

La línea de turbonada de las inundaciones Málaga 13 noviembre 2024

JOSÉ MARÍA SÁNCHEZ-LAULHÉ

Las extraordinarias precipitaciones de Málaga del día 13 de noviembre de 2024 ocurrieron en el marco sinóptico de una depresión aislada, gota fría o *cutoff low*, que se puede calificar como dana (depresión aislada en niveles altos) dado su escaso reflejo en la circulación en niveles bajos. La reducida estabilidad vertical y la dinámica propias de una dana causaron precipitaciones en buena parte de la Península (figura 1). En este artículo se trata de indagar en las causas meteorológicas particulares que dieron lugar a las graves inundaciones Málaga ciudad y en la Axarquía, comarca del este de la provincia (ver descargas eléctricas en la figura 5c).

Precipitación (mm) entre las 00:10UTC del día 13/11/2024 y las 00:00UTC del día 14/11/2024

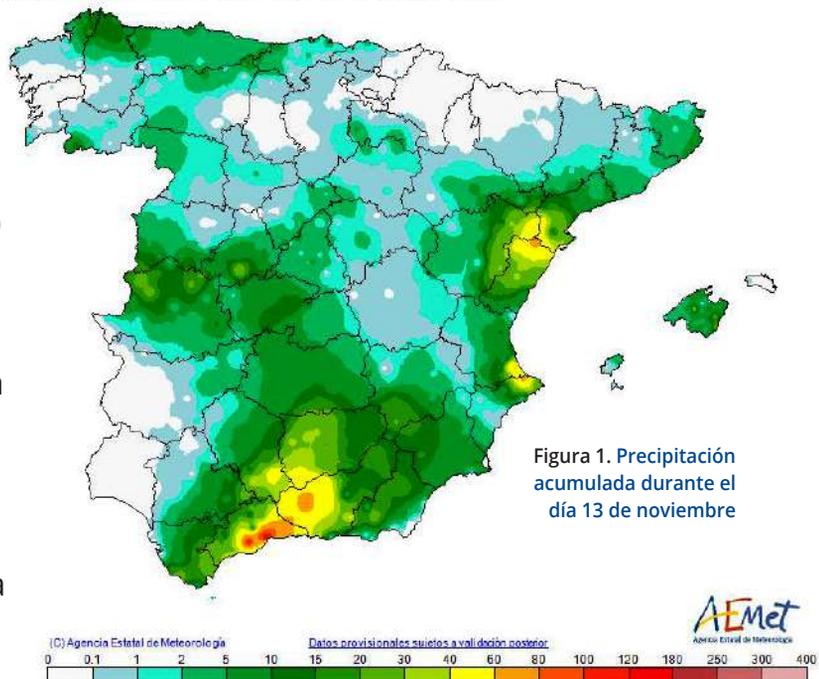


Figura 1. Precipitación acumulada durante el día 13 de noviembre

En la figura 2 se muestran los campos de altura de geopotencial y viento en 700 hPa y los de presión a nivel del mar y de viento a 10 m del análisis del día 13 a las 12 UTC del modelo HRES del ECMWF. Los centros ciclónicos de ambos niveles están claramente desplazados. Siguiendo el modelo conceptual de Hoskins *et al.* (1985) sobre la influencia de las anomalías de vorticidad potencial en la circulación atmosférica, el centro ciclónico en 700 hPa sobre el SO

de la Península (figura 2a) estaría inducido por la anomalía de vorticidad potencial en la tropopausa asociada a la dana, mientras las bajas presiones en superficie sobre el golfo de Cádiz, el mar de Alborán y Mediterráneo occidental (figura 2b), estarían inducidas por las temperaturas cálidas en la superficie del mar. En el oeste de Alborán el flujo sería convectivamente inestable al sobrevolar el aire relativamente seco, procedente del sudoeste en niveles medios, sobre el flujo húmedo en superficie.

