

# VIENTOS MUY FUERTES GENERADOS POR ONDAS GRAVITATORIAS. ESTUDIO DEL CASO DE 2 DE MARZO DE 2001

José María Sánchez-Laulhé Ollero  
Fausto Polvorinos Pascual

CMT en Andalucía Oriental y Melilla. INM

## RESUMEN

En las horas centrales del 2 de Marzo de 2001 se produjeron vientos muy fuertes en la costa de Málaga, con rachas que sobrepasaron en algunos observatorios los 100 km/h, y que acompañaban a una banda nubosa en forma de arco con convección poco profunda, que partiendo del oeste del Estrecho barrió la provincia de Málaga, adentrándose con vientos menos intensos en la provincia de Granada. La banda estaba muy bien definida en las imágenes del radar de Málaga. En las estaciones automáticas su paso se apreció con un máximo de viento que iba acompañado de un pico en la presión. La explicación que se da a este fenómeno es la existencia de una onda gravitatoria atrapada desplazándose horizontalmente con una velocidad de fase cercana a la velocidad de los fuertes vientos de la capa condicionalmente inestable, llevando vientos bajo la cresta de la onda superiores a la de la velocidad de fase.

## 1. Introducción

Durante el 2 de Marzo de 2001 se produjeron rachas de vientos muy fuertes en muchos puntos de Andalucía Oriental, destacando 117 km/h en Jaén capital. Estos vientos estaban provocados por una situación sinóptica de fuertes vientos del SW. El momento en el que se manifestaron estas rachas y el mecanismo que las generó fue distinto en unos casos que en otros. Particularmente interesante fue el desarrollo de vientos muy fuertes en las costas de Málaga en las horas centrales del día, con rachas que llegaron a 104 km/h en el aeropuerto de Málaga, y que acompañaban a una banda nubosa en forma de arco con precipitaciones que partiendo del oeste del Estrecho, barrió la provincia de Málaga adentrándose con vientos menos intensos en la provincia de Granada. Esta banda estaba particularmente definida en las imágenes radar, y a su paso por los distintos observatorios estuvo marcado por picos de viento en fase con la presión.

En este artículo se considera que el origen del fenómeno es una onda gravitatoria atrapada en los niveles bajos. En el apartado 2 se describen la situación sinóptica y las observaciones, en el apartado 3 se comentan las imágenes de satélite y radar, y en el 4 la interpretación y el apoyo teórico.

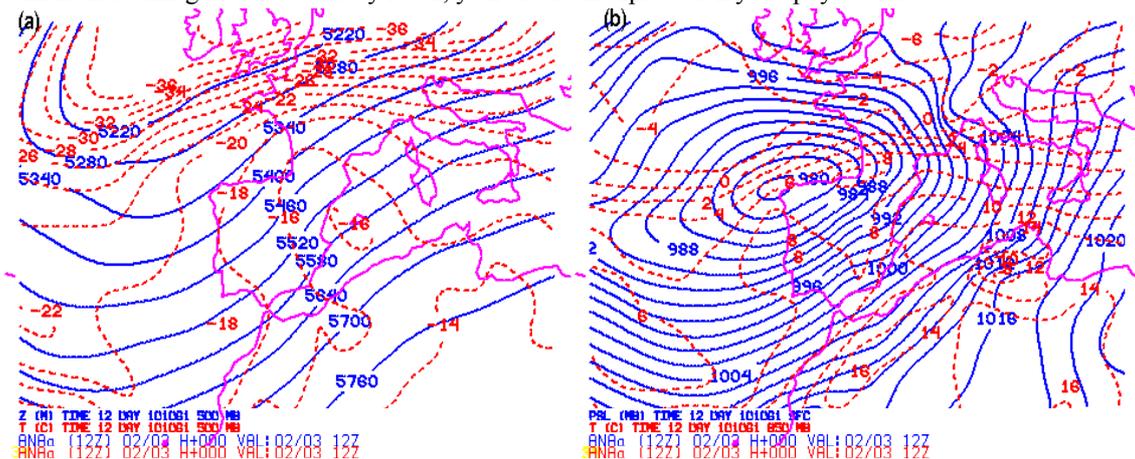


Figura 1: Análisis del HIRLAM del INM de las 12 UTC del día 2 de marzo de 2001; (a) geopotencial y temperatura en 500 hPa; (b) presión a nivel del mar y temperatura en 850

