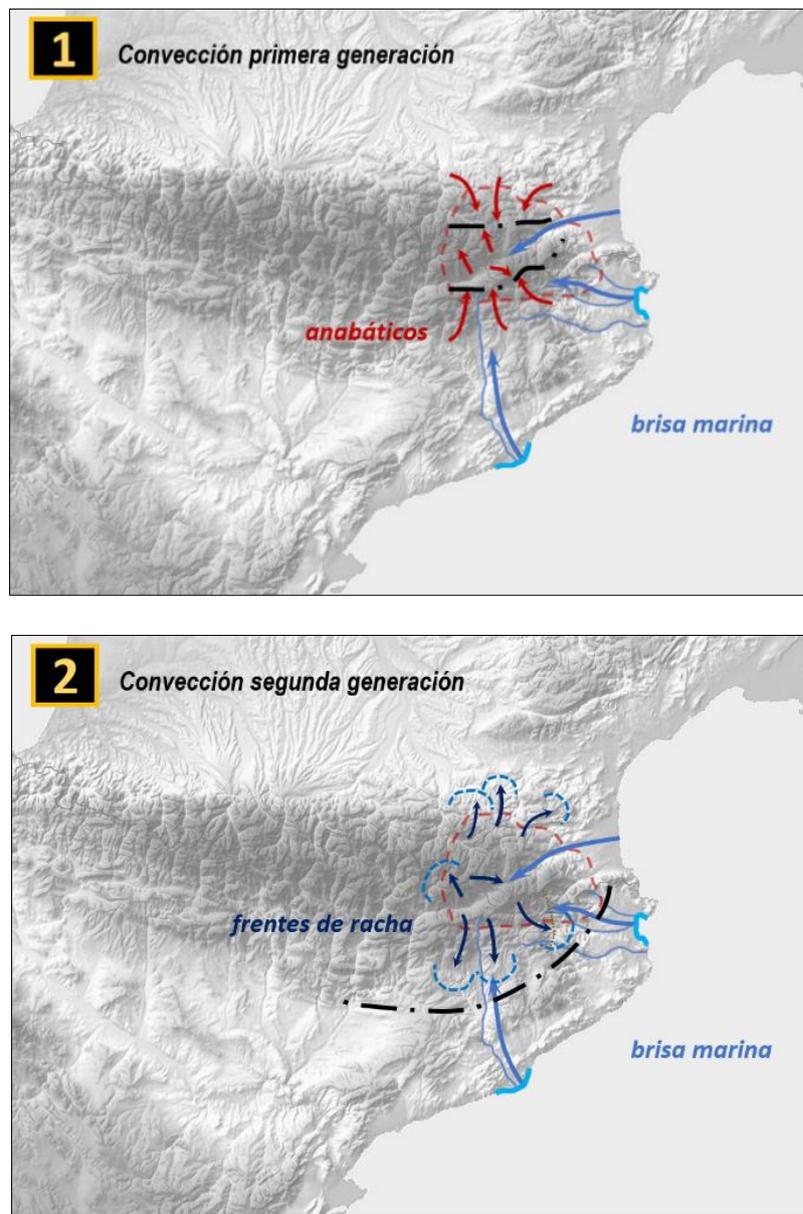
Precisamente, el delta del Llobregat y el golfo de Rosas juegan un papel esencial en la formación y posterior evolución de este tipo de tormentas, habida cuenta de su capacidad para facilitar la entrada del flujo del Mediterráneo en forma de brisa marina tierra adentro.



**Figura 12.** Ubicación del Pirineo Oriental y los principales accidentes geográficos que son fundamentales en la formación de una tormenta en esta región: valles por los que discurren los ríos y las aperturas hacia el mar en su desembocadura.

Lo fundamental en lo concerniente a la dinámica de estas tormentas es la canalización que experimentan las brisas de montaña diurnas (denominadas comúnmente por anabáticos y formadas por el calentamiento diurno de las laderas montañosas) y su capacidad de acoplarse constructivamente con la brisa marina que previamente penetra hacia el interior del litoral a través del golfo de Rosas o el delta del Llobregat y canalizándose posteriormente por los

valles fluviales mencionados anteriormente. Las convergencias resultantes en las cumbres o cordales pirenaicas son las precursoras en última instancia de disparar la convección de primera generación. Atendiendo a la [figura 13](#), las líneas de convergencia denotadas en negro y trazadas de forma subjetiva, se deben a las convergencias de los anabáticos ascendentes que fluyen desde las llanuras o zonas bajas de las vertientes española y francesa respectivamente, realzadas por la brisa marina.



**Figura 13.** Evolución temporal de las tormentas formadas en el Pirineo Oriental. Superior (1): la interacción entre la brisa de mar entrante, cuyas aperturas tierra adentro son el delta del Llobregat y el golfo de Rosas, y las brisas de montaña, es precursora de la formación de convergencias en las cumbres y cordales pirenaicas, disparando la convección de primera generación. Inferior (2): la convección de segunda generación se produce por la interacción entre sí de los frentes de racha, o bien de éstos con la brisa marina canalizada por los valles fluviales. La línea negra discontinua denota las áreas proclives a convergencias.

Posteriormente, la interacción entre los frentes de racha de las tormentas formadas en la convección de primera generación e incluso, la interacción de éstos con la brisa marina previamente canalizada, siempre y cuando esta persista, darían lugar a nuevas convergencias, formando la convección de segunda generación. Estas últimas, se posicionarán más al sur cuanto mayor sea la potencia de los frentes de racha y de la alimentación en niveles bajos.

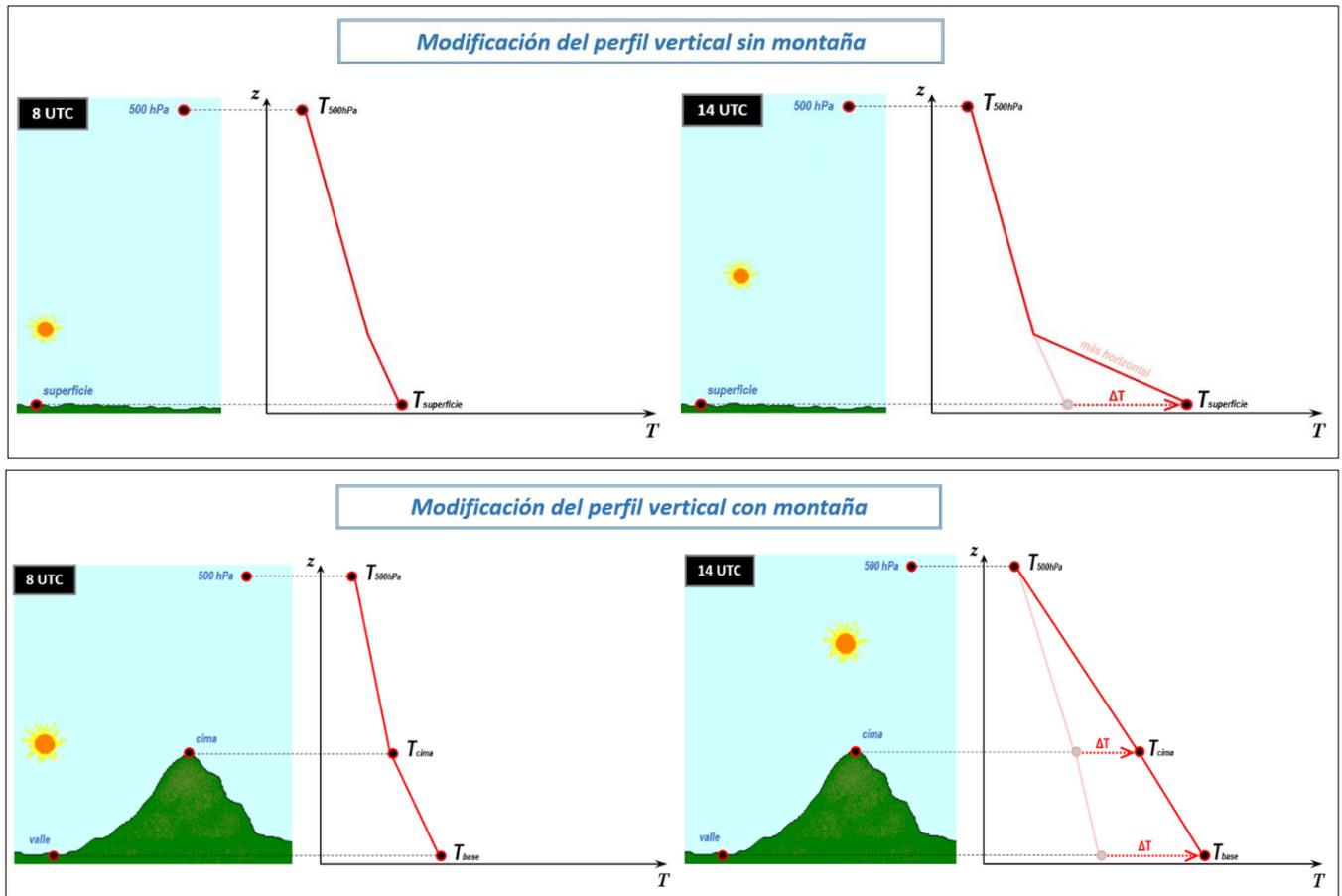
Para que estas tormentas, formadas inicialmente en el Pirineo Oriental puedan tener impacto en la aproximación a LEBL, es necesario un flujo rector en niveles medios y altos del NW, una brisa marina bien establecida y un ambiente inestable no limitado exclusivamente a la región pirenaica. Así, un entorno sinóptico apropiado podría ser el definido, en superficie, por un anticiclón atlántico que envolviese ligeramente a la Península en forma de dorsal unido a una pequeña onda térmica en 500 hPa (no haría falta que la onda en el campo de altura geopotencial fuese muy manifiesta).

En general, los ingredientes fundamentales para la formación de las tormentas son: **humedad, inestabilidad y mecanismo de disparo**. Para el tipo descrito en este apartado:

- **Humedad:** además de la advectada por las brisas de mar, hay que considerar las fuentes de humedad locales: evaporación del agua que portan los ríos o algún embalse, además de la evapotranspiración, consecuencia de la presencia de abundante vegetación en la zona.
- **Inestabilidad:** se genera cuando hay un perfil termodinámico inestable, debido a la existencia de temperaturas altas en niveles bajos (los más cercanos a la superficie) y bajas en niveles altos (por ejemplo, en el nivel isobárico de 500 hPa). No hay que olvidar que la presencia de humedad matizaría lo anteriormente mencionado. Las elevadas cimas del Pirineo Oriental, que en su mayor parte superan los 2000 metros de altitud, actúan como *fuentes elevadas de calor*, generando perfiles inestables en la estratificación, a poco que haya aire frío en niveles medios o altos. Para entenderlo mejor, en la [figura 14](#) se muestra cómo se modifica el perfil vertical térmico, comprendido entre la superficie y las capas altas de la atmósfera, eligiendo como nivel de referencia 500 hPa (unos 5500 metros de altitud), según se trate de un llano o una montaña ante la insolación. En el primer caso, el calentamiento radiativo que experimenta la superficie plana calentará, por contacto directo, el aire circundante haciendo que el perfil se muestre más horizontal en capas más bajas, situándose en este tramo el estrato de aire más inestable. Por otra parte, en el segundo caso, hay que resaltar el papel clave que juega la cima montañosa. Se dice que ésta constituye una *fente elevada de calor* ya que, al calentarse más que el aire circundante, introduce calor en capas altas (el aire circundante se calienta por contacto directo con ésta) haciendo que el perfil se inestabilice prácticamente entre la superficie y capas altas.

Considerando la altitud media de las cimas del Pirineo Oriental del orden de 2000 metros, la experiencia demuestra que, con diferencias de temperatura por encima de los 25 °C entre 850 hPa y 500 hPa, es muy factible que acaben formándose tormentas.

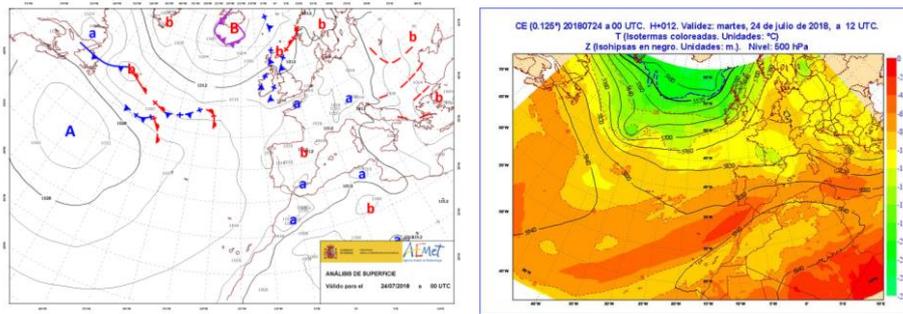
- **Mecanismo de disparo:** la convergencia de los flujos sobre las cimas y cordales pirenaicos dispara la convección.



**Figura 14.** Evolución diurna del perfil vertical de temperatura del aire. Diferencia entre planicie (superior) y montaña (inferior).

En general, este tipo de tormentas son especialmente frecuentes desde el mes de junio hasta agosto, cuando la nieve depositada a lo largo del invierno precedente se ha fundido, aportando humedad al suelo y estableciendo zonas libres de nieves más propicias para el calentamiento. Cabe destacar que ésta se funde antes que en otras áreas del Pirineo debido fundamentalmente, a la menor altitud de sus montañas en comparación con las ubicadas en los sectores central y occidental, la menor extensión de los macizos y el menor espesor medio del manto nivoso acumulado previamente.

Un episodio que podría ilustrar lo anteriormente comentado ocurrió el **24 de julio de 2018**. En la **figura 15**, se muestra el mapa de análisis sinóptico en superficie, definido por un anticiclón potente ubicado en plena cuenca atlántica. En cambio, en la Península se aprecia poco gradiente bórico, lo que favorecería que los procesos de naturaleza mesoescalar pudieran manifestarse con notoriedad. La baja presión en la Península podría ser de origen térmico, habida cuenta de la elevada insolación que se registra en los meses estivales. En efecto, a las 0 UTC las temperaturas registradas en el centro de la depresión del Ebro eran bastante elevadas, superiores a los 25 °C, estando las máximas del día anterior entre Zaragoza y Caspe por encima de los 35 °C.