La posición y desplazamiento hacia el oeste de la dana durante la tarde del día 13 se muestra claramente en las imágenes “masa de aire” de las 12, 14, 15 y 18 UTC del día 13 del satélite Meteosat segunda generación (MSG) con los colores rojizos característicos de su masa de aire polar con origen próximo a la estratosfera, rica en ozono y muy seca. En la zona de subsidencia del oeste de la dana se observan dos bandas especialmente oscuras características de pliegues de la tropopausa aso-

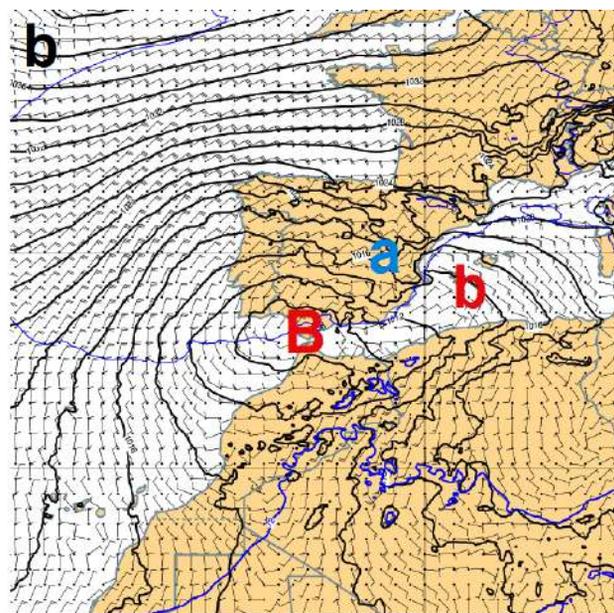
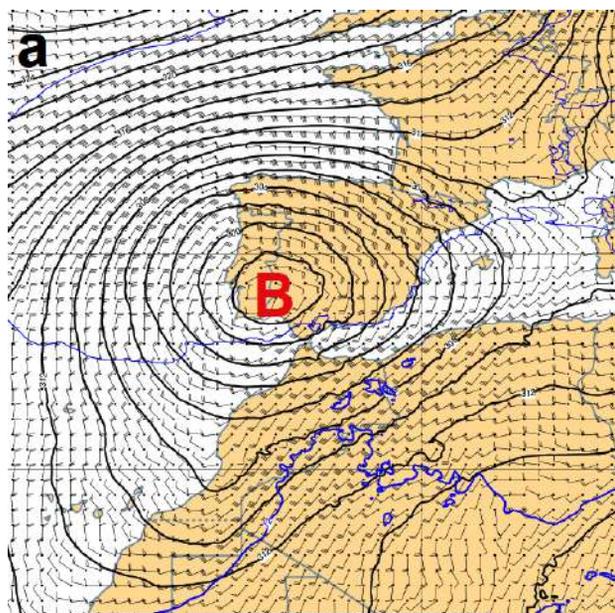


Figura 2. (a): viento y altura del geopotencial en 700 hPa (líneas de nivel en negro cada 20 m) y espesor 850/925 hPa (líneas azules cada 20 m); (b) presión a nivel del mar (isobaras en negro cada 2 hPa), viento a 10 m y espesores 850/925 hPa. Análisis del modelo operativo del ECMWF del 13 de noviembre de 2024 a las 12 UTC