## 2. Situación sinóptica y observaciones

### 2.1 Descripción sinóptica

Los análisis de 500 hPa (figura 1a) y niveles bajos: presión en superficie y temperatura en 850 hPa (figura 2b) de las 12 UTC del día 2 de HIRLAM del INM muestran que la zona estaba bajo la corriente en chorro con una dorsal en altura con eje según la cordillera ibérica y el resto de la península bajo una vaguada. En superficie había un fuerte gradiente de presión y un frente frío estaba sobrepasando Alborán.

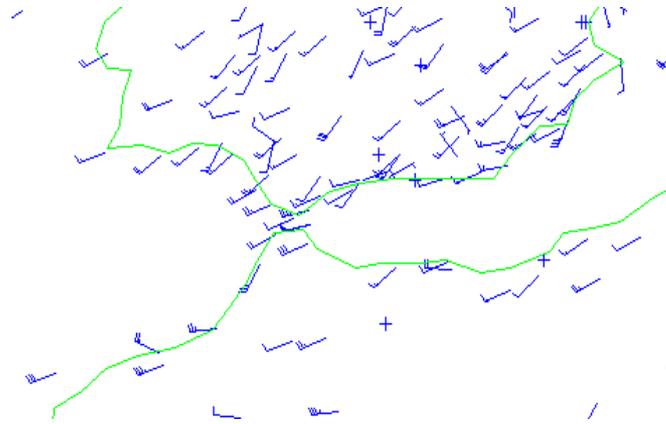


Figura 2: Vientos en superficie a las 12 UTC

## 2.2 Observaciones en superficie

Las observaciones de viento en superficie de las 12 UTC se muestran en la figura 2. En las estaciones automáticas como la del CMT el máximo de viento coincidió con un pico en la presión (13:30, señalado ambos con M en la figura 3).

Previamente se pueden observar otros picos de vientos menores que parecían ligados también al paso de otras pequeñas bandas nubosas que tenían su correspondiente pico en la presión