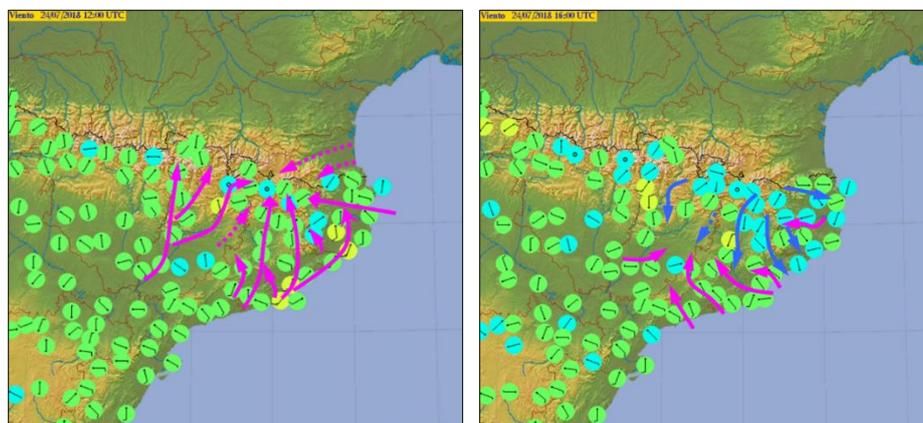


**Figura 15.** A la izquierda, análisis de superficie del 24 de julio de 2018 a las 0 UTC. A la derecha, temperatura y altura geopotencial en 500 hPa, previstas por el modelo determinista HRES-IFS del ECMWF para ese mismo día a las 12 UTC.

En niveles altos (figura 15, derecha) se distingue una ligera circulación zonal sobre la Península, con una sutil onda térmica en 500 hPa, localizada en las inmediaciones de los Pirineos. Teniendo en cuenta que la temperatura a ese nivel se situaba entre los -8 °C y -12 °C, es muy posible que acaben formándose tormentas en el Pirineo Oriental.

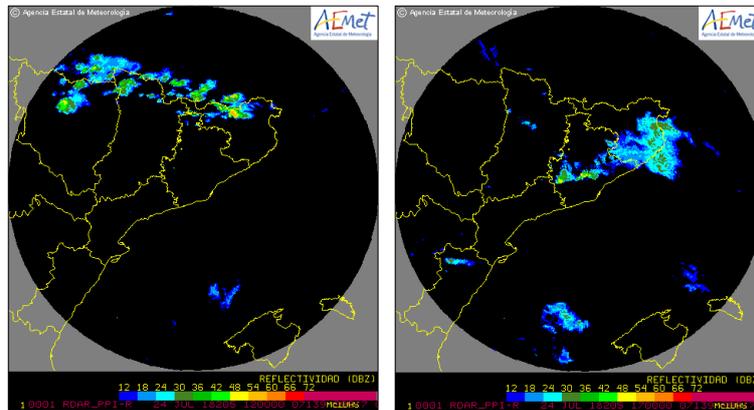
En la diagnosis mesoescalar elaborada a partir de las observaciones del viento en superficie registradas por las estaciones automáticas de AEMET a las 12 UTC y a las 16 UTC (figura 16), se identifica plenamente cómo los anabáticos (flujos ascendentes) y la brisa marina se acoplan y canalizan por las cuencas de los ríos que nacen en las cumbres pirenaicas. Se han diferenciado por dos colores los flujos precursores de la convección de primera generación (ascensos a las cumbres) y la de segunda (interacción de los frentes de rachas con los anabáticos y brisas de mar). Por otra parte, en las zonas con un menor número de observaciones, el trazado se realiza en línea discontinua para recalcar que el grado de subjetividad es mayor.

Hay que notar que hacia las 16 UTC (figura 16, derecha) la situación ha cambiado notablemente, debido a la aparición de frentes de rachas, lo cual favorece la propagación de las tormentas que inicialmente se formaron en el Pirineo Oriental hacia el sur y más concretamente hasta la aproximación a LEBL.



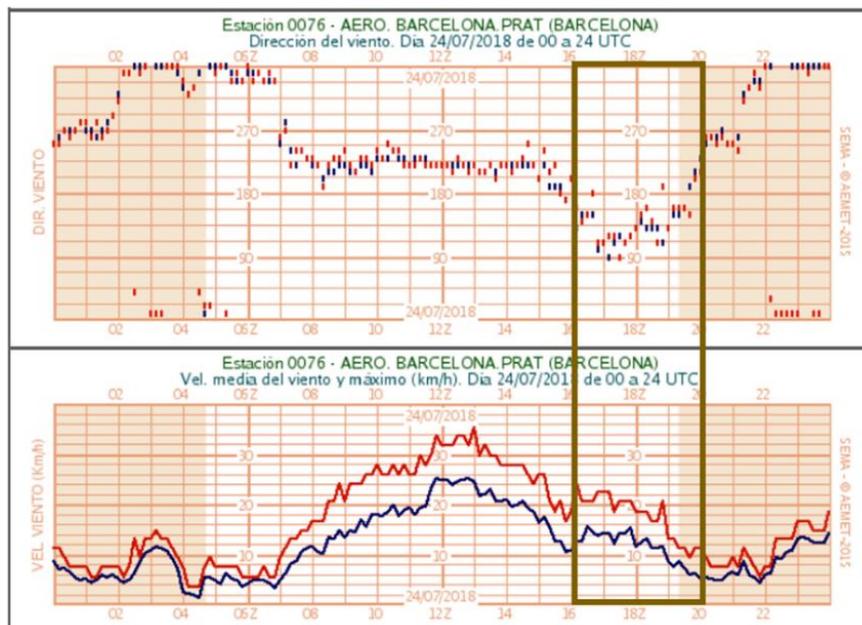
**Figura 16.** Diagnosis mesoescalar elaborada a partir del viento observado en superficie el día 24 de julio de 2018 a las 12 UTC (izquierda) y 16 UTC (derecha). En rosa se denotan los anabáticos ascendentes y brisa marina, mientras que en azul, el viento procedente del frente de racha de los núcleos convectivos de primera generación.

La imagen del radar (figura 17) muestra que la convección de primera generación se produjo algo antes de las 11 UTC. Dado que el flujo rector en 700 hPa era débil del W, el desplazamiento progresivo hacia el sur y sureste de los núcleos convectivos formados estaba regido por la propagación y no por advección ya que el desplazamiento de la estructura convectiva se debe a la aparición de nuevas células en su flanco sur-sureste.



**Figura 17.** Reflectividad radar (dBZ) el 24 de julio de 2018 a las 12 UTC (izquierda) y a las 17 UTC (derecha). A esta última hora, las formaciones tormentosas llegaron al área de aproximación de LEBL.

Finalmente, en la figura 18 se representa la evolución temporal del viento observado en superficie en el LEBL a lo largo de este episodio. Hay que advertir que estos datos hay que considerarlos en su justa medida e importancia, dado que se está resumiendo el entorno meteorológico del aeropuerto según el comportamiento de una variable meteorológica de interés aeronáutico medida en un solo punto del espacio, que en este caso se corresponde con la cabecera 07L.



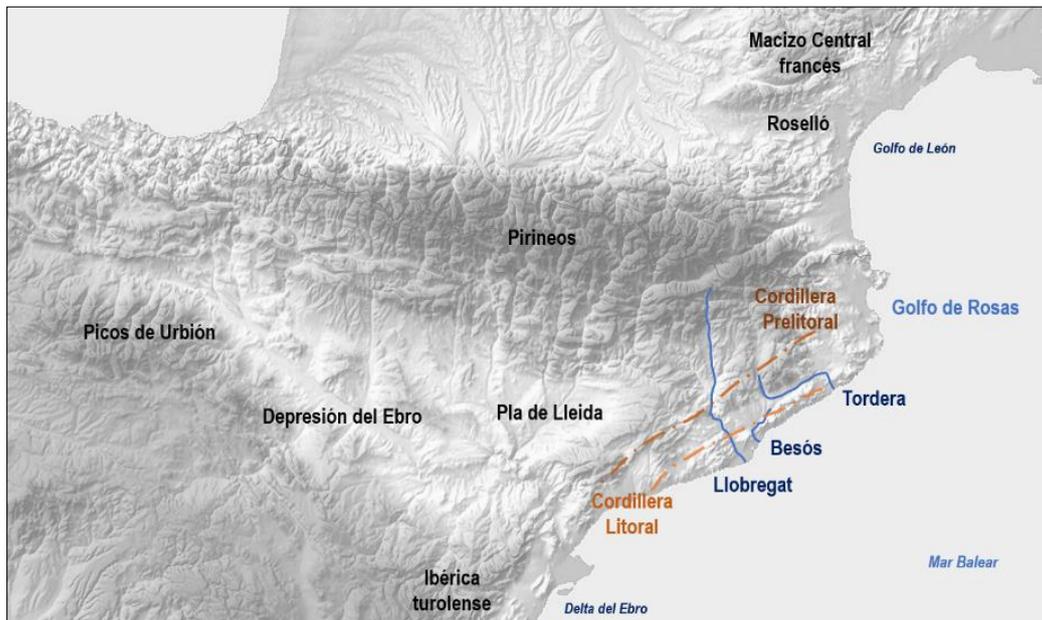
**Figura 18.** Evolución temporal de la dirección (gráfico superior) y velocidad (gráfico inferior) del viento en superficie registrado en la cabecera 07L en LEBL y a lo largo del 24 de julio de 2018. En azul se denota el viento medio y en rojo el viento máximo (racha).

De esta forma, puede apreciarse que el régimen que dominaba durante la mayor parte del día en LEBL era el de las brisas: terral entre las 2 UTC y 6 UTC; marinada entre las 7 UTC y las 16 UTC. Precisamente, a partir de esta última hora, la brisa marina fue desplazada con la entrada de un viento de dirección variable ubicado en el segundo cuadrante (SE), en niveles bajos y dirigido hacia la formación tormentosa. Esto podría explicarse en base a un posible efecto de succión generado por las correspondientes corrientes convectivas ascendentes intrínsecas. Su aproximación al aeropuerto tuvo efectos observables en el mismo, debido a la presencia de cizalladura (cambios de dirección e intensidad del viento) así como la presencia de cumulonimbos (CB) en la aproximación (los METAR difundidos entre las 16:30 UTC y 18 UTC cifraban CB).

En este episodio, el ACC emitió una regulación entre las 15:20 UTC y las 18:20 UTC. A lo largo de esas tres horas, cerca de medio centenar de aeronaves se vieron afectadas. La cadencia de salidas y arribadas a LEBL se vio perturbada.

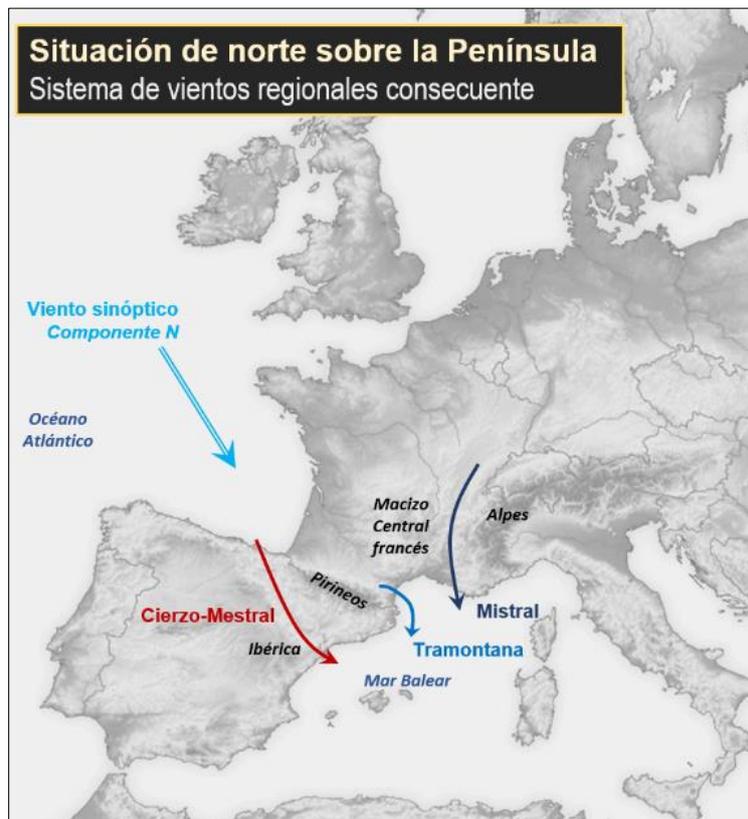
### 3.3.2. Tormentas por convergencias en el área catalano-balear

El área catalano-balear es una región geográfica que se ubica en el extremo nororiental de la Península. Está limitada en su parte más occidental por el valle del Ebro, al norte por los Pirineos y hacia el este por el mar balear. En la [figura 19](#) se muestran los accidentes geográficos embebidos más destacados, habida cuenta de su capacidad de matizar el flujo sinóptico incidente. Ordenados de norte a sur: Macizo Central francés, Rosellón, golfo de León, cordilleras Prelitoral y Litoral, Pla de Lleida, las cuencas fluviales del Tordera, Besòs y Llobregat, delta del Ebro y la Ibérica turolense.



**Figura 19.** Área catalano-balear: expresión geográfica flanqueada por la depresión del Ebro, Pirineos y el mar balear. Existe un conjunto de accidentes geográficos embebidos que tienen la suficiente importancia como para distorsionar el flujo incidente y crear un sistema de vientos regionales.

Cuando se establece un flujo sinóptico de componente N sobre la Península, la peculiar orografía da como resultado un sistema de vientos regionales, del ámbito mesoescalar (meso-alfa) y de naturaleza *ageostrófica*, denominados: Cierzo-Mestral, Tramontana y Mistral. Todos ellos, confluyen en última instancia en la cuenca mediterránea (Fontseré, 1950) (figura 20). Se dice que conforman un «sistema» ya que, por lo general, soplan de forma simultánea y además proceden de un mismo hecho sinóptico común, definido por un alta presión atlántica, que penetra en forma de dorsal hacia el norte de la Península, y una baja presión ubicada entre los golfos de León y Génova. Esta situación se denomina *advección septentrional regida por el anticiclón atlántico* ya que la masa de aire incidente procede de latitudes más altas y su manantial es la alta presión situada en la cuenca atlántica.



