

DIVERSAS HERRAMIENTAS PARA LA PREDICCIÓN AERONAUTICA DE AREA

José Antonio Fernández Monistrol

Servicio Nacional de predicción. INM

RESUMEN

En el Centro Nacional de Predicción se elaboran diariamente diversos productos que incluyen la predicción de fenómenos tales como el engelamiento, la turbulencia y las ondas de montaña, cuya ocurrencia incide sobre la operación de aeronaves comerciales, militares o particulares. Para la localización temporal y espacial de estos fenómenos se han desarrollado diversas aplicaciones *Mcidas* que hacen uso de variables obtenidas en formato de rejilla, directamente o mediante *postproceso*, de modelos de predicción numérica. Estas herramientas son presentadas en esta exposición, ilustrando diversas situaciones ejemplo, mostrando en que forma pueden ser de utilidad a los *predictores* y haciendo hincapié en sus limitaciones.

1. Introducción

Con la nueva disponibilidad de las estaciones *Mcidas* más potentes y que permiten el acceso a una gran diversidad de datos en un entorno distribuido y a la implantación del modelo *HIRLAM-INM*, que incorpora *parametrizaciones* mejoradas respecto al antiguo LAM-INM, resulta posible el desarrollo de herramientas útiles para la predicción cuasi-objetiva de fenómenos meteorológicos que tienen una especial incidencia en la navegación aérea, especialmente para la elaboración de Cartografías de Tiempo Significativo. Como es sabido, en este tipo de productos se integran de forma simbólica las predicciones de fenómenos y variables meteorológicas para un área geográfica, un espesor vertical y una ventana temporal prefijados. Han de incluir, entonces, su ocurrencia, su distribución horizontal y vertical, y una evaluación de su intensidad.

Algunos de estos fenómenos, como el engelamiento, la lluvia *engelante*, la turbulencia más general y la turbulencia asociada a ondas orográficas, son específicos de este tipo de productos. Su escala puede ser considerada en dos niveles, la de los agentes que crean un ambiente apropiado a su aparición, y la del evento en sí. Mientras la primera suele ser sinóptica, la última se mueve entre la *mesoscala* y la *microescala*. En definitiva se pueden utilizar rasgos de la escala superior para la obtención de índices, aunque la verificación de su bondad resulta muy difícil pues se disponen de escasas observaciones o informes. Por ello, el objetivo de estas herramientas se limita actualmente a dirigir la atención del *predictor* sobre zonas en las que coinciden los ingredientes que favorecen su aparición.

2. Herramientas

De los diversos fenómenos de interés citados anteriormente, nos limitaremos seguidamente al tratamiento de tres de ellos: Turbulencia, turbulencia en ondas orográficas y engelamiento.

2.1 Predicción de turbulencia en niveles medios y bajos

La forma más común de evaluar la turbulencia es estimando su energía cinética. La mayor parte de los modelos de predicción numérica han de manejarla para considerar la cantidad de energía cinética del movimiento atmosférico que se disipa a escalas sub-rejilla pues de otro modo el modelo se puede convertir en inestable.

La energía cinética turbulenta (TKE) se define como la energía cinética debida a las fluctuaciones de la velocidad respecto del movimiento medio. La ecuación de equilibrio que gobierna su existencia presenta la siguiente forma:

$$\text{TKE} = \text{TT} + \text{TM} + \text{XT} + \text{XP} + \text{D} \quad (1)$$

Siendo

- TT.- Energía cinética turbulenta de origen térmico asociada a la flotabilidad.
- TM.- Energía cinética turbulenta de origen mecánico asociada a la cizalladura.
- XT.- Energía cinética turbulenta transportada verticalmente por la propia turbulencia.
- XP.- Energía cinética turbulenta transportada por perturbaciones de presión.
- D.- Energía cinética turbulenta perdida por disipación molecular.

Dentro de la capa límite planetaria las fuentes principales de TKE son la inestabilidad o presencia de grandes gradientes verticales de temperatura, la insolación y la existencia de fuertes vientos perturbados por los obstáculos de la superficie terrestre; en suma, la turbulencia térmica originada por flotabilidad y la mecánica asociada a *cizalladura*. Esta energía cinética puede ser transportada a otros niveles y finalmente se disipa por fricción molecular con una velocidad proporcional a $TKE^{3/2}$. (McCann, 1999).