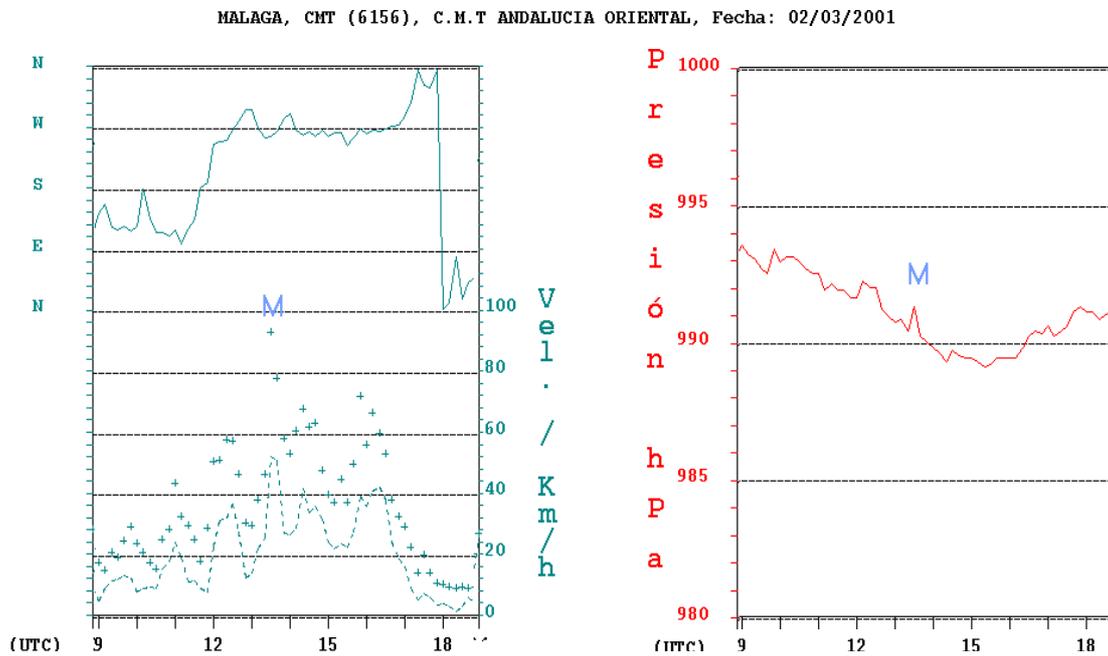


Figura 3: Viento y presión en el CMT de Andalucía Oriental en Málaga

## 2.3 Observaciones en altura

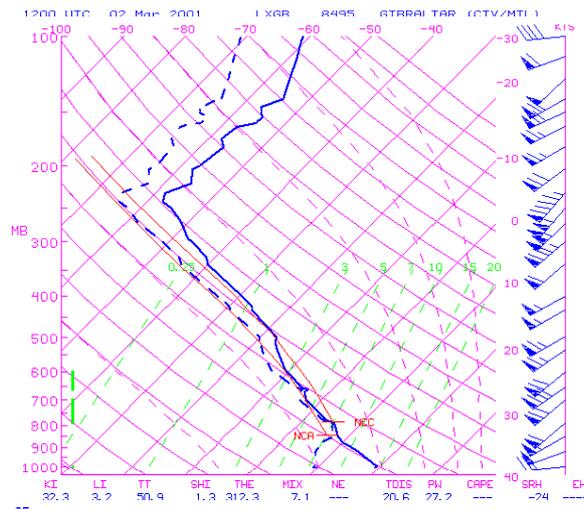


Figura 4: Sondeo de Gibraltar de las 12 UTC del 2 de marzo de 2001

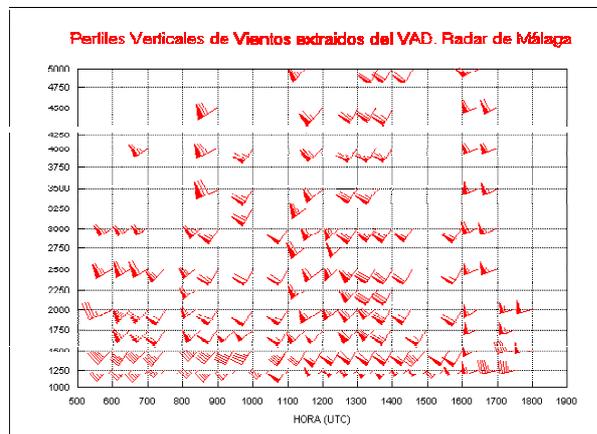


Figura 5: Vientos VAD en nudos del radar de Málaga del 2 de marzo de 2001

Las imágenes de viento Doppler del radar de Málaga (PPI), situado a 1160 m sobre el mar, y los datos VAD (mostrados en nudos en la figura 5) constatan la presencia de vientos muy fuertes de WSW. El sondeo de las 12 UTC de Gibraltar muestra la presencia del chorro con viento máximo de 109 kt a 265 hPa y otro máximo secundario 652 hPa de 82 kt (figura 4).

### 3. Imágenes

#### 3.1 Imágenes de radar

La perturbación está muy bien definida en las imágenes de reflectividad máxima (ZMAX) del radar de Málaga (figura 6). Los valores de reflectividad no son altos, lo que indica ausencia de convección severa. En cuanto a los rayos se observa un predominio de los rayos positivos, lo cual parece bastante coherente con la fuerte cizalladura vertical, salvo en la entrada de la banda por el oeste del Estrecho y cuando se introduce hacia tierra adentro en la provincia de Granada. (los rayos están trazados sobre las imágenes de ZMAX en intervalos de 10 minutos centrados en la hora de la imagen).

#### 3.2 Imágenes de satélite

La banda nubosa se interrumpe sobre Alborán pero parece continuar por Marruecos como se puede apreciar en la imagen visible de las 13:00, en la que se ha trazado una línea amarilla sobre el arco nuboso (figura 7). Por otra parte es de resaltar la diferencia de nubosidad entre la costa norte y el resto de Alborán.