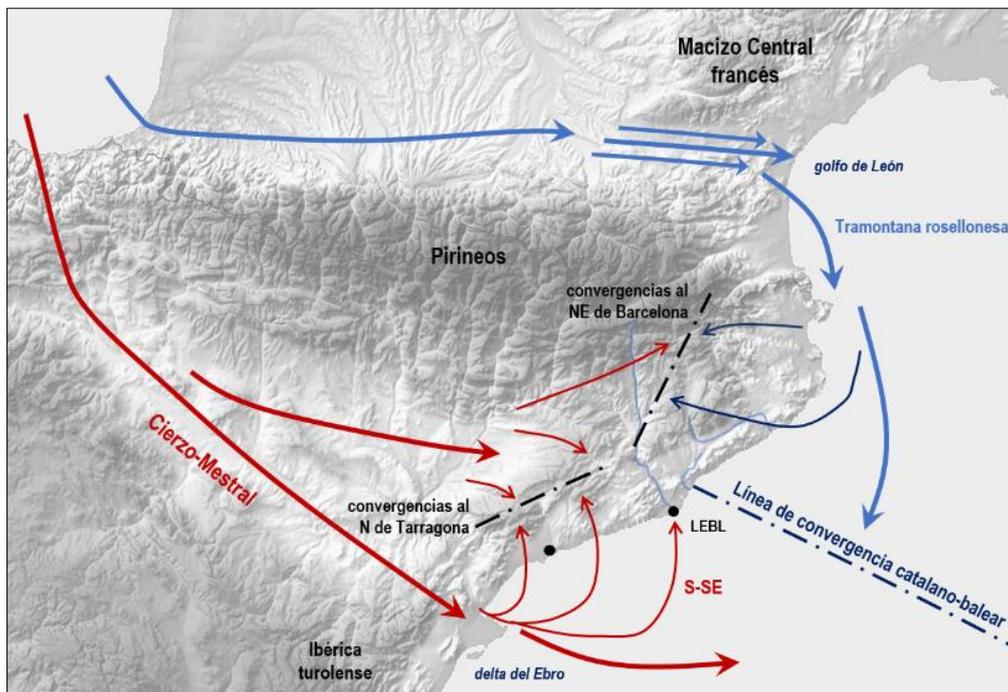
**Figura 20.** Considerando como referencia la Península, el viento sinóptico de componente N da lugar a un sistema de vientos regionales: Cierzo-Mestral, Tramontana y Mistral, confluyendo todos ellos en la cuenca Mediterránea.

El viento sinóptico de componente N, que se canaliza entre Pirineos y el Macizo Central francés, se acelera en su tramo final, concretamente en una pequeña y estrecha planicie conocida como el Rosellón, muy próxima al golfo de León. En su desembocadura final, experimenta un giro anticiclónico causado tanto por el contraste de rugosidad tierra-mar como por el equilibrio entre la fuerza del gradiente de presión entre la alta presión atlántica y la baja presión mediterránea y la fuerza de Coriolis. Así, se establecerá un viento de componente N denominado Tramontana. Por otra parte, el Cierzo-Mestral, que se acelera a causa de su estrechamiento a lo largo de la depresión del Ebro, experimentará un giro ciclónico en su entrada al Mediterráneo, evidenciado por el contraste de rugosidad tierra-mar mencionado anteriormente.

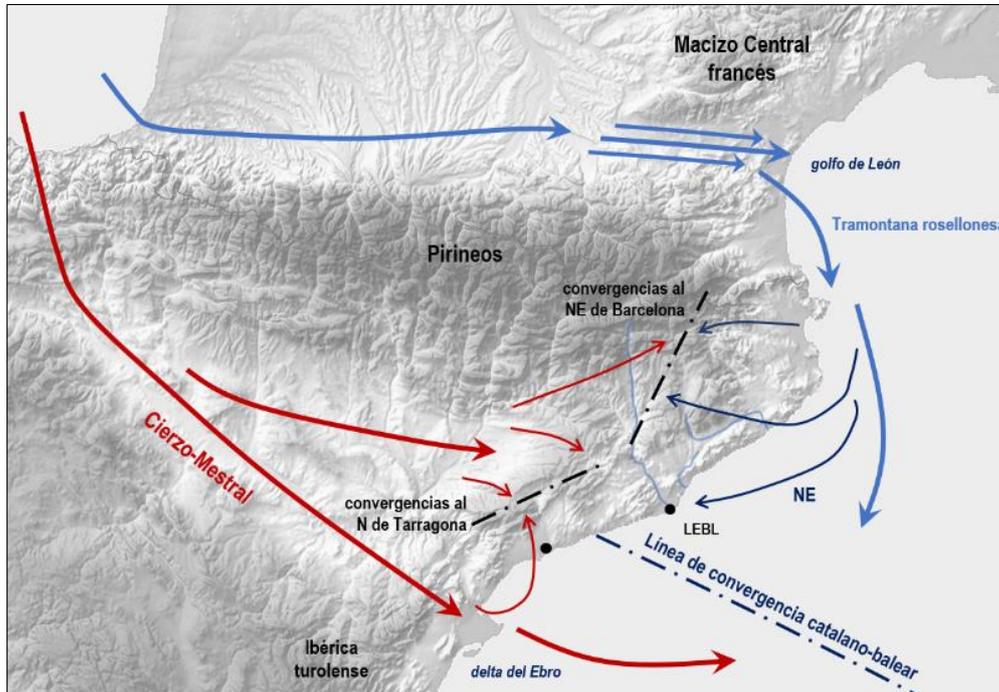
Con la Tramontana y el Cierzo-Mestral plenamente establecidos, a sotavento tendrá lugar la formación de una discontinuidad, denominada *línea de convergencia catalano-balear*, cuya ubicación quedará limitada entre la costa Dorada y la costa Brava.

La canalización posterior de los flujos resultantes tierra adentro a través de los valles que cruzan las cordilleras Litoral y Prelitoral, en donde se sitúan las cuencas de los ríos que desembocan en el Mediterráneo (Llobregat, Besós o el Tordera fundamentalmente) junto con el efecto pantalla del Pirineo Oriental, dará lugar a dos regiones muy proclives para la presencia de convergencias y en última instancia para el disparo de la convección (figuras 21 y 22):

- *Norte*: siguiendo la franja litoral, sería la región comprendida entre la desembocadura del Llobregat y el sur de la Costa Brava (Platja d'Aro). Es la más activa debido a que el vórtice anticiclónico que se forma corriente abajo de la Tramontana y a su derecha en el sentido del movimiento es más frecuente y está mejor definido que el vórtice ciclónico que se forma en la salida hacia al mar del Mestral a su izquierda siguiendo el sentido de su movimiento.
- *Sur*: siguiendo la franja litoral, se correspondería con el área limitada entre la ciudad de Tarragona y la desembocadura del Llobregat



**Figura 21.** Formación de la línea de convergencia catalano-balear: flujo del S-SE en LEBL. Los dos puntos en negro denotan las ciudades de Tarragona y Barcelona, respectivamente.

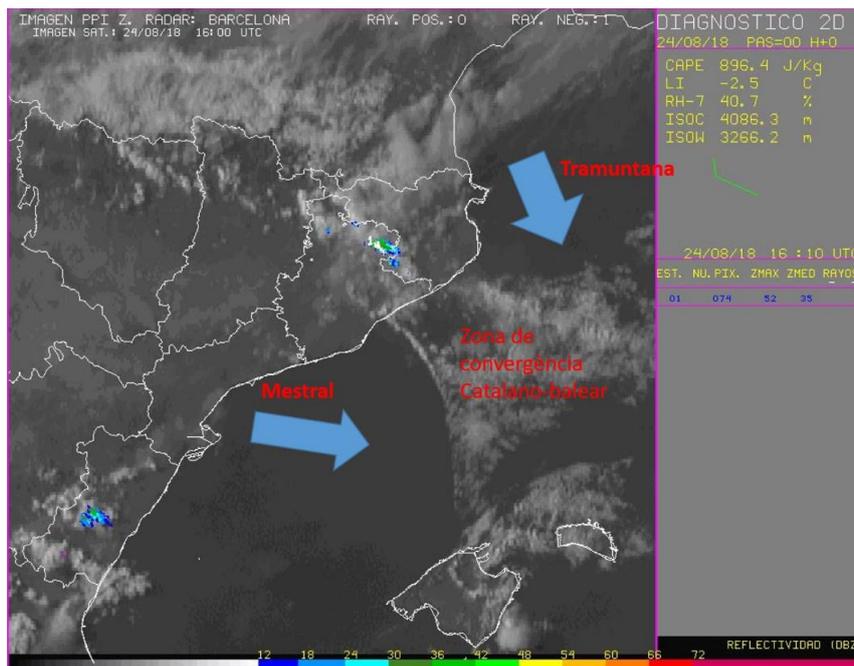


**Figura 22.** Formación de la línea de convergencia catalano-baleare: flujo del NE en LEBL. Los dos puntos en negro denotan las ciudades de Tarragona y Barcelona, respectivamente.

Hay que tener en cuenta que la inestabilidad es una cuestión independiente de la presencia de estas convergencias. Aunque esta juega un papel esencial, no hay que olvidar que las convergencias formadas suponen el mecanismo de disparo que, en última instancia, desencadenan la convección.

Dependiendo de dónde se sitúe el centro de vorticidad anticiclónico de la Tramontana, el viento observado en LEBL será diferente aunque siempre será de componente E. Así, en líneas generales, caben dos posibilidades: del S-SE (figura 21) o del NE (figura 22).

Las convergencias resultantes pueden diagnosticarse a partir de la información combinada de las imágenes de satélite proporcionadas por el canal visible de alta resolución del satélite Meteosat (en adelante, MSG-HRVIS) y el viento a 10 metros pronosticado por un modelo numérico de predicción, ya sea global (IFS del ECMWF) o de área limitada (HARMONIE-AROME). En ellas, la presencia de convergencias puede apreciarse como una estructura nubosa de forma alargada, apariencia fibrosa y casi continua (figura 23).



**Figura 23.** Composición del canal visible del MSG y la reflectividad radar en la región catalano-balear el 24 de agosto de 2018 a las 16 UTC. La condensación del vapor de agua es un buen trazador pues señala fehacientemente la localización de la línea de convergencia formada por la interacción del Cierzo-Mestral y la Tramontana. Nótese que los valores de reflectividad observados advierten la presencia de nubosidad de evolución causada por convergencias en superficie y ubicada precisamente al NE de Barcelona como ya se advirtió en el modelo conceptual expresado en la figuras 21 y 22.

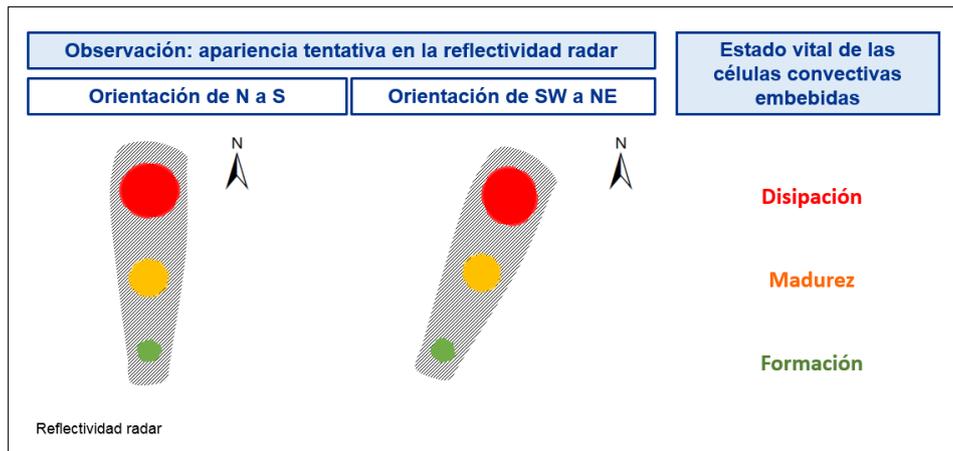
En síntesis, los ingredientes fundamentales para la formación de este tipo de tormentas (humedad, inestabilidad y el mecanismo de disparo) son:

- **Humedad:** la advectada desde el Mediterráneo. No obstante, cabe destacar otras fuentes puntuales, como son la abundante vegetación y el agua disponible en las cuencas fluviales que circundan las cordilleras Prelitoral y Litoral.
- **Inestabilidad:** vaguada en niveles medios y altos manifestada en los campos de temperatura y altura geopotencial. De esta forma, la existencia de una masa de aire húmeda y cálida en los niveles más bajos (hasta 850 hPa) y otra más fría en niveles altos (en 500 hPa o 300 hPa) da lugar a un perfil termodinámico inestable.
- **Mecanismo de disparo:** las convergencias en niveles bajos favorecerá el ascenso de capas húmedas, disparando finalmente la convección.

Una vez formadas, las tormentas tienden a desplazarse progresivamente de norte a sur, pudiendo afectar a LEBL. Son frecuentes desde finales de la primavera hasta bien entrado el otoño y rara vez se forman en invierno.

### 3.3.3. Paso de una línea de turbonada procedente del oeste

Una línea de turbonada es una banda estrecha no frontal de tormentas cuya dimensión longitudinal característica es del orden de 100 km. Se trata de un sistema convectivo, dotado de cierta organización y en el que coexisten múltiples células en diferentes fases de su ciclo de vida: desarrollo, madurez y disipación. La generación de nuevas células es consecuencia de la interacción entre los frentes de racha de las células viejas y el flujo relativo a la tormenta en niveles bajos (figura 24).



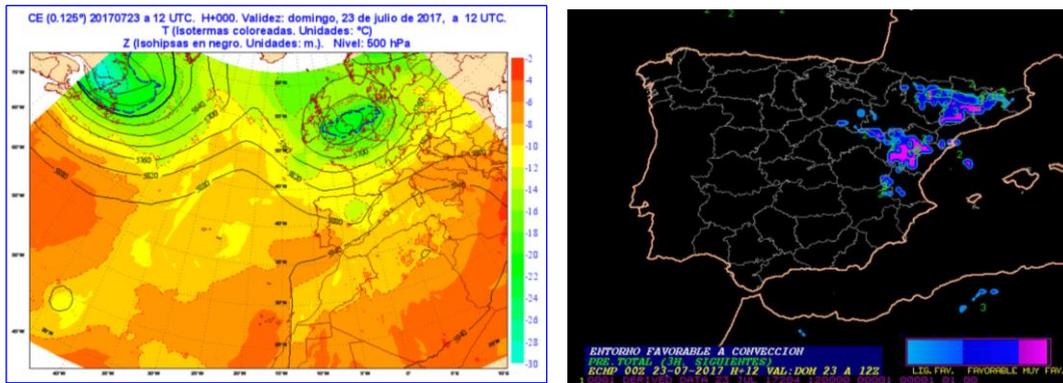
**Figura 24.** Apariencia visual de una línea de turbonada observada según el campo de reflectividad radar. En colores se discrimina el estado vital de cada una de las células embebidas. Las más frecuentes en Cataluña son aquellas cuya orientación es de suroeste a noreste. Su nubosidad asociada consta de una parte estratiforme y otra cumuliforme, siendo la posición relativa de ambas dependiente del flujo rector o de la interacción entre los frentes de racha con los flujos en niveles bajos.

En Cataluña, la mayoría de las líneas de turbonada se desplazan de oeste a este, aunque son muy comunes aquellas cuya orientación es de suroeste a noreste. Suelen afectar con mayor intensidad a la provincia de Tarragona, llegando incluso a la aproximación de LEBL.