El valor del parámetro TKE diagnosticado por el modelo HIRLAM-INM (Cuxart, 1999) para cada momento y nivel puede ser utilizado directamente por el *predictor*, con las siguientes precauciones:

- 1) Únicamente se dispone del valor de la variable interpolado desde los niveles del modelo a los niveles principales de presión, con las consiguientes limitaciones de resolución y con la peculiaridad añadida de que dada la resolución de la orografía del modelo, se presentan valores de TKE por debajo del suelo. (Figura 1)
- 2) En la capa límite planetaria, la componente térmica suele ser dominante sobre la mecánica, como puede observarse comparando la turbulencia prevista en el nivel de 925 hPa o en el de 850 Hpa para la madrugada con la correspondiente a las 15 horas, en que podemos suponer que se ha alcanzado la temperatura máxima del suelo, y por tanto del gradiente térmico vertical. (Figuras 2 y 3)
- 3) Queda pendiente realizar un seguimiento próximo de la respuesta orográfica a las configuraciones sinópticas de viento en superficie, es decir el establecimiento de una "climatología dinámica" del parámetro. Además no se dispone de información de retorno que pueda servir para establecer correlaciones y umbrales de intensidad.

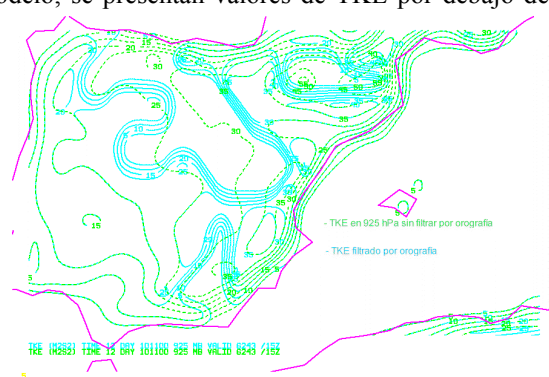


Figura 1: Problemas de interpolación de TKE en las proximidades de la superficie.

El uso de este parámetro no queda limitado a la Capa Límite Planetaria, pues toma también valores notables en niveles superiores cuando existen fuentes turbulentas, asociadas generalmente a números de Richardson bajos, o lo que es lo mismo, a zonas de *cizalladura* en entornos estables (Frecuencias de Vaissala altas).

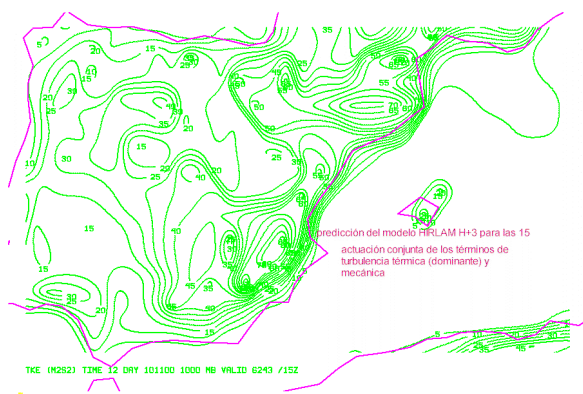


Figura 2: Campo de TKE en 925 hPa a las 15 UTC (Máximo calentamiento del suelo)

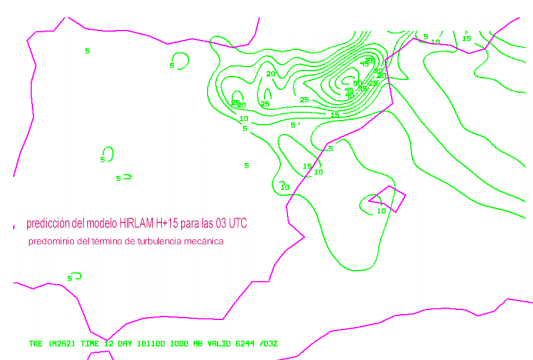


Figura 3: Campo de TKE en 925 hPa a las 03 UTC (turbulencia mecánica)

2.2 Predicción de turbulencia asociada a ondas orográficas

La turbulencia asociada a ondas de montaña puede ser tan intensa como la encontrada en las corrientes ascendentes de tormentas activas (se han llegado a medir aceleraciones del orden de seis veces la de la gravedad). Como es sabido, la onda se desarrolla cuando el flujo de aire remonta una cadena montañosa en una atmósfera con

estratificación estable. Estas ondas son similares a las olas oceánicas en el sentido de que en ambas es la fuerza de la gravedad la fuerza restauradora; concretamente en nuestro caso la fuerza *arquimediana* de flotabilidad. En la atmósfera la onda se propaga internamente con un eje de fase constante inclinado sobre el suelo (Holton, 1995). Las condiciones de estabilidad, intensidad del viento y dimensiones del obstáculo orográfico determinan las características de la onda. Cuando en su propagación alcanza regiones en que se vuelve inestable (el número de Richardson es inferior a 0.25) rompe en remolinos turbulentos. En general siempre existirá turbulencia en niveles bajos a sotavento de la cordillera, dependiendo su intensidad de las condiciones de estabilidad (números de Richardson y de Froude), de la intensidad del viento y de las características de la orografía (número de ondas de la perturbación y velocidades verticales inducidas).