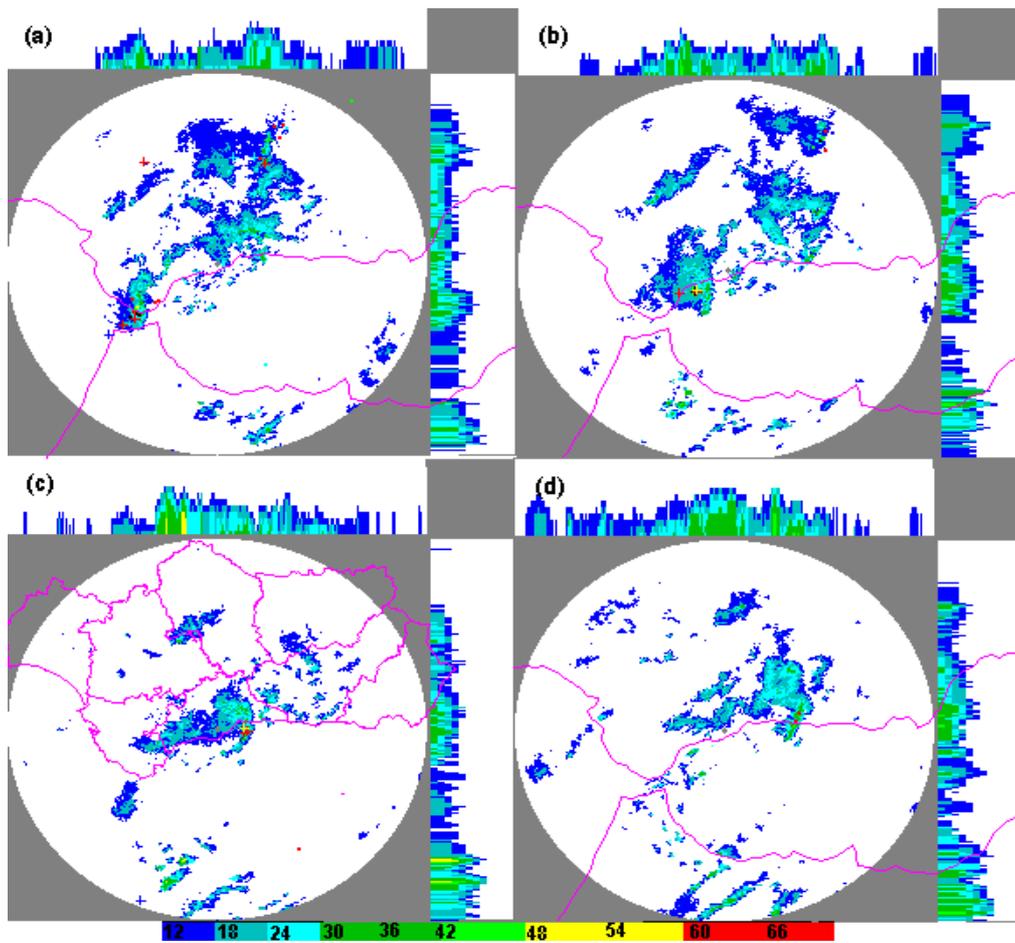


Figura 6: Imágenes de reflectividad máxima del radar de Málaga (a) 12:30 UTC; (b) 13:00 UTC; (c) 13:30 UTC; (d) 14:00 UTC. Sobre ellas se encuentran dibujados los rayos en 10 minutos centrados en la hora de la imagen.