Una situación sinóptica-mesoescalar favorable para su formación y posterior desarrollo es la existencia de una onda corta en 500 hPa, con apariencia puntiaguda y de traslación rápida desde la vertiente atlántica o el golfo de Vizcaya hacia el área mediterránea.

Los meses más favorables al paso de líneas de turbonada por Cataluña comprenden desde finales de mayo hasta comienzos de septiembre aunque no es descartable observarlas hasta el mes de octubre.

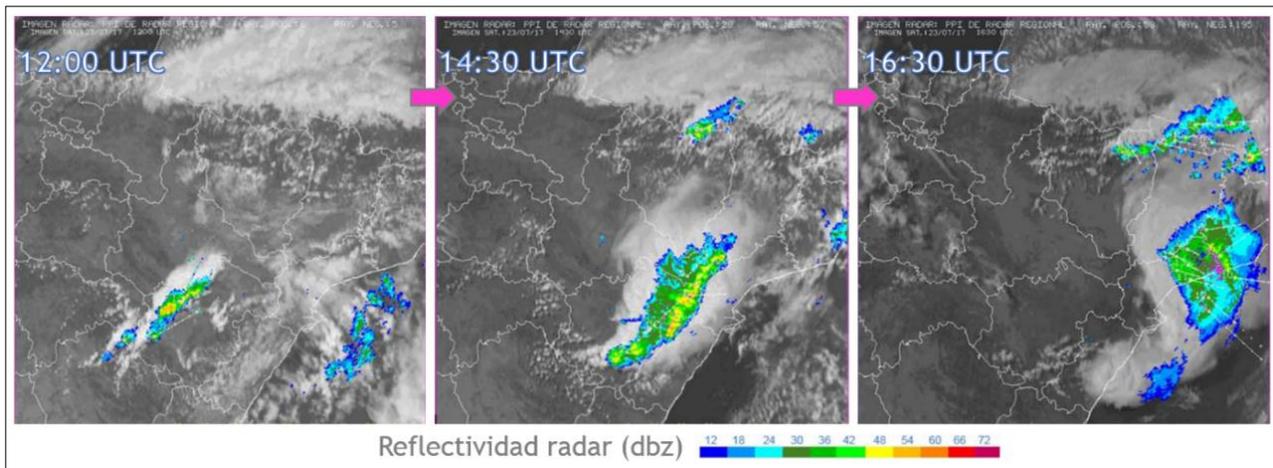
Un ejemplo de este tipo sería la situación del **23 de julio de 2017**. En la **figura 25**, se observa una onda corta en niveles medios/altos que cruza la península de SW a NE apreciable en los campos de altura geopotencial y de temperatura. El intenso calentamiento diurno estival configura un ambiente inestable en la Ibérica que posteriormente se realza con el paso de la vaguada. En efecto, cuando el vórtice en altura pasa por la vertical de la Ibérica, se dispara la convección en su seno, favoreciendo que los núcleos convectivos formasen una estructura organizada alargada y dotada de un dinamismo interno que se desplazó progresivamente hacia el este afectando al oeste de Cataluña.



**Figura 25.** Campos proporcionados por el modelo determinista HRES-IFS del ECMWF previstos para el **23 de julio de 2017** a las 12 UTC. A la izquierda, temperatura y altura geopotencial; a la derecha, identificación de entornos favorables para el desarrollo de convección. Los colores azules oscuros y fucsia denotan áreas muy propicias para que ésta se dispare.

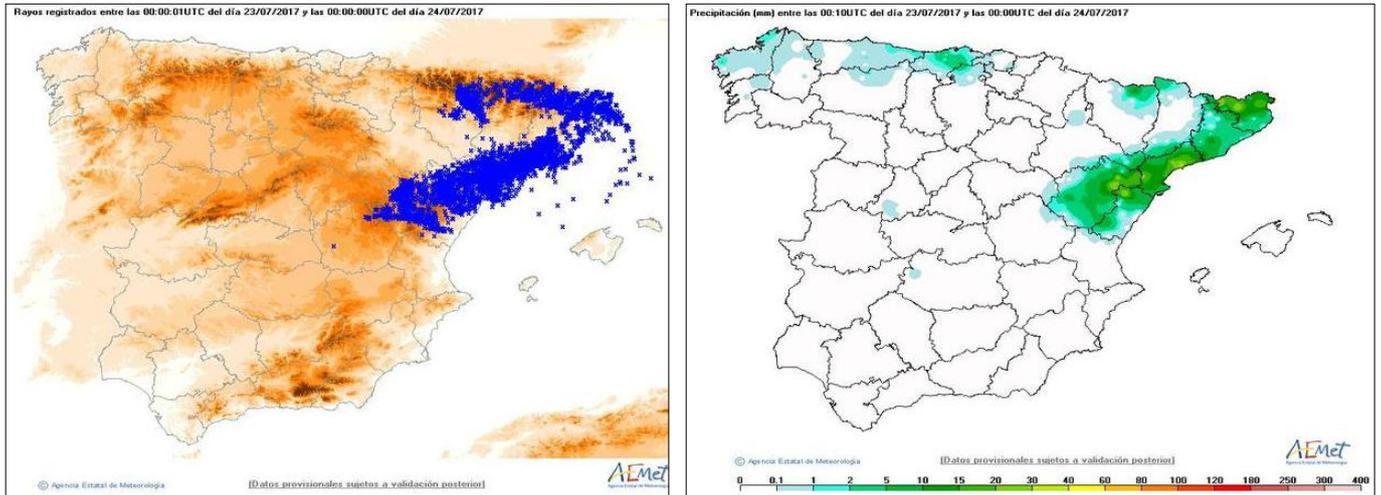
La **figura 26** muestra una secuencia temporal de una imagen combinada de satélite (canal visible) y reflectividad radar. El movimiento de las líneas de turbonada se predice relativamente bien mediante extrapolación directa y el lugar de formación de nuevas células también es relativamente fácil de localizar, sin embargo, la evolución en su conjunto es más difícil de pronosticar pues depende en gran medida de los flujos relativos y de las condiciones de estabilidad de las masas de aire con las que va interaccionando en su evolución. Hay que advertir que la intensidad de las corrientes ascendentes también está ligada al ciclo diurno.

En estas situaciones las señales radar son bastante fuertes, siendo la reflectividad superior a 50 dBz, llegando incluso a superar los 60 dBz. Se ha constatado, además, la aparición de *bow echo* (eco en arco) en el seno de una línea de turbonada, la cual se forma como consecuencia del acoplamiento de varios frentes de racha. Se trata de un eco de radar lineal y curvado en los extremos, con apariencia de arco cuya manifestación denota el incremento de la severidad en un área espacial tan reducida como es una línea de turbonada.



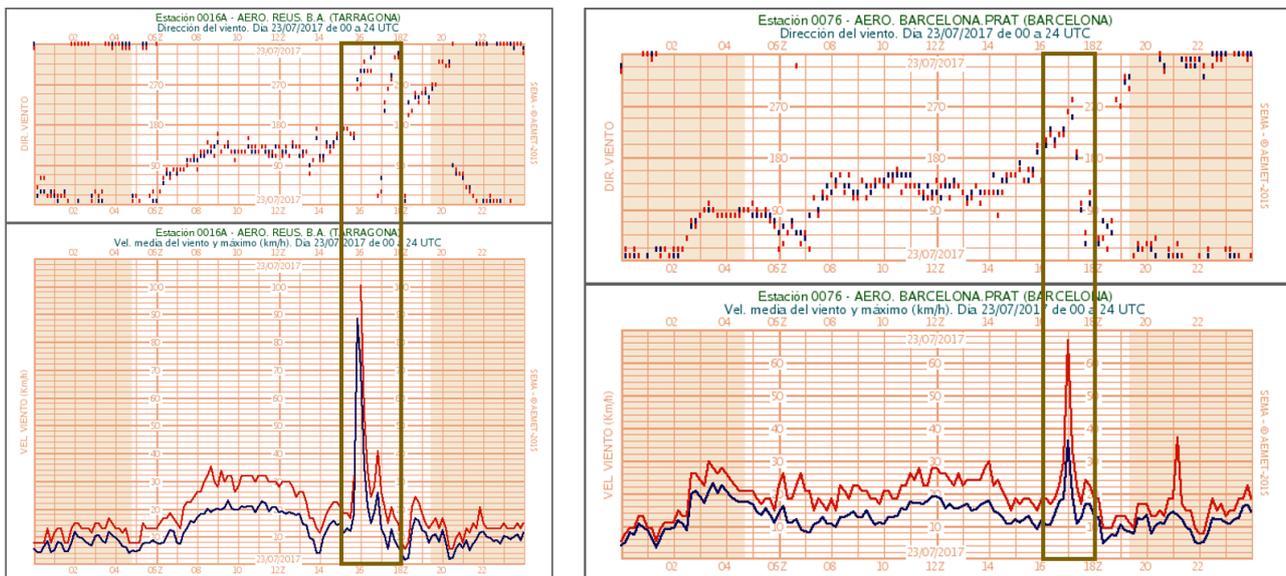
**Figura 26.** Evolución espacio-temporal de la reflectividad observada por el radar y nubosidad observada en el canal visible, entre las 12 UTC y las 16:30 UTC del **23 de julio de 2017**. La formación convectiva desarrollada previamente en la Ibérica evolucionó hacia una línea de turbonada que llegó a afectar a la aproximación a LEBL.

En la **figura 27** se muestra una comparativa entre las descargas eléctricas y la precipitación registradas en superficie a lo largo de este episodio. Se observa una interesante sincronía en la distribución espacial de ambas variables, coincidiendo una mayor densidad de descargas eléctricas con máximos de precipitación, lo que constituiría una evidencia clara del carácter convectivo de esta última variable.



**Figura 27.** Rayos (izquierda) y precipitación (derecha) observados a lo largo del **23 de julio de 2017**.

La línea de turbonada se manifestó en superficie con rachas de 65 kt en el aeropuerto de Reus (LERS) y, más debilitada, en LEBL, con unos 34 kt. Los cambios bruscos que se aprecian en la dirección e intensidad del viento en la **figura 28** denotan la presencia de cizalladura en el entorno de LEBL.

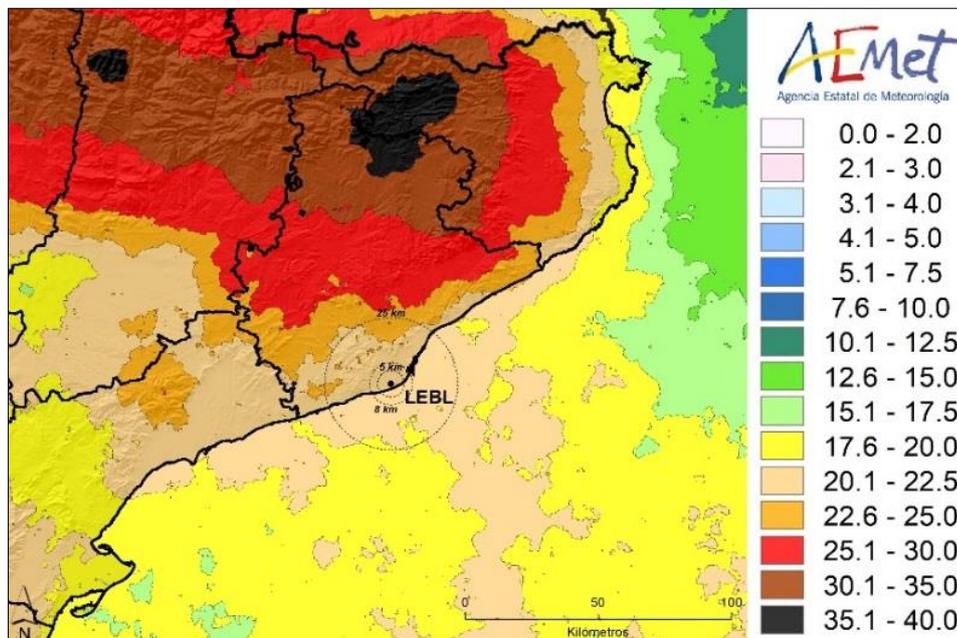


**Figura 28.** Episodio del paso de una línea de turbonada ocurrido el **23 de julio de 2017** en LERS (izquierda) y LEBL (derecha) en el viento: dirección (imagen superior) y velocidad (imagen inferior). En azul se denota el viento medio y en rojo el viento máximo (racha).

### 3.3.4. Climatología de tormentas en LEBL

Las tormentas en LEBL podrían resultar plenamente caracterizadas si, además de ser explicadas en base a los modelos conceptuales que resumen su dinámica, se las acompaña con una climatología que vendría a sintetizar su comportamiento medio en el área objetivo de estudio, que se reduce al propio aeródromo y su aproximación. Para ello, se analizará la distribución del número de días de tormenta que aparece publicada en la *Climatología de descargas eléctricas y días de tormentas* (Núñez Mora et al., 2019).

De conformidad con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se considera que ha habido un día de tormenta en un determinado observatorio cuando a lo largo de un día natural (civil) se ha oído al menos un trueno. Así, en los casos en los que se observa un relámpago pero no se oye el trueno, no se considera que ha habido tormenta.



**Figura 29.** Número medio anual de días de tormenta en el periodo 2007-2016 (diez años). Se ha representado los círculos de 5, 8 y 25 km de radio alrededor de LEBL correspondientes a las diferentes zonas de alerta por descargas. Fuente: Núñez Mora et al. (2019).