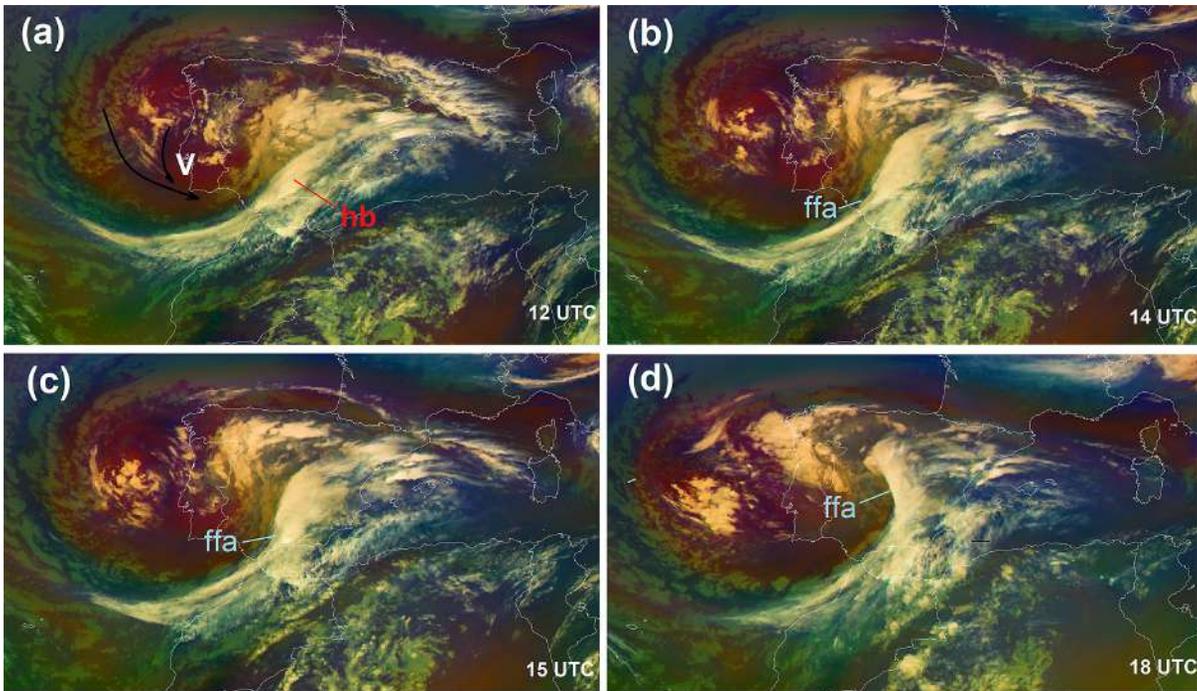


Figura 3. Imágenes RGB masa de aire del MSG de las: (a) 12 UTC, (b) 14 UTC, (c) 15 UTC y 18 UTC. V vórtice ciclónico de la dana; hb, hoja baroclina; ffa, frente frío en altura. Fuente: Eumetsat

ciados a máximos de viento en chorro en niveles altos, que está señaladas en la imagen de las 12 UTC (figura 3a) con las líneas negras acabadas en flecha, que confluyen cerca del cabo de San Vicente. En esta imagen también se observa, al sur de la dana, una banda de nubosidad alta sobre la masa tropical (color verde), que caracteriza la zona baroclina entre la masa tropical y la masa de aire polar de la dana. En la banda nubosa baroclina, se distingue una nubosidad en forma de hoja baroclina, marcada con "hb", típica de una frontogénesis. En las imágenes de la figura 3 se puede observar

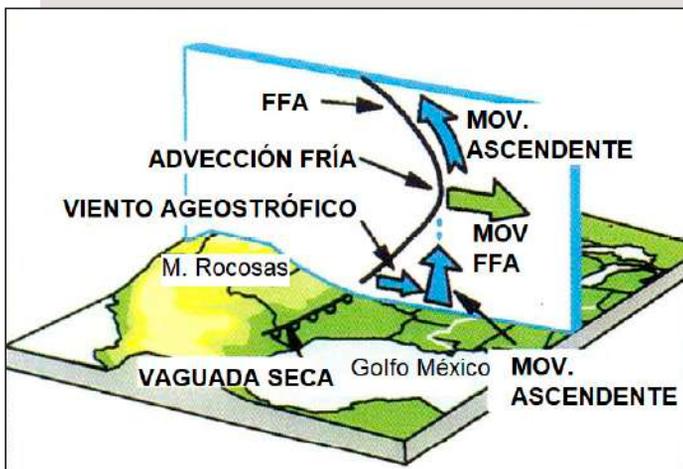
la desaparición de la nubosidad alta en la parte sur de la hoja baroclina, sobre la costa noroeste del mar de Alborán, asociada probablemente a la irrupción del aire seco del mencionado pliegue de la tropopausa, que llevó a la formación de un frente frío en altura (FFA), cuya evolución se indica en las figuras 3b, 3c y 3d. En la imagen de las 18 UTC el FFA ha adquirido dimensiones de frente sinóptico y un aspecto que recuerda una oclusión cálida. Esta frontogénesis fría y la inestabilidad convectiva sobre Alborán fueron claves en el desarrollo de la *squall line* o línea de turbonada (LT) que originó