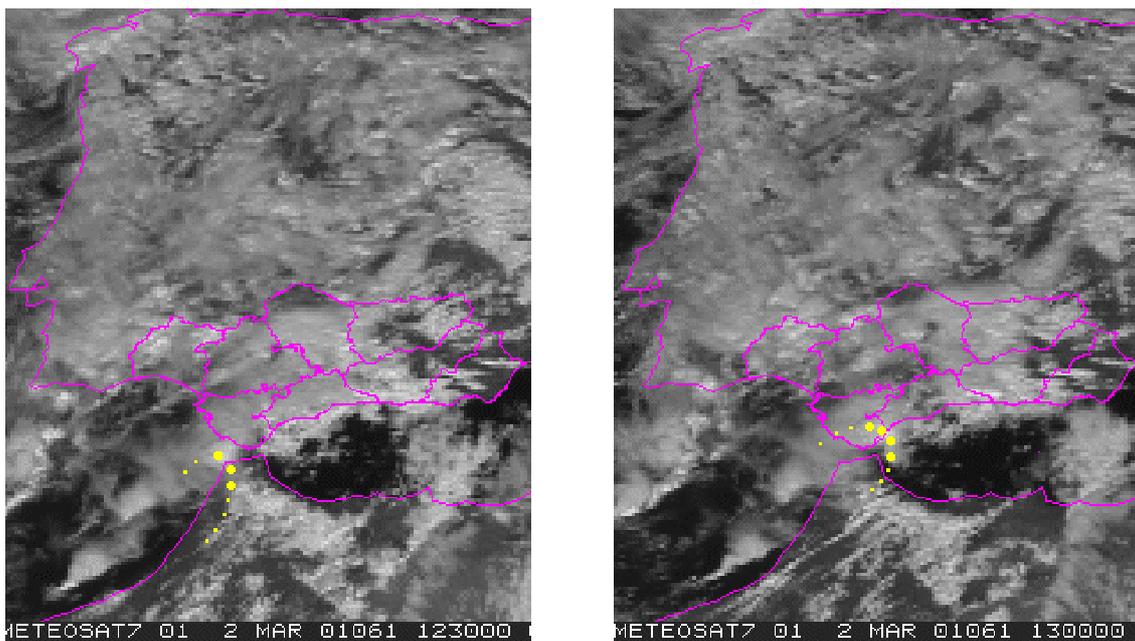


Figura 7: Imágenes visibles Meteosat de 12:30 y 13:00 UTC

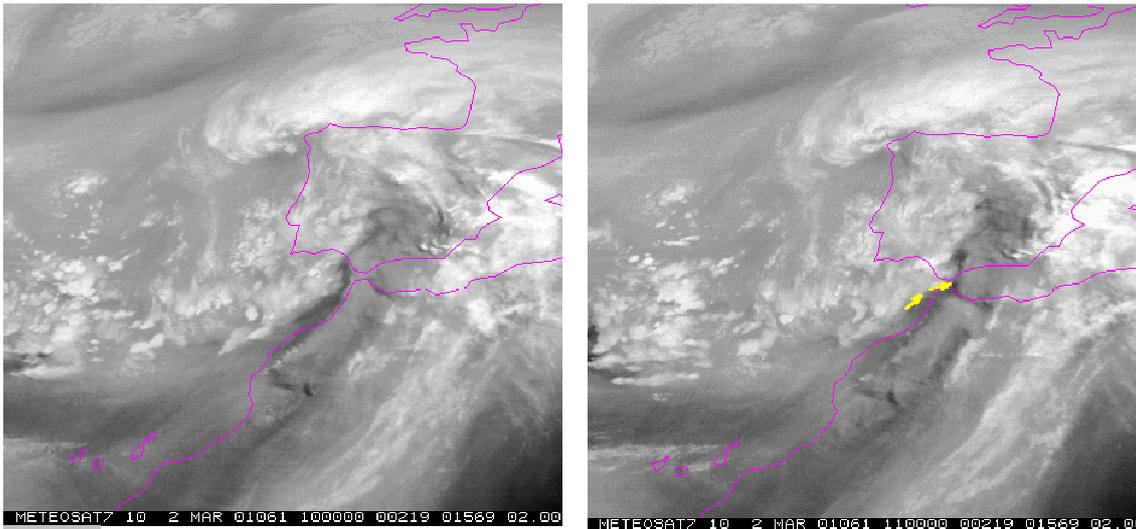


Figura 8: Imágenes de vapor de agua de 10:00 y 11:00 UTC del 2 de Marzo.