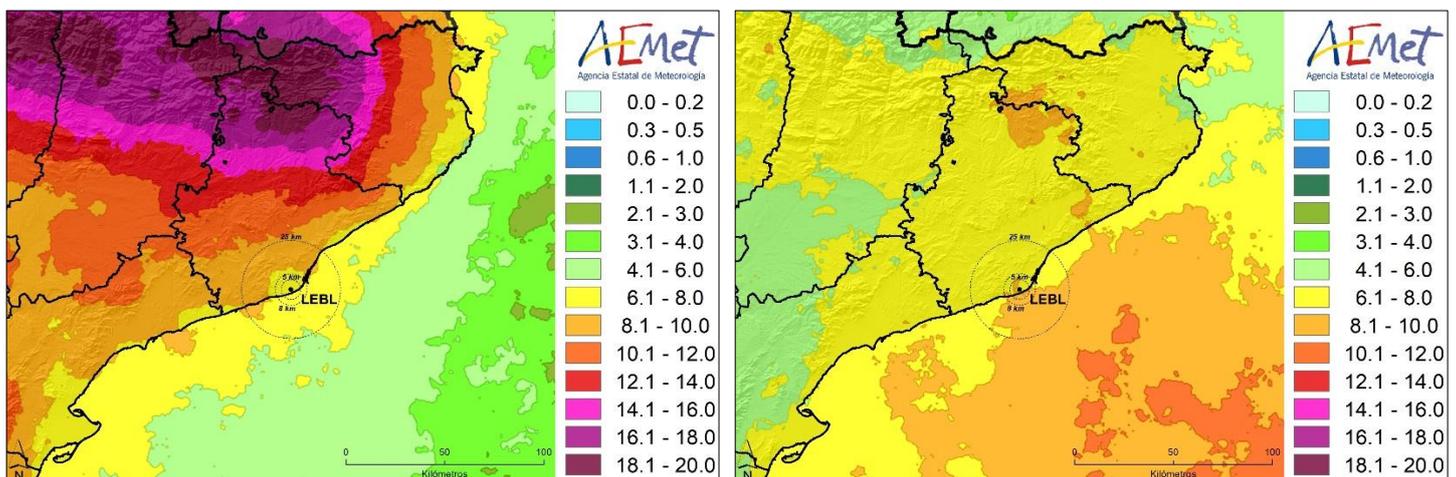
En la figura 29 se representa la distribución espacial del número medio anual de días de tormenta en una parte del área catalano-balear. La gama de colores establecida (desde las tonalidades claras a las más oscuras) está en consonancia con el sentido creciente del campo representado. Por simple inspección visual, cabe mencionar los siguientes comentarios:

- En el sector litoral del Empordà, concretamente entre Portbou y el cabo de Begur, suele soplar con frecuencia la Tramontana, especialmente al norte del cabo de Creus. Este hecho constituye un factor limitante para el desarrollo de las tormentas. Por este motivo, el área en color verde claro y lima está muy próxima a la línea de costa, alejándose progresivamente de esta hacia el sur.

- La llamativa área de color marrón oscuro localizada en la región más oriental del Pirineo estaría asociada a las tormentas de masa de aire que allí se forman. Por otra parte, las zonas denotadas en colores pardo y rojo ubicadas hacia el sureste, pueden deberse a varias contribuciones: a tormentas de segunda generación de las originadas inicialmente en el Pirineo Oriental o a las formadas directamente en situaciones de flujo de N, cuando la Tramontana experimenta un giro anticiclónico tierra adentro, realzando las convergencias que se forman (véase figuras 21 y 22).
- El área en color beis que se extiende desde LEBL hacia el interior del Mediterráneo se vincularía con la zona de convergencia catalano-balear, formada en situaciones de flujo de norte (sistema de vientos Tramontana-Mestral) que, en última instancia, pueden originar tormentas. Al tratarse de un promedio, esta señal representaría la posición media de la citada línea.
- En promedio, LEBL tiene 21 días de tormenta al año

En la figura 30 se muestra conjuntamente el número medio estacional de días de tormenta en verano y otoño. Resulta interesante observar la transición entre tales estaciones climatológicas en detrimento de analizarlos independientemente. Del ejercicio comparativo planteado, se extraen las conclusiones siguientes:

- Es muy destacable el pronunciado máximo veraniego en el Pirineo Oriental, correspondiente a las tormentas de disparo térmico en zonas de elevado gradiente altitudinal.
- El enfriamiento radiativo terrestre acaecido en otoño, la relativamente elevada temperatura superficial del Mediterráneo unido a la mayor frecuencia de bajas presiones mediterráneas justificarían la mayor frecuencia de días de tormenta sobre el mar en dicha estación.

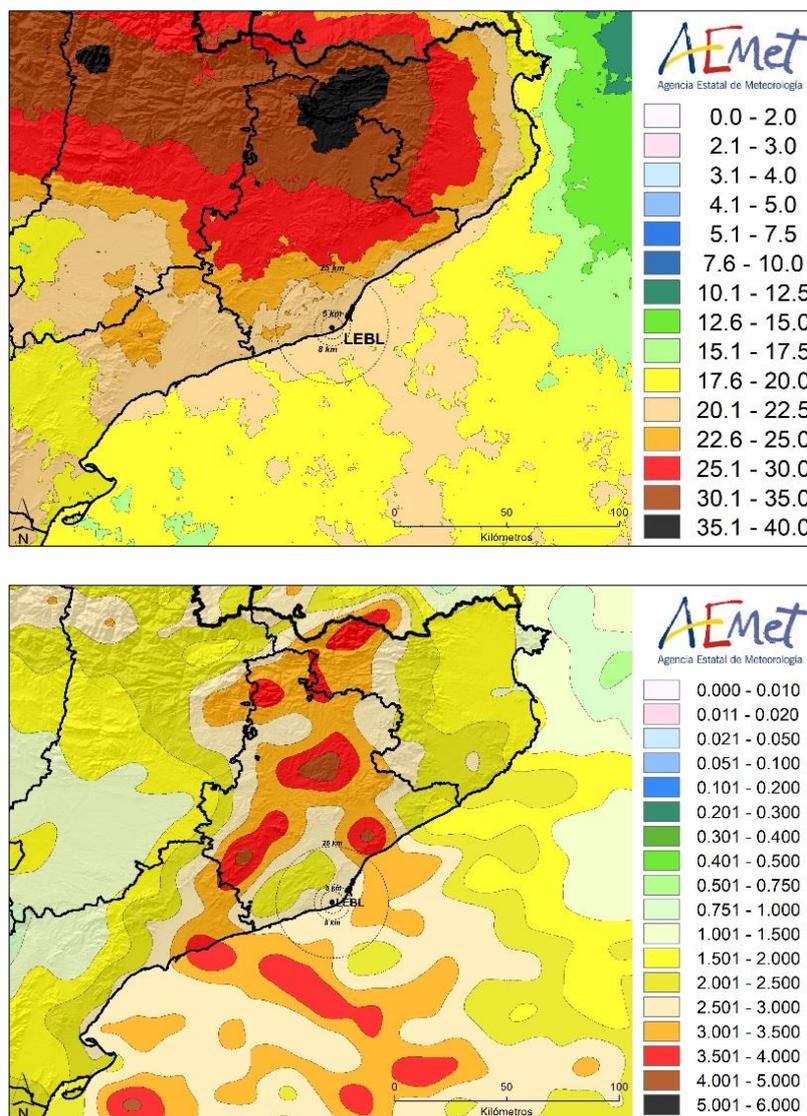


**Figura 30.** Comparativa del número medio estacional de días de tormenta en verano (izquierda) y otoño (derecha), considerando el periodo 2007-2016 (diez años). Se ha representado los círculos de 5, 8 y 25 km de radio alrededor de LEBL correspondientes a las diferentes zonas de alerta por descargas. Fuente: Núñez Mora et al. (2019).

En la figura 31 se representa una comparativa entre el número medio anual de días de tormenta (31, superior) y la densidad media anual de descargas eléctricas (31, inferior) a lo largo del periodo mencionado. Entre ambos no parece haber una correlación exacta. De

hecho, en regiones donde no aparece un máximo en cuanto al número medio anual de días de tormentas, sí tienen máximos en lo que a la densidad de descargas se refiere. Por ejemplo: en las regiones Litoral y Prelitoral de Barcelona las tormentas son más efectivas en rayos, a pesar de registrarse un menor número de episodios tormentosos. Se observa, además, que las aproximaciones a LEBL se encuentran en una zona de máximos de densidad espacial de descargas en el TMA

Hay que tener en cuenta que, por lo general, cuando una tormenta va acompañada de muchas descargas, suelen producirse fenómenos severos en superficie. No obstante, también estos pueden observarse aun habiendo una escasa actividad eléctrica, como ocurre en el caso de las lluvias torrenciales de tipo *cálido*.



**Figura 31.** Comparativa del número medio anual de días de tormenta (superior) y densidad media anual de descargas eléctricas (inferior), considerando el periodo 2007-2016 (diez años). Se ha representado los círculos de 5, 8 y 25 km de radio alrededor de LEBL correspondientes a las diferentes zonas de alerta por descargas. Fuente: **Núñez Mora et al. (2019)**.

En la **tabla 4** se resume todo lo concerniente a la presencia de tormentas en LEBL, explicitando los correspondientes ingredientes para su formación.

Tormentas en LEBL			
Ingredientes			
Tipos	Humedad	Inestabilidad	Mecanismo de disparo
De masa de aire en el Pirineo Oriental	<b>Origen local:</b> Exuberante vegetación Disponibilidad de agua en ríos o embalses <b>Origen advectivo:</b> Advección por las brisas de mar	Perfil termodinámico inestable generado por el calentamiento diferencial de las formaciones montañosas Perfil termodinámico inestable generado por una onda corta en altura	Convergencias en las cimas y cordales pirenaicos Interacción entre los frentes de racha o con las brisas de mar canalizadas por las cuencas fluviales
Por convergencias en el área catalano-balear	<b>Origen local:</b> Vegetación en la cordillera Prelitoral Disponibilidad de agua en ríos o embalses <b>Origen advectivo:</b> Advección de corto recorrido por las brisas de mar	Perfil termodinámico inestable generado por una onda en altura en los campos de temperatura y geopotencial: masa muy húmeda en niveles bajos, masa fría en altura.	Convergencias formadas en primera instancia por la interacción entre el Cierzo-Mestral y la Tramontana Presencia de una región de convergencias activa al NE de LEBL
Paso de una línea de turbonada del oeste	Traslación y evolución de una estructura lineal de origen convectivo, no frontal y organizada hacia el este <b>Origen:</b> Formación de una línea de tormentas al oeste de Cataluña (valle del Ebro o la Ibérica de Teruel) <b>Evolución:</b> La existencia de una onda corta en altura puede llegar a “desanclar” la tormenta de su punto de formación y trasladarla paulatinamente hacia el este, adquiriendo cierto grado de organización en su desplazamiento hacia LEBL		

**Tabla 4**

## 3.4. VISIBILIDAD REDUCIDA

La visibilidad meteorológica es la distancia máxima a la que un determinado objeto puede ser visto y reconocido contra el horizonte por un observador, sin que intervenga un procedimiento de iluminación. En relación con la visibilidad horizontal, se define el alcance visual en pista, RVR (en inglés: *Runway Visual Range*), como la máxima distancia horizontal a la que el piloto de una aeronave puede observar las marcas o señales luminosas que delimitan la pista o que señalan su eje.

### 3.4.1. Niebla

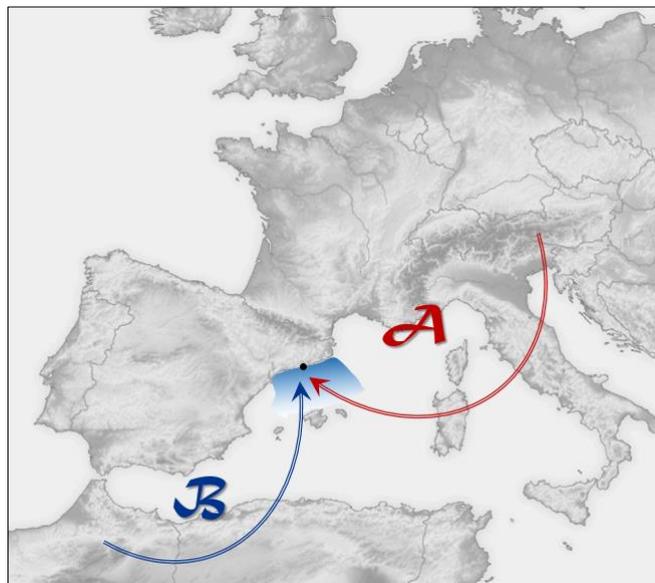
En líneas generales, la niebla es el fenómeno meteorológico por excelencia al que está asociado la reducción de la visibilidad. Es la suspensión en el aire de gotitas microscópicas de agua formadas como consecuencia de la condensación del vapor de agua, formando un velo

blanquecino que cubre el paisaje y reduce la visibilidad horizontal en superficie a menos de un kilómetro. Si la visibilidad horizontal fuese mayor, entonces se hablaría de bruma.

En el caso particular de LEBL, además de la niebla, habría que considerar otros fenómenos meteorológicos típicos del área mediterránea en este contexto, como son los temporales de Llevant, las lluvias cálidas intensas o incluso las tormentas, ya que configuran un escenario de visibilidad reducida tanto en el propio aeropuerto como en su aproximación, si bien, se han valorado aparte por considerar más relevantes otros impactos asociados.

Las nieblas de advección del Mediterráneo son las más frecuentes en LEBL. En cambio, las formadas por enfriamiento radiativo son más raras ya que requieren vientos muy débiles además de largos periodos de enfriamiento. Dado que el aeropuerto se localiza en un delta fluvial, es usual que se establezcan brisas terrales que las acaben disipando.

Para que se produzca una niebla de advección es preciso que una masa de aire cálida se deslice sobre una superficie más fría y que la capa en contacto con dicha superficie esté saturada de humedad. Estas condiciones suelen darse en las costas catalanas entre la primavera y comienzo del verano cuando una masa de aire procedente del norte de África y relativamente cálida, es impulsada por un viento sinóptico débil del S-SE y se desliza sobre el Mediterráneo occidental, que en esa época del año actúa como un mar frío (Camacho, 1989). Esta configuración puede establecerse por la existencia de un anticiclón sobre el sur de Europa o el Mediterráneo occidental y una baja presión al este de Gibraltar o bien al norte de Argelia (figura 32).



**Figura 32.** Situación sinóptica típica para la formación de nieblas de advección en LEBL. La clave está en el establecimiento de un flujo de componente S sobre el Mediterráneo que advecta aire relativamente cálido en comparación con la superficie del mar subyacente. Una vez que se forman, estas nieblas se acomodan a lo largo del litoral.

El aire más cálido, procedente de la baja presión africana, se enfría por debajo en su avance hacia el norte, dando lugar a una inversión térmica. Por debajo de esta, el aire se satura y condensa, dando lugar a bancos de niebla o a grandes áreas de niebla y estratos bajos que pueden afectar a amplias zonas del mar y zonas costeras circundantes (figura 33). Su espesor,

por lo general, no supera los 100 metros. El flujo sinóptico impulsa la niebla hasta el litoral de Cataluña y concretamente a LEBL.



**Figura 33.** Modelo conceptual de la formación de nieblas de advección. La masa de aire más cálida, procedente de la baja presión al oeste de Gibraltar, en contacto con el Mediterráneo, constituye un entorno muy favorable para que se produzca condensación en las capas más bajas que, conducidas por el flujo sinóptico, pueden llegar a afectar a grandes regiones espaciales. Adaptado de **Blog Metservice**.

En la [tabla 5](#) se resume lo más relevante en lo que a las nieblas en LEBL se refiere.