El programa *Mcidas* desarrollado para la diagnosis objetiva de onda de montaña se basa en el método propuesto por Donald Mcann, del Experimental Forecast Facility (EFF) del Aviation Weather Center estadounidense, aún en fase de experimentación. Su método caracteriza una onda por su intensidad, dada por el índice

$$MWAVE = N*U*h, \quad (2)$$

y por su malignidad o tendencia a romper en torbellinos, determinada por

$$N*h/U \quad (3)$$

En las expresiones anteriores, N es la frecuencia de Brunt-Vaissala, h la dimensión vertical del obstáculo y U la componente del viento horizontal perpendicular al eje de la cadena montañosa.

En la adaptación, los parámetros originales: perfiles de viento, estabilidad y altura de la montaña, se han conservado parcialmente, considerando la estabilidad como el aumento en la vertical de la temperatura potencial y sustituyendo la altura por las pendientes orográficas. Para la consideración de la coordenada vertical se ha trabajado con los valores en los niveles de 1000, 925, 850 y 700 hPa, que son los actualmente disponibles en las estaciones de trabajo.

Dado que la resolución horizontal y su correspondencia vertical han de ser más altas que las que proporciona el modelo HIRLAM, se ha recurrido a una serie de artificios que se citan a continuación:

- 1) Se ha calculado una rejilla orográfica en resolución **0.1°** a partir de una orografía digitalizada, mediante el comando *Mcidas* **IMGGRD** cubriendo nuestro área de interés.
- 2) Las variables del modelo se han trasladado a esta rejilla transformando sucesivamente el *grid* original en imagen y recuperando seguidamente el formato de *grid*, ya coincidente geográficamente con el de la orografía.
- 3) Los gradientes verticales se han calculado considerando variaciones lineales entre niveles tipo.
- 4) Dado que la onda de montaña se produce cuando coincide un fuerte viento perpendicular a la cadena, se ha evaluado el producto escalar de los vectores viento y pendiente orográfica.
- 5) Se ha impuesto el criterio de que en la zona de ocurrencia existan fuertes corrientes verticales inducidas tanto a barlovento como a sotavento, filtrando posteriormente la zona de barlovento.

La presentación de los dos índices se hace de forma conjunta utilizando una salida como imagen realizada para el índice de onda de montaña y contorneando sobre ella el campo de *malignidad* o tendencia de la onda a romper. En cuanto al espesor vertical afectado, queda de momento indeterminado. En la Figura 4 se puede observar la diagnosis objetiva de onda de montaña a sotavento de los Pirineos durante una situación de vientos del N.

En la Figura 5 se incluyen las líneas de nivel de la orografía utilizada, expresada en hectopiés, junto con el diagnóstico de onda de montaña, pudiendo observarse claramente que está situada en la vertiente sur de los Pirineos y de la oriental de la cordillera costero-catalana, coincidiendo con una situación de vientos del norte. En la Figura 6 se ha representado el campo de vientos en 700 hPa previsto por el modelo HIRLAM para la misma hora 00 UTC del 11 de abril de 2001).