La imagen de WV de 10 UTC (figura 8) muestra una banda oscura producida por la llegada de un máximo de viento de la corriente en chorro a las costas atlánticas de Marruecos (señalado en amarillo). En la imagen de las 11:00 (figura 8) se observa que el máximo de viento gira anticiclónicamente, al menos en los niveles medios de la troposfera, al pasar sobre el Estrecho por efecto orográfico (vorticidad anticiclónica propia del paso de barreras orográficas con número de Rossby intermedio,  $Ro = O[1]$ , Pierrehumbert, 1986). La corriente en chorro marca una diferencia de masas de aire en altura, fría e inestable al norte y cálida y más estable al sur, lo que hace que el sondeo del Gibraltar sea poco representativo de Alborán.

#### 4. Explicación del fenómeno

##### 4.1 Generación de las ondas

La llegada de un máximo de viento es una situación apropiada para la generación de ondas gravitatorias. La presencia de la zona de salida de un máximo de viento produce un desacople de los campos de masa y viento que da origen a ondas gravitatorias cuyo papel sería el restituir el ajuste geostrofico. Este desajuste puede aumentarlo la orografía, en este caso la zona montañosa próxima al Estrecho. Aunque el origen de la onda que dio lugar a los vientos muy fuertes no está clara, parece por las imágenes de satélite que se origina en la costa atlántica de Marruecos y que se desplaza por la costa hacia el Estrecho donde toma dirección E, como se puede ver en las imágenes visibles de la figura 7 en las que la nubosidad asociada se ha señalado con línea de puntos amarilla.

##### 4.2 Propagación de las ondas

Como la densidad del aire decrece con la altura, las ondas de gravedad tienden a desplazarse verticalmente y su energía se pierde hacia la atmósfera superior. Sin embargo R.Lindzen y K.-K. Tung demostraron que una capa estable con una serie de condiciones, puede actuar como un conducto y reflejar las ondas que se propagan hacia arriba, de forma que esas ondas de gravedad puedan viajar lejos de su fuente con menor pérdida de energía: La atmósfera por encima de la capa estable debe ser al menos condicionalmente inestable, y, dentro de esta capa condicional, debe existir un nivel crítico donde la velocidad del viento iguale a la velocidad de fase de las ondas gravitatorias. La capa condicionalmente inestable debe tener un número de Richardson bajo (menor que 1) con alta cizalladura. Esta capa refleja fuertemente las perturbaciones gravitatorias con ondas más largas.

El sondeo de 11 UTC del día 2 no muestra dicha capa estable junto a superficie aunque sí una capa inestable por encima de 800 hPa. Sin embargo este sondeo no parece representativo de la masa sobre Alborán. El chorro en ese momento cruzando Gibraltar separa masas de aire diferentes, siendo la que hay sobre Alborán cálida. Sin embargo en niveles bajos el frente frío ya ha cruzado parte de Alborán lo que supone la presencia de una inversión en niveles bajos

Las imágenes visibles de las 11:30 muestran nubosidad con desarrollo en tierra y despejado en el mar con pequeñas bandas de nubes bajas próximas a la costa de Málaga. Esto parece confirmar la presencia de la inversión sobre el mar.

La zona oscura de las imágenes de vapor de agua de 12 UTC y 13:00 se extiende por Alborán indicando subsidencia, y las ondas gravitatorias más importantes ocurren al oeste de esta zona donde la inversión sube mientras subsiste una fuerte cizalladura del viento que ha girado en superficie a poniente y se hace más paralelo a la costa. Estas ondas pueden disparar la convección si su amplitud es suficientemente grande para que algunas parcelas de aire puedan alcanzar su NCL si existe por encima de la capa estable inestabilidad condicional.

### 4.3 Origen ondulatorio frente a origen convectivo

De los datos se desprende la existencia de vientos por encima de 100 km/h a poca altura, pero estos vientos son sensiblemente inferiores en superficie por efecto de rozamiento en la capa límite. La cuestión es por qué en un momento concreto y de forma propagante aparece en superficie con forma similar. Una explicación es la dada, la existencia de una onda gravitatoria que tiende a propagarse con una velocidad de fase cercana a la de los vientos de la capa condicionalmente inestable y que lleva vientos bajo su cresta superiores a la de la velocidad de fase (ver figura 9). Otra podría ser que los vientos fueran reflejo en superficie de los vientos en altura causado por las descendencias en las tormentas, pero esta explicación no respondería a la duración y a la extensión de la zona afectada por los vientos fuertes, además la convección es poco profunda sin capacidad de autoorganización y se entiende mejor como producto organizado por los movimientos verticales ascendentes generados por la onda