Las nieblas en LEBL	
Ingredientes	Impactos
Dirección del viento de mar a tierra, lo que corresponde con vientos del II y III cuadrante (de E a SW), habida cuenta de la localización de LEBL	Aumento del tiempo de ocupación en pista
Nula actividad convectiva, a fin de que la mezcla vertical no disipe la niebla.	Aterrizajes frustrados
La temperatura de la masa de aire que se desliza sobre el mar es cálida en relación a este.	Desvíos
La intensidad del terral modula el grado de incursión de los bancos de niebla en las pistas y plataformas	Aumento del espaciado entre aterrizajes
	Disminución de la capacidad

**Tabla 5**

### 3.4.2. Temporales de Llevant

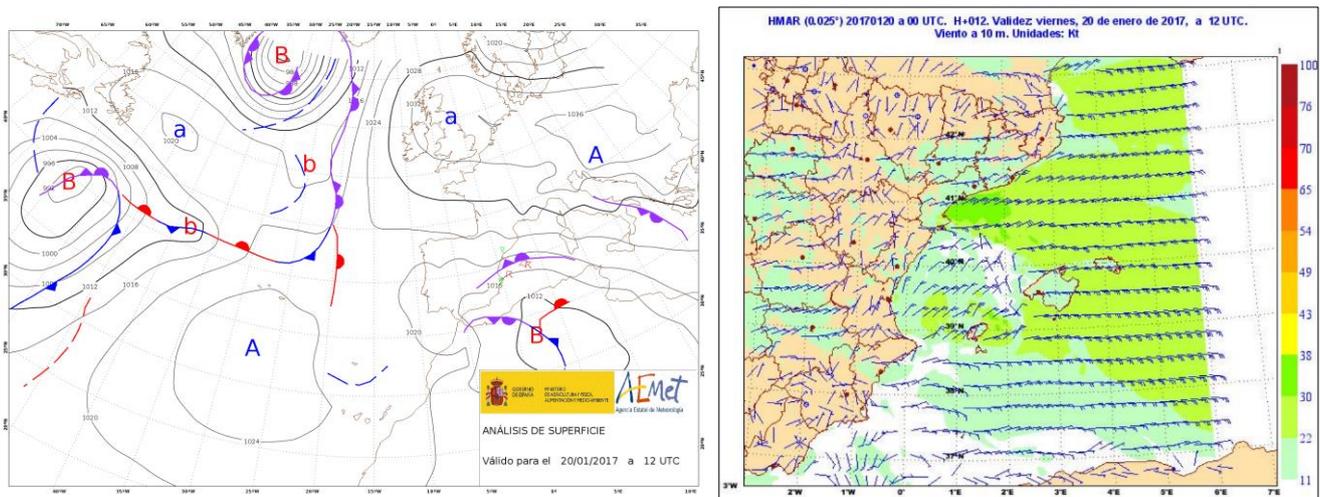
Los temporales de Llevant son especialmente importantes en los meses otoñales e invernales, cuando van acompañados de lluvias, aunque puede haber algún episodio con buen tiempo en pleno verano. Se trata de un escenario meteorológico muy favorable para la formación de lluvias persistentes en el litoral de Cataluña y, particularmente, en LEBL. De esta forma, su principal impacto, además de la visibilidad reducida en la aproximación a LEBL, es la contaminación de la pista.

En estos episodios, el viento en la fachada litoral es fuerte y de componente E, notándose una disminución ostensible desde la costa hacia el interior. Este se establece como consecuencia

de la ubicación de una alta presión en las islas Británicas y una baja presión en el norte de África o Mediterráneo occidental.

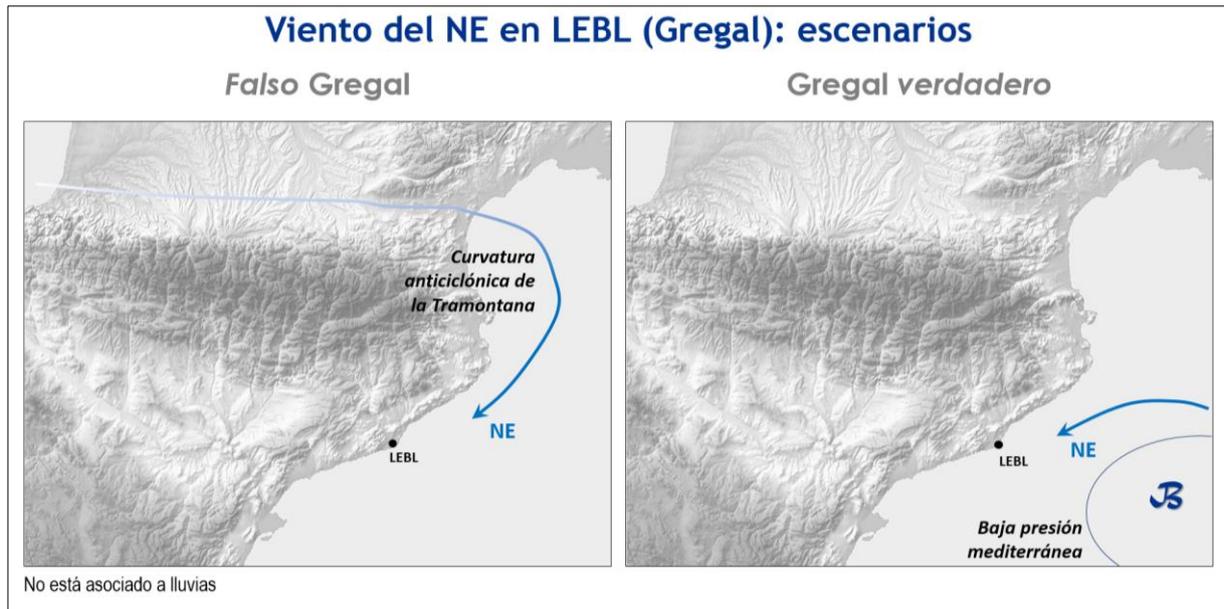
De entre todos los vientos de componente E sobre LEBL, el más frecuente es el NE, denominado Gregal, el cual tiene dos orígenes distintos:

- *Falso gregal*: consecuencia del giro anticiclónico de la Tramontana cuando previamente se adentra en el Mediterráneo a través del golfo de León, en una situación atmosférica estable. La entrada del Gregal en LEBL se puede producir en forma de corriente de densidad (véase el apartado 3.3 sobre cizalladura) o bien impulsada por el dinamismo asociado a la Tramontana al adentrarse al mar. No está asociado a lluvias.
- *Gregal verdadero o ciclónico*: resultado de la formación de una mesobaja centrada en las islas Baleares o frente a las costas de Argelia. En este caso, no habrá una entrada tan brusca como en el caso anterior, por lo que su predecibilidad asociada es, por lo general, mayor que en el *falso gregal*. Suele estar acompañada de abundante nubosidad y lluvias persistentes. En algunas ocasiones, su dinámica está conducida por un anticiclón centroeuropeo, a pesar de la relativa proximidad de la baja mediterránea. Dependiendo de la fortaleza de este, el cielo puede permanecer poco nuboso en la aproximación a LEBL. En la [figura 34](#) se muestra un ejemplo de este escenario, correspondiente al **20 de enero de 2017**.



**Figura 34.** El episodio del **20 de enero de 2017** ilustra claramente el escenario descrito anteriormente conocido por *Gregal verdadero*: establecimiento de un viento del NE en LEBL como consecuencia de la formación de una baja presión en el Mediterráneo y una alta presión en latitudes más altas. Se compara el mapa de análisis de superficie a las 12 UTC (izquierda) con el viento en superficie pronosticado por el modelo HARMONIE-AROME para el mismo instante (derecha). Nótese la diferencia de intensidad entre el litoral y tierra adentro, del orden de 10 kt.

La [figura 35](#) sintetiza de forma gráfica lo comentado anteriormente.



**Figura 35.** El viento de componente E más común en Barcelona y por ende en LEBL es el NE, denominado Gregal. Los dos escenarios precursores del establecimiento de este viento se sintetizan sobre estas líneas.

### 3.5. LLUVIAS CÁLDIDAS INTENSAS

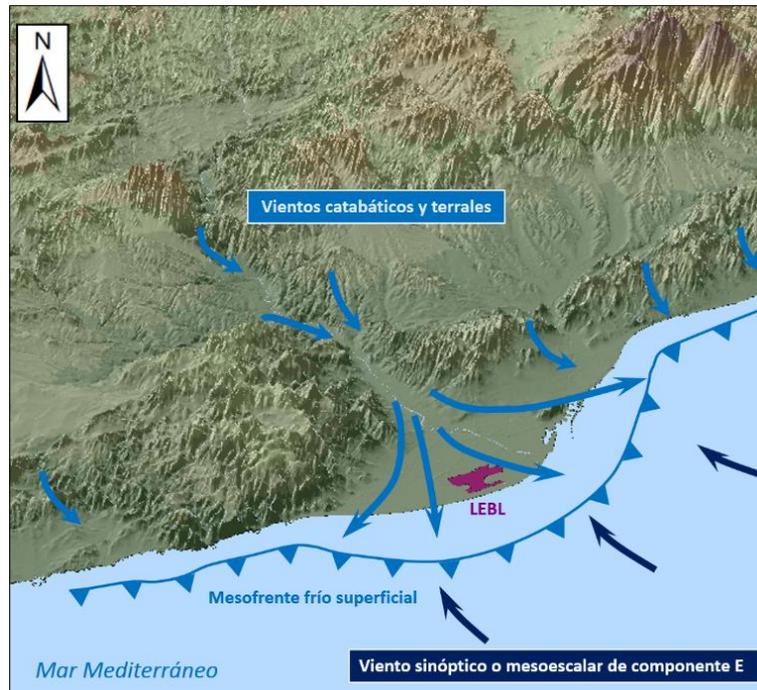
Son lluvias muy fuertes, convectivas, llegando a ser de carácter torrencial pues su intensidad podría ser superior a varios litros/m<sup>2</sup> por minuto. Su actividad eléctrica asociada es prácticamente nula. De hecho, su denominación «cálida» se debe a que la temperatura en la que se desarrolla la nube precursora está por encima de la temperatura de congelación, por lo que, al no existir partículas sólidas en su interior, el proceso de separación de cargas eléctricas no es eficiente. Por este motivo, no se observan rayos. Este tipo de precipitación está asociada a regiones de alto contenido de agua precipitable en niveles bajos.

Aunque hay numerosas referencias en la Comunidad Valenciana, también pueden producirse en el litoral catalán, especialmente en su sector central, que comprende desde el norte de la provincia de Tarragona hasta el sur de la de Girona. Concretamente, este tipo de eventos suelen ser muy comunes en la costa central de Barcelona, entre las comarcas del Garraf y el Maresme, lugar donde precisamente se localiza LEBL.

La estación otoñal es la época del año más propicia para que puedan ser observadas.

Para su formación, además de requerirse una cierta inestabilidad en la estratificación, la convergencia sostenida de vientos en niveles bajos constituye su mecanismo más importante ya que, además de generarlas, las mantiene. De hecho, la convergencia más presente y mejor caracterizada es la que se produce por la confluencia entre un flujo de levante sinóptico o mesoescalar en la costa central de Barcelona y los vientos terrales descendentes de la cordillera litoral que son canalizados posteriormente por los valles de los ríos Llobregat, Besós

o Tordera, así como otros cauces de rieras, de menores dimensiones y localizados sobre todo en la comarca del Maresme. El modelo conceptual se resume en la [figura 36](#).



**Figura 36. Modelo conceptual de las lluvias cálidas en el sector central de la costa catalana. Adaptado de Callado y Pascual (2002).**

Se trata de un tipo de lluvias que básicamente son nocturnas, aunque pueden llegar a manifestarse hasta primeras horas de la mañana, siempre y cuando los terrales persistan. Están formadas por una gran cantidad de gotas pequeñas que, a su vez, producen una reducción sustancial de la visibilidad. Su principal impacto en LEBL, además de la reducción de visibilidad en la aproximación o incluso la presencia de cizalladura debido a la yuxtaposición de vientos de componente del E y terrales, es la contaminación de las pistas. A causa de su elevada intensidad de precipitación, pueden ocasionarse inundaciones locales de importancia pudiendo quedar gran parte del lado aire encharcado.

Su rasgo más distintivo es la falta de correspondencia entre la reflectividad observada por el radar y la intensidad observada así como la precipitación medida en superficie. La razón de ello estriba en los procesos atmosféricos insertos en el ámbito de la microfísica de nubes. En este caso, al tratarse de nubes cálidas, las gotas de agua que precipitan se acabarían formando según el mecanismo de colisión-coalescencia, en el que el tamaño de las gotas de agua es relativamente pequeño. De hecho, los bajos valores de reflectividad observados -no superiores a 50 dBz- se deben a que el tamaño de las gotas de agua son relativamente pequeños y al escaso desarrollo vertical de la estructura nubosa.

Su escasa reflectividad radar asociada, así como el disimulo con el que se manifiestan los forzamientos dinámicos y termodinámicos precursores, hacen que la labor de vigilancia sea complicada. No obstante, la presencia de un levante flojo al inicio de la noche puede ser una señal de alarma.

En la [tabla 6](#) supone un resumen de lo expuesto en el presente apartado.

Lluvias cálidas intensas en LEBL		
Características	Ingredientes	
Carácter nocturno y puntual	Ligera inestabilidad en capas bajas	
Convección de poco espesor: la señal de reflectividad del radar es pequeña en comparación con la eficiencia de la precipitación	Elevada cantidad de agua precipitable en capas bajas	
<b>Microfísica:</b> Los procesos de generación de precipitación tienen lugar por encima de 0 °C		
Chubascos sin descargas eléctricas	<b>Convergencia horizontal:</b> se produce mar adentro, muy próxima a la línea de costa	
<b>Efecto orográfico:</b> intensificación de los terrales en las aperturas de las desembocaduras fluviales, realzando en última instancia la convergencia	<b>Viento de procedencia Mediterránea:</b> de componente E, cálido y húmedo, muy cerca de la saturación	<b>Viento terral:</b> al final del día aire frío y seco
Impactos		
Contaminación de pista Encharcamiento lado aire Reducción drástica y súbita de la visibilidad en la aproximación Desvíos a aeropuertos alternativos		

**Tabla 6**

## 3. Impactos

---

Como ya se comentó en la introducción, un impacto es la perturbación de la operatividad de un aeródromo como consecuencia de la ocurrencia de uno (o varios) fenómenos meteorológicos. Cuantificar en qué medida un aeródromo puede verse afectado por la fenomenología atmosférica dependerá no solo del fenómeno meteorológico en sí mismo, sino también de otros condicionantes como, por ejemplo, la estación climatológica, tráfico registrado, dotación instrumental del aeródromo en cuestión, etc.