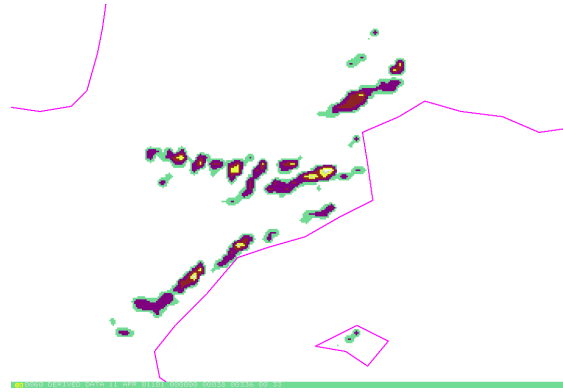


Figura 4: Índice de Onda de Montaña durante una situación de vientos del N

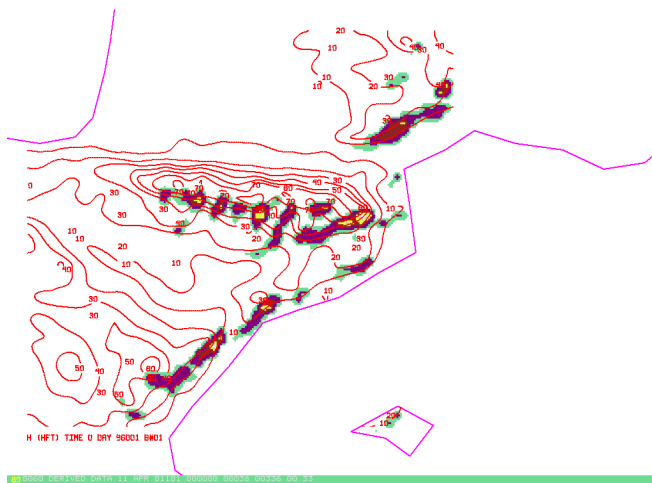


Figura 5: El índice de Onda de Montaña relacionado con la orografía

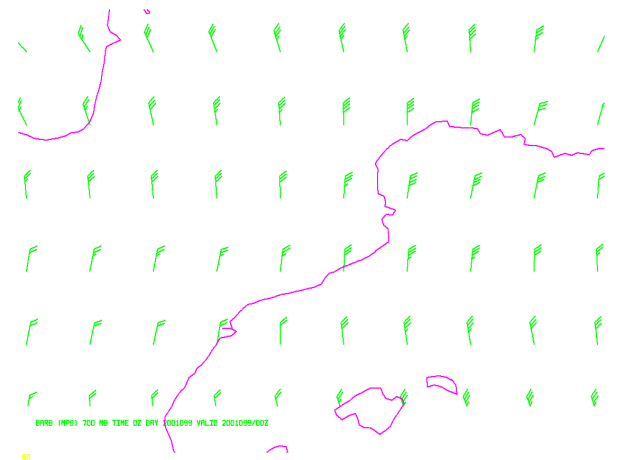


Figura 6: Campo de vientos en 700 hPa

Finalmente en la Figura 7 se ha contorneado el valor del índice correspondiente a la tendencia de la onda a romper en torbellinos.

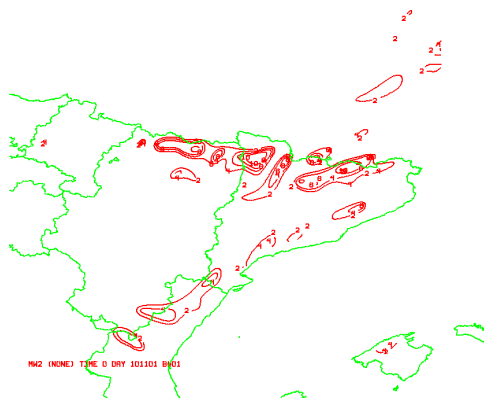


Figura 7: Tendencia turbulenta de la Onda de Montaña

2.3 Predicción de engelamiento

En todos los modelos numéricos de predicción han de tenerse en cuenta los fenómenos de condensación, a través de una *parametrización*. En el modelo *HIRLAM* el esquema utilizado es el de Sundqvist, que tiene en cuenta los procesos de condensación convectiva, a gran escala y la microfísica de la condensación. De este modo la

cantidad de agua en nube (CLWC.- *Cloud Liquid Water Content*) es una variable de pronóstico del modelo y es calculada para cada periodo de predicción en cada punto de rejilla.

Los ingredientes esenciales para la ocurrencia de engelamiento sobre aeronaves son:

- Alto contenido de agua líquida en nube.
- Temperaturas por debajo de 0° C y no inferiores a -12° C (este dato proviene de estudios y observaciones y por tanto ha de considerarse como meramente empírico).
- Diámetro de las gotas *subenfriadas* grande.

De ellos los dos primeros son los más importantes y afortunadamente los más fáciles de evaluar. Con los campos de CLWC y T previstos por el modelo *HIRLAM* se ha elaborado un programa que representa la coexistencia de las dos condiciones para distintos niveles. El uso en *Mcidas* se efectúa mediante el programa *ENGEL.MCB* y la presentación se realiza de forma *panelada* en dos gráficos, que abarcan los niveles de vuelo interpolados desde 030 a 180. A alturas superiores la CLWC es escasa y las temperaturas lo suficientemente bajas para que el