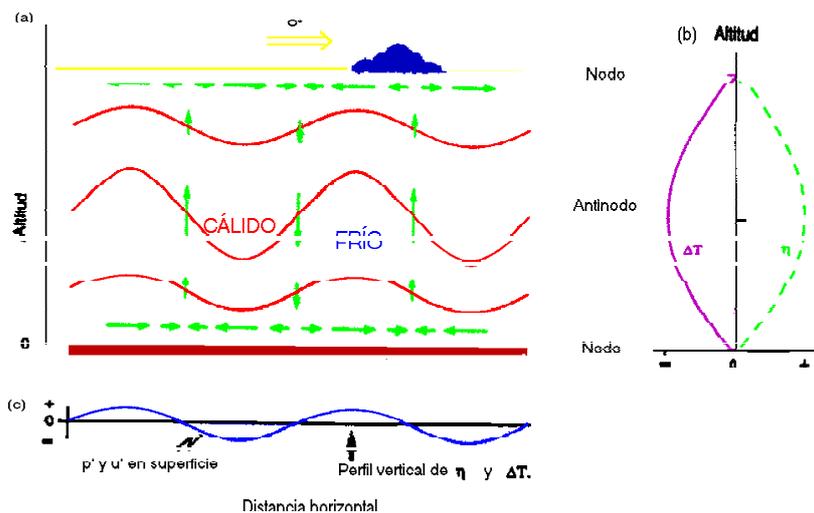


Figura 9: Esquema de una onda gravitatoria guiada con la mitad de una longitud de onda vertical contenida entre superficie y un nivel crítico. (a) Sección vertical en la dirección de la propagación de la onda, mostrando los vientos horizontales y verticales inducidos por la onda (verde), líneas de corriente o isentrópicas (rojo), y el nivel crítico (línea amarilla), para una onda que se propaga con velocidad de fase relativa al flujo  $C^*$  mayor que los vientos en la capa guía. (b) Perfiles verticales de desplazamiento vertical de la burbuja ( $\eta$ ) y cambio de T adiabático para la fase de la onda marcada en (c) por la flecha. (c) Perturbaciones de la presión en superficie  $p'$  y del viento en la dirección de propagación de la onda  $u'$  inducidos por la onda para el intervalo mostrado en (a). (S.E. Koch y C. O'Handley, 1997)

### 5. Conclusiones

Los vientos fuertes en la provincia de Málaga fueron un reflejo en superficie de los vientos existentes en altura causados por una onda gravitatoria que se generó en la zona de salida de un máximo de vientos. Cara a la predicción de estos fenómenos debe señalarse la presencia de:

- Vientos muy fuertes en niveles bajos
- Inestabilidad condicional por encima de una capa estable
- Aproximación de un máximo de viento en altura al Estrecho
- Bandas nubosas que se propagan rápidamente

- Subida y bajada rápida de presión acompañada con rachas de viento muy fuertes en fase en los registros de las estaciones automáticas

## **Referencias**

Hooke W.H. "Gravity Waves" Capítulo 12 de "Mesoscale Meteorology and Forecasting" editado por Peter S. Ray. AMS 1986.

Koch S.E., O'Handley C. "Operational Forecasting and Detection of Mesoscale Gravity Waves". Weather and Forecasting. Vol 12;253-281; 1997..

Koch S.E., Dorian P.B. "A mesoscale Gravity Wave Event Observed during CCOPE. Part III: Wave Environment and Probable Source Mechanisms". Monthly Weather Review. Vol 116; 2570-2592; 1988.

Lindzen, R.S., K.K. Tung. "Banded Convective Activity and Ducted Gravity Waves. Monthly Weather Review. Vol 104; 1602-1617; 1976.

Pierrehumbert, R. T.. "Lee Cyclogenesis" Capítulo 21 de "Mesoscale Meteorology and Forecasting" editado por Peter S. Ray. AMS 1986.