Cuantificar objetivamente la vulnerabilidad de un aeródromo ante sus fenómenos de impacto previamente identificados, no es fácil. Para tal fin, además de contar con los suficientes conocimientos en materia meteorológica, es necesaria una comprensión de la realidad aeronáutica. Entender la información que contienen las regulaciones así como el cómputo de aterrizajes frustrados, desvíos y cancelaciones en su debido contexto meteorológico, puede reportar interesantes conclusiones.

En el presente capítulo, se ha apostado por estudiar las regulaciones de las arribadas en LEBL emitidas por EUROCONTROL debido a episodios meteorológicos adversos. No hay que olvidar que por aeródromo se hace referencia a las pistas, plataformas y la aproximación. El periodo de estudio considerado es de siete años (2012-2018).

Para ello, el planteamiento inicial en aras de entender qué es una regulación sería el siguiente: sobre el volumen de aire o sector en el que se encuentra embebido LEBL, hay que considerar dos magnitudes de notable interés:

- Capacidad: número máximo de aeronaves que pueden acumularse en la aproximación al aeropuerto sin que la seguridad operacional se vea lastrada.
- Demanda: número de aeronaves que requieren entrar en la aproximación al aeropuerto en un instante determinado conforme a su plan de vuelo previamente establecido. En este caso, son las arribadas.

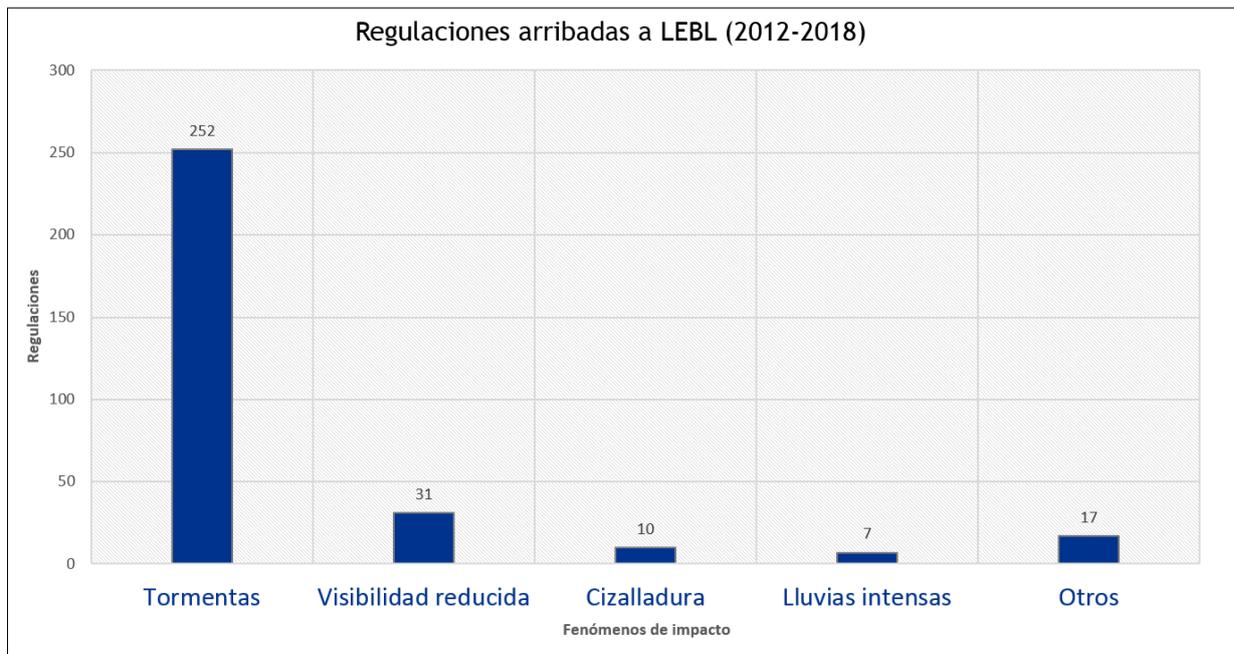
La falta de equilibrio entre la capacidad (factor restrictivo) y la demanda (factor manipulativo) será la principal causa de la emisión de una regulación que supondrá, en última instancia, una alteración en la cadencia de arribadas al aeropuerto, conocida como RATE (número total de aterrizajes que se pueden realizar en un aeródromo en una hora).

Una regulación es una acción táctica y preventiva que es validada y difundida por EUROCONTROL en coordinación con el servicio ATS de cada país.

Concretamente, una regulación emitida por causas meteorológicas se establece en base al tráfico previsto y a la predicción meteorológica de un determinado fenómeno de impacto. La puntual disponibilidad de productos por parte del proveedor de servicios meteorológicos para el usuario aeronáutico es esencial para una gestión óptima del tráfico previsto en un sector de arribadas cuya capacidad se vería notablemente restringida.

Solamente se regulan aquellos tráficos que aún no han despegado, siendo su principal efecto el retraso respecto de su hora prevista de despegue (ATFM Delay). En la misma línea, aquellos tráficos que ya están en el aire (tanto en ruta como en los circuitos de espera habilitados como paso previo a culminar una aproximación) asumirían demoras. Hay que tener en cuenta que, el que no se establezca una regulación en el contexto de una situación meteorológica adversa conllevaría a una saturación del espacio aéreo, a un aumento de las esperas en la aproximación y a la posibilidad de desvíos a aeropuertos alternativos.

El objetivo en el presente capítulo será cuantificar el grado de importancia de cada uno de los fenómenos de impacto en términos de las regulaciones que se activaron.



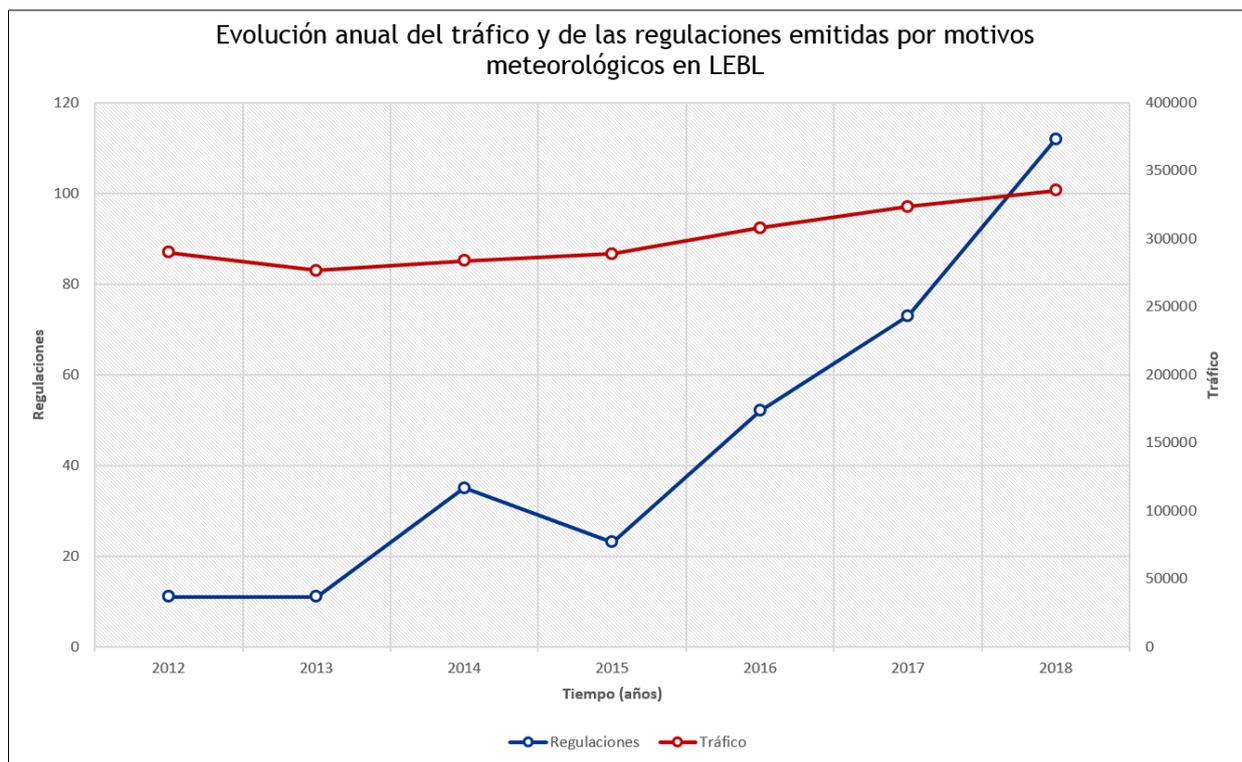
**Figura 37.** Número de regulaciones de las arribadas clasificadas según los fenómenos de impacto: tormentas, visibilidad reducida, cizalladura, lluvias intensas y otros, que aludirían a situaciones indeterminadas o carentes de interés para ser consideradas de forma aislada. Fuente: EUROCONTROL.

En la [figura 37](#) se muestra el número absoluto de regulaciones por causas meteorológicas adversas clasificadas según el fenómeno de impacto:

- Teniendo en cuenta que la atmósfera es un medio continuo, no resulta trivial resumir toda la fenomenología embebida en LEBL en términos de un conjunto discreto de entidades elementales denominadas fenómenos de impacto. No hay una solución única al respecto, de modo que podría darse un cierto entrelazamiento de manera que un fenómeno de impacto podría causar varios impactos y viceversa. En este sentido, aunque las tormentas constituyen un entorno favorable para la presencia de cizalladura en el aeropuerto, su

elevado impacto en las operaciones les hace ser merecedoras de considerarlas de forma explícita.

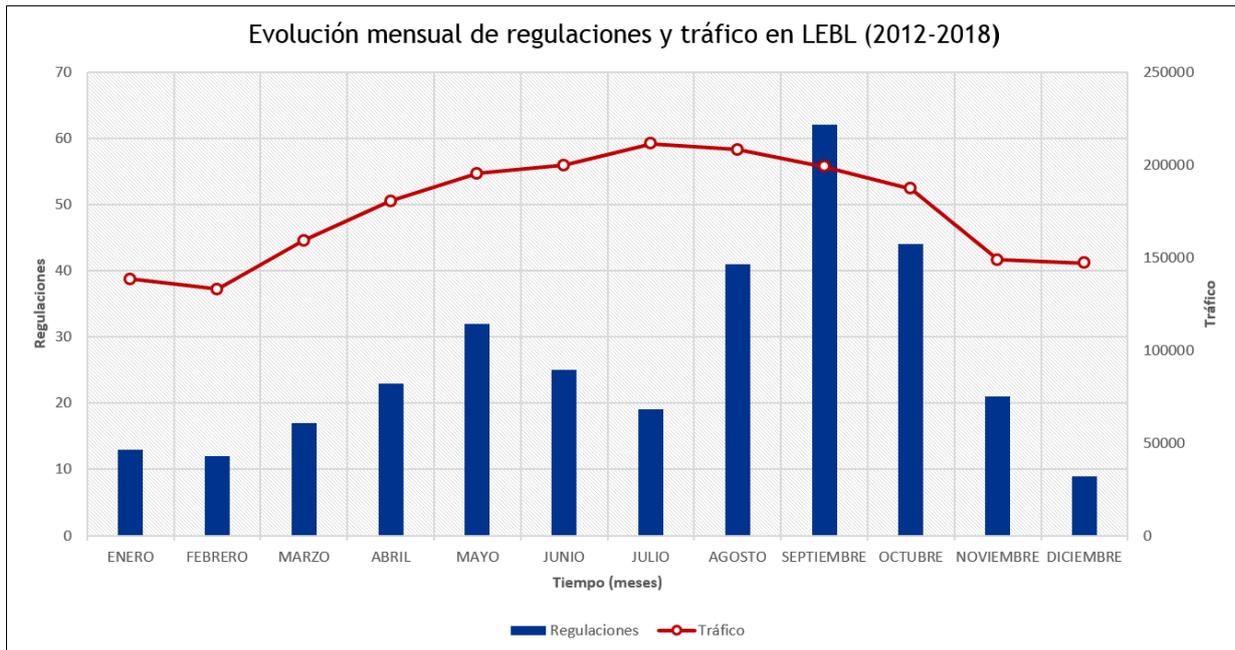
- Las regulaciones de las arribadas por visibilidad reducida son las causadas por las nieblas y los temporales de Llevant. En este caso, se aprecia una multiplicidad de fenómenos meteorológicos que son causantes de un mismo impacto.
- Las regulaciones de las arribadas por lluvias intensas se explicarían en base a episodios de lluvias cálidas intensas, de carácter nocturno y puntual, y a los temporales de Llevant.



**Figura 38.** Evolución anual de regulaciones de las arribadas por causas meteorológicas y tráfico a lo largo del periodo de estudio considerado (2012-2018). Fuentes: AENA y EUROCONTROL.

Las regulaciones emitidas por fenómenos meteorológicos adversos deben ser puestas en contexto con el tráfico registrado. En la [figura 38](#) se representa la evolución anual de ambas:

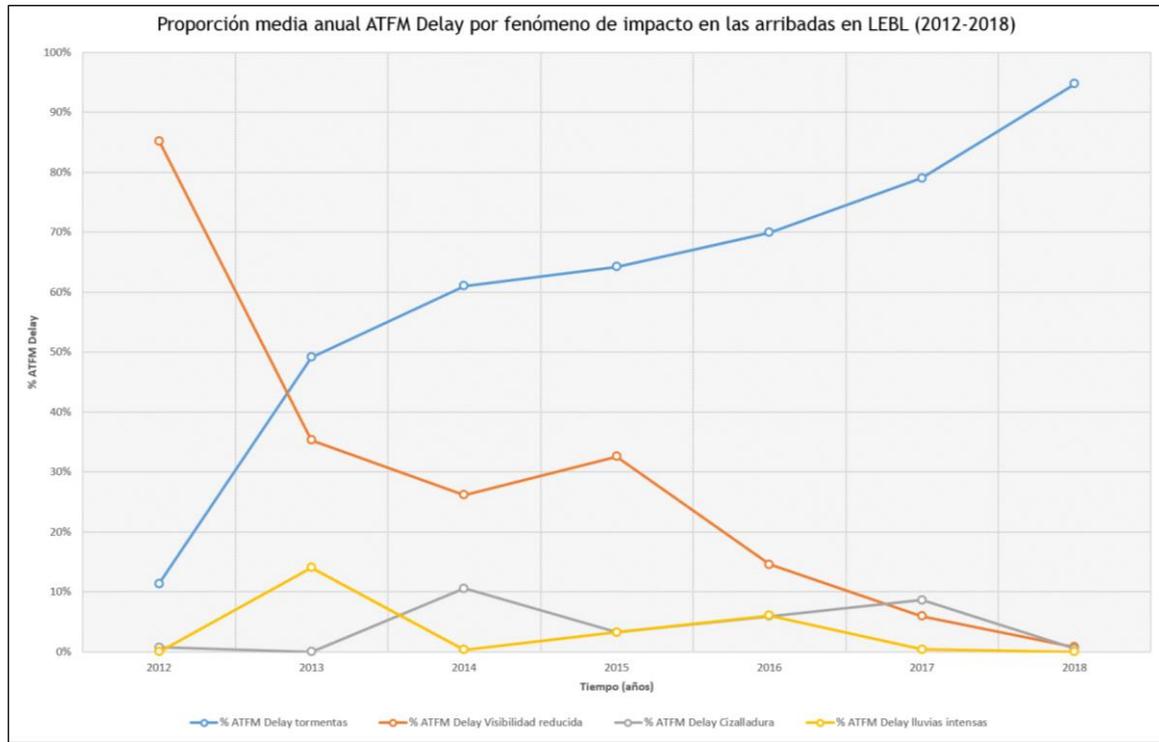
- Se observa un aumento de las regulaciones y tráfico a lo largo de los años comprendidos en el periodo de estudio.
- El ritmo de aumento en ambos casos es muy diferente, apreciándose un mayor incremento anual para las regulaciones. La ocurrencia de cualquier fenómeno meteorológico frente una excesiva demanda de tráfico constituye un escenario crítico en la operatividad que, a su vez, implicaría la activación de una regulación.