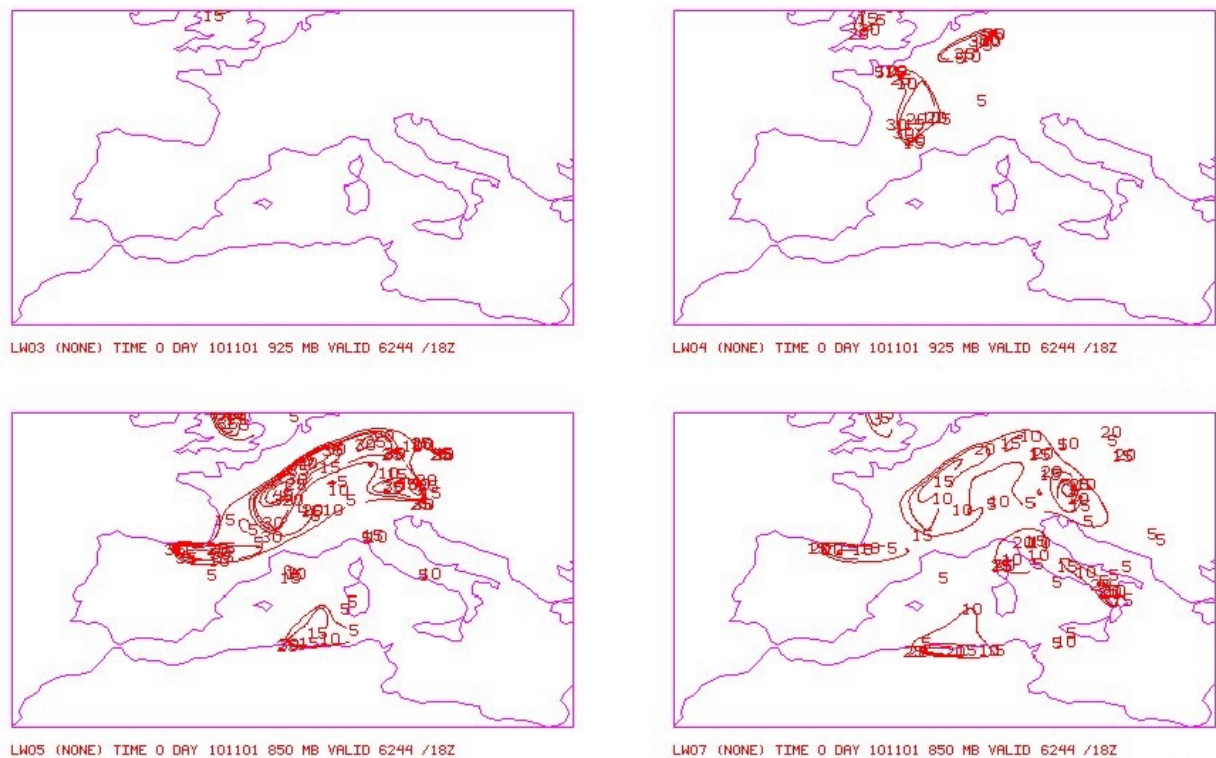


Figura 8: Panel de zonas prevista de engelamiento

engelamiento, de aparecer, lo haga en la forma menos peligrosa de hielo granuloso. En la Figura 8 se presenta el panel correspondiente a los niveles inferiores.

Este procedimiento se pretende modificar próximamente combinando las condiciones previstas de agua subenfriada con la presencia de corrientes ascendentes significativas, obtenidas directamente del modelo o diagnosticadas indirectamente por continuidad.

3. Conclusiones

Aunque difíciles de verificar, es posible desarrollar índices o estimaciones que proporcionen una idea de la presencia de estos fenómenos que pueden llegar a constituir un serio riesgo para la navegación aérea. El hecho de obtenerse de forma objetiva puede tomarse como un paso inicial para la elaboración automática de este tipo de productos, tal y como ya se hace en muchos países.

Referencias

- Holton, James R., 1979. Introducción a la Meteorología Dinámica. (INM).
- Donald W. McCann, 1999. A simple Turbulent Kinetic Energy equation and aircraft Boundary Layer Turbulence. National Weather Digest.
- Donald W. McCann . MWAVE: A Mountain Wave Diagnostic. AWC Test Products Website.
- Marcia Politovitch. Forecasting Aviation Icing: Icing type and severity. Modulos COMET de formación meteorológica.
- P. F. Lester et al., 1974. Lower Turbulent Zones with Mountain Lee Waves. Journal of Applied Meteorology.
- D.K. Lilly, 1978. A Severe Downslope Windstorm and Aircraft Turbulence Event Induced by a Mountain Wave. Journal of the Atmospheric Sciences.
- J.B. Klemp and D.K. Lilly, 1978. Numerical Simulation of Hydrostatic Mountain Wave. Journal of the Atmospheric Sciences.
- J. Cuxart, 1999. IV Simposio Nacional de Predicción del Instituto Nacional de Meteorología.