**Figura 39.** Evolución temporal de las regulaciones de las arribadas por causas meteorológicas y tráfico a lo largo del periodo de estudio considerado (2012-2018). Fuente: AENA y EUROCONTROL.

La [figura 39](#) permite visualizar la variabilidad mensual de las citadas variables:

- El tráfico mensual muestra un patrón de comportamiento ondulatorio, en el que destaca un máximo en los meses de verano contrapuesto con una disminución a finales de otoño.
- En lo que respecta al número medio de regulaciones, hay un máximo entre finales de verano y principio de otoño, además de otro secundario en primavera.
- A principios de verano (meses de junio y julio) se observa un aumento del tráfico acompañado de una disminución de las regulaciones activadas. Ello es debido a que, en estos meses, climatológicamente el entorno de LEBL no es precisamente el más convectivo.



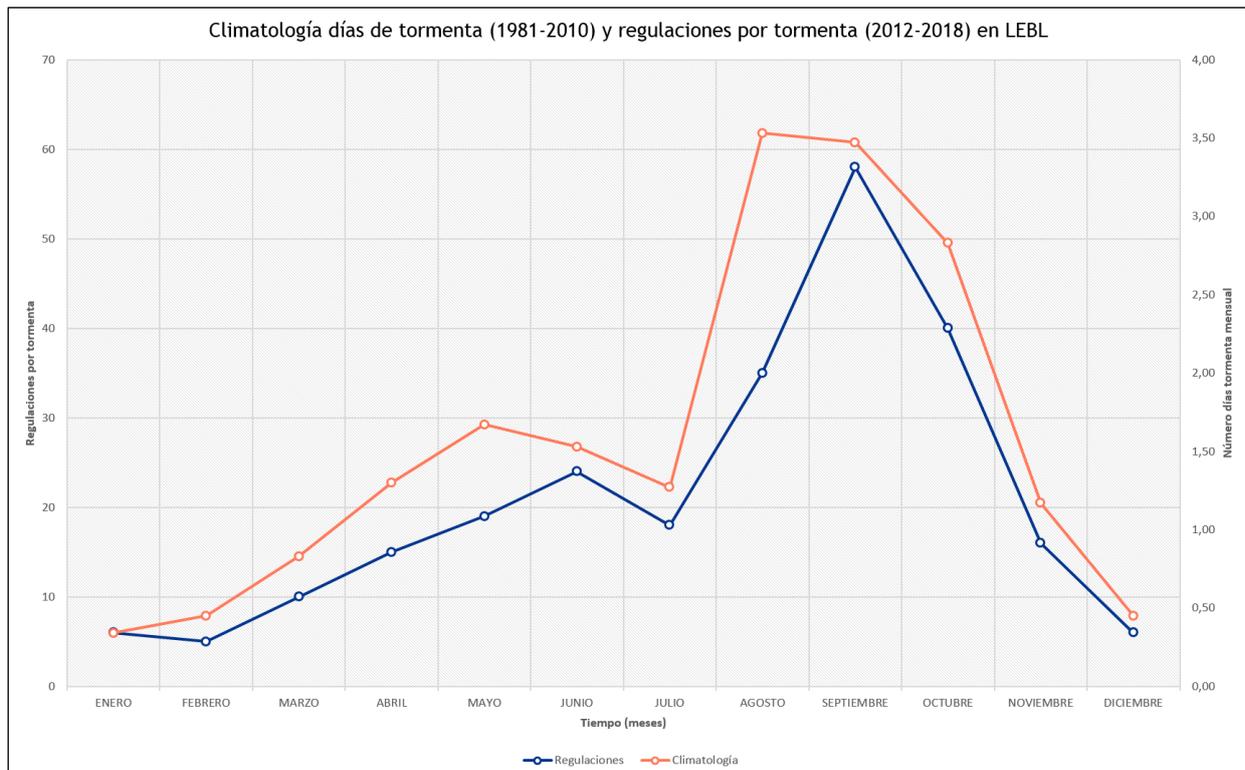
**Figura 40. Comparación anual del retraso medio asociado a cada tipo de regulación. Fuente: EUROCONTROL.**

El grado de importancia relativa de cada una de las regulaciones podría evaluarse en términos de su retraso medio asociado. Como ya se advirtió anteriormente, las regulaciones se emiten para aquellas aeronaves que aún no han despegado, haciéndoles retrasar su salida. Es lo que se conoce como ATFM Delay (figura 40). Esta variable podría ayudar a ordenar en sentido creciente los distintos fenómenos descritos según el impacto asociado.

Dado que el tamaño muestral para cada una de las regulaciones es muy dispar, se va a representar el retraso asociado a cada uno de las regulaciones en comparación al retraso total de todas ellas. De esta forma:

- El retraso relativo a las tormentas es el mayor de todos ellos (salvo en 2012), mostrando un evidente crecimiento anual. Este comportamiento confirma la adversidad de estas sobre la operatividad de LEBL que se manifiesta en múltiples formas: rachas de viento, reducciones súbitas de visibilidad, aparato eléctrico, chubascos, cizalladura, etc.
- Los escenarios meteorológicos precursores de visibilidad reducida son los más importantes por detrás de las tormentas, si bien se aprecia un descenso medio anual. Este hecho podría aducirse a posibles cambios en la dotación tecnológica con la que se cuenta en los sistemas de ayuda a aterrizajes en condiciones de baja visibilidad o a modificaciones en los procedimientos de baja visibilidad (LVP) que suelen elaborarse, por lo general, con la mutua conformidad entre el usuario aeronáutico y el gestor aeroportuario. Además, hay que destacar que el retraso medio asociado a estas regulaciones es bastante elevado en comparación con el número de estas. Penalizan mucho con respecto al total.

- En lo que al resto de impactos se refiere (regulaciones por cizalladura y lluvias intensas), no se percibe una tendencia clara como en los dos casos anteriores. Su grado de afectación espacio-temporal, la persistencia o la época del año en la que suelen aparecer podrían explicarlo en gran parte.



**Figura 41. Comparación media mensual entre el número de días de tormentas en LEBL (climatología) y las regulaciones de las arribadas a LEBL por tormentas. Fuentes: Banco Nacional de Datos Climatológicos de AEMET y EUROCONTROL.**

Por último, es interesante mostrar una comparativa entre el número medio mensual de regulaciones por tormentas y su correspondiente climatología, según el periodo de referencia en vigor 1981-2010 (figura 41). El primero de los anteriores aludiría a la respuesta por parte del usuario (acción) mientras que el segundo a la propia naturaleza atmosférica en la que se localiza LEBL (condiciones de contorno):

- Se observa una evidente sintonía entre ambas curvas, de modo que la regulación media mensual por tormentas está en consonancia con el número medio de días de tormentas en LEBL.
- La climatología representada se ha calculado a partir del cómputo del número de días de tormenta observados en el aeropuerto, sin tener en cuenta aquellas tormentas que se han formado varias millas más alejadas pero con impacto en su aproximación.

## 4. Resumen

---

El análisis meteorológico orientado a impactos en LEBL podría resumirse en base a cinco fenómenos de impacto cuya presencia afectaría a la operatividad del aeropuerto en forma de cancelaciones, retrasos, desvíos, aterrizajes frustrados o cambios de configuración. Todos ellos son: **tormenta**, **cizalladura**, **visibilidad reducida**, **lluvias cálidas intensas** y **brisa de mar**.

La tormenta es el más importante ya que es el causante del mayor número de regulaciones emitidas. LEBL es uno de los más expuestos de toda España frente a este fenómeno meteorológico. En promedio, tiene 21 días de tormenta al año. Sin embargo, no se está considerando las que se forman más lejos que, a su vez, podrían causar fuertes rachas de viento en la aproximación. La complejidad conceptual inherente a este fenómeno ha hecho que haya sido resumido en base a tres tipos.

La razón por la que se han considerado las tormentas separadamente de la cizalladura es debido al enorme interés por parte de los usuarios aeronáuticos. Así, la cizalladura se ha completado con otras situaciones meteorológicas que también favorecen su presencia como la corriente de densidad atrapada en la costa o el viento sinóptico fuerte de componente W.

La visibilidad reducida, que es el segundo fenómeno de impacto en grado de importancia detrás de las tormentas, se asocia a dos escenarios meteorológicos: temporales otoñales de Llevant y las nieblas de advección, típicas en primavera.

Se han considerado explícitamente las lluvias cálidas intensas, nocturnas y otoñales, dado que se trata de un fenómeno muy particular en LEBL y cuyo impacto está relacionado con la contaminación de la pista o la súbita reducción de visibilidad en la aproximación al aeropuerto.

Finalmente, el fenómeno meteorológico que menor impacto produce es la brisa de mar. A lo sumo, podría retrasar la activación de la configuración nocturna, con importantes consecuencias medioambientales al reducir el ruido sobre las poblaciones cercanas al aeropuerto.

El objetivo de la presente guía es que pueda servir como una interesante herramienta de asesoramiento para los usuarios aeronáuticos que deseen conocer mejor el entorno meteorológico donde llevan a cabo sus operaciones.

## 5. Summary

---

The meteorological analysis approach to impacts in LEBL could be summarized by means of five impact phenomena whose presence would affect the airport's operativity in the form of cancellations, delays, diversions, go arounds or configuration changes. These phenomena are: [thunderstorm](#), [windshear](#), [reduced visibility](#), [heavy warm rain](#) and [sea breeze](#).

Thunderstorm is the most important since it causes the largest number of regulations emitted. LEBL is one of the Spanish airport most affected by this phenomenon. On average, there are 21 thunderstorms' day per year. However, thunderstorms occurring further away have not considered and they could still cause strong wind gusts on approach. Storms affecting LEBL have been summarized in three different types, due to the complexity regarding their conceptual models.

The reason why thunderstorm have been separately from windshear is due to their greater importance for aeronautical users. Thus, in the windshear chapter other meteorological situations such as coastal trapped density currents or strong synoptic westerly winds are considered.

Reduced visibility, which is the second impact phenomenon in degree of importance, behind thunderstorms, is associated with two meteorological scenarios: Storm with E or NE winds and advection fog, the latter typically occurring in spring.

Heavy warm rain (usually occurring on autumn nights) has been considered explicitly since it is a very singular phenomenon in LEBL; its impacts are runway contamination and sudden visibility reduction on approach.

Finally, the meteorological phenomenon with the least impact is sea breeze. At the most, it could delay the activation of night configuration, with important consequences since this configuration reduce the noise over the nearest cities.

This meteorological guide is aimed to provide an interesting advisory tool for those aeronautical users who wish to know more about the meteorological environment where their operations are embedded.

## 6. Referencias

---

Callado Pallarés A., Pascual Berghaenel R. (2002): **Storms in front of the mouth rivers in north-eastern coast of Iberian Peninsula.** *Mediterranean Storms*. 5 pp.

Camacho Ruíz, J. L. (1989): **Nieblas de advección en el aeropuerto de Barcelona.** Actas del Primer Simposio Nacional de Predictores del INM Madrid. 6 pp.

Fontserè Riba, E. (1950): **La Tramuntana empordanesa i el Mestral del golf de Sant Jordi.** *Institut d'Estudis Catalans. Arxius de la secció de Ciències*. Institutio Patxot. 88 pp.

González Herrero, S.; Callado Pallarés, A.; Werner Hidalgo, E.; Escribà Ayerbe, P.; Bech Rustullet, J. (2018): **Coastally-Trapped Disturbances caused by the Tramontane wind on the NorthWestern Mediterranean: Numerical study and Sensitivity to Short-wave Radiation.** *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 48 pp.

Martínez Albadalejo, A. (1996). **Brisas a la costa catalana: metode d'estudi i exemple.** *Terra: revista catalana de geografia, cartografia i ciencies de la terra*. 1996, 10(27). 5 pp.

Méndez Frades A., Pons Reynés M. R., Simarro Grande J., Santos Atienza I., González Herrero S., Pascual Berghaenel R., Pladevall Boix A., Callado Pallarés A., Compte Rovirola M. (2019): **La cizalladura en el aeropuerto de Barcelona: episodio del 10 de septiembre de 2017.** Nota técnica 26 de AEMET. 35 pp.

Núñez Mora, J. A., Riesco Martín, J., Mora García, M. A. (2019): **Climatología de descargas eléctricas y de días de tormenta en España.** AEMET. Depósito legal: M-23855-2019. 140 pp.

## 7. Agradecimientos

---

Dionisio Canomanuel González y Andrés Tascón Rodríguez (AENA)

Jefes de Sala y Técnicos de Control de Afluencia del ACC de Barcelona (ENAIRE)

Irene Gómez Martín, Observadora aeronáutica de AEMET en la Oficina Meteorológica de LEBL.

César Rodríguez Ballesteros, Analista de Sistemas del Área de Climatología y Aplicaciones Operativas de AEMET.

Carlos Correa Guinea, Técnico de Meteorología en la Oficina de Programa Cielo Único de AEMET.

José Ángel Núñez Mora, Jefe de la Sección de Climatología de la Delegación Territorial de AEMET en la Comunidad Valenciana.

EUROCONTROL

## AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA

**Servicios Centrales**  
Leonardo Prieto  
Castro, 8  
28049. Madrid

**Delegación Territorial en  
Cataluña**  
Arquitecto Sert, 1  
08071. Barcelona