las intensas precipitaciones de este día en Málaga. En la figura 4b, se pueden observar en la imagen "fase de nube" del Meteosat Tercera Generación (MTG) de las 14:30 las tormentas de la LT en la parte delantera del FFA esa hora.

Hay numerosos estudios que relacionan a la frontogénesis fría en altura con la generación muy severos de LT. Son situaciones en que se dispara la inestabilidad convectiva cuando un FFA con aire seco y frío sobrevuela una región con aire cálido y húmedo. En particular, el caso que nos ocupa es bastante similar a los de forma-

Líneas de turbonadas asociadas a frontogénesis en altura al este de las Montañas Rocosas

Las primeras investigaciones sobre eventos que produjeron precipitaciones invernales significativas en el medio oeste de los Estados Unidos sugirieron que la mayoría estaban asociados con frentes fríos en altura (FFA). Ya en Crawford (1950) se afirma que "una LT se desarrolla a lo largo del eje de una lengua cálida en 850 hPa después de que una advección fría en 700 hPa haya alcanzado y rebasado la parte delantera de la vaguada asociada a dicha lengua desplazándose más rápido que la lengua cálida", y que "no se habían observado líneas de inestabilidad (LT) prefrontales frías de importancia sobre los Estados del sudeste (de EE. UU.) sin la presencia una lengua cálida a 850 hPa y de una fuerte advección de aire frío en la parte delantera de la vaguada en 700 mb".



Estudios posteriores, como Hobbs *et al.* (1990) y Locatelli *et al.* (1995), mostraron que cuando un FFA avanza sobre una vaguada a sotavento de las Rocosas puede evolucionar a una estructura similar a una oclusión de tipo cálido, y si la vaguada de sotavento presenta una línea seca puede desarrollar una o varias LT: a medida que el FFA alcanza la parte oriental de la vaguada de sotavento, donde el aire se mueve hacia el norte, la circulación de tipo frontal cálido de la línea seca hace que se superponga aire cálido y seco (de baja temperatura potencial equivalente, θ_e), que desciende de las Montañas Rocosas, sobre el aire cálido y húmedo del golfo de México (de alta θ_e) en una región de pendiente ascendente con inestabilidad convectiva extrema propensa desarrollar LT).

El movimiento ascendente asociado al FFA, cuando ya se encuentra en la vaguada de sotavento, consta de dos partes: una superior, que está situada por delante y por encima del morro delantero del aire frío, que es la rama ascendente de la circulación térmicamente directa ligada a la frontogénesis, y otra inferior en la que el movimiento ascendente es consecuencia de los cambios rápidos en el gradiente de presión al paso por encima del morro del FFA. Este cambio produce vientos ageostróficos y convergencia a medida que las parcelas de aire se ajustan al gradiente de presión cambiante. Como resultado de estos ascensos, la masa de aire convectivamente inestable se eleva hasta la saturación, desencadenando la formación de una banda de lluvia convectiva del FFA.

Esquema del desarrollo de una LT al este de las Montañas Rocosas forzado por un frente frío en altura (adaptado de Hobbs *et al.*, 1995)

La línea de turbonada de las inundaciones Málaga 13 noviembre 2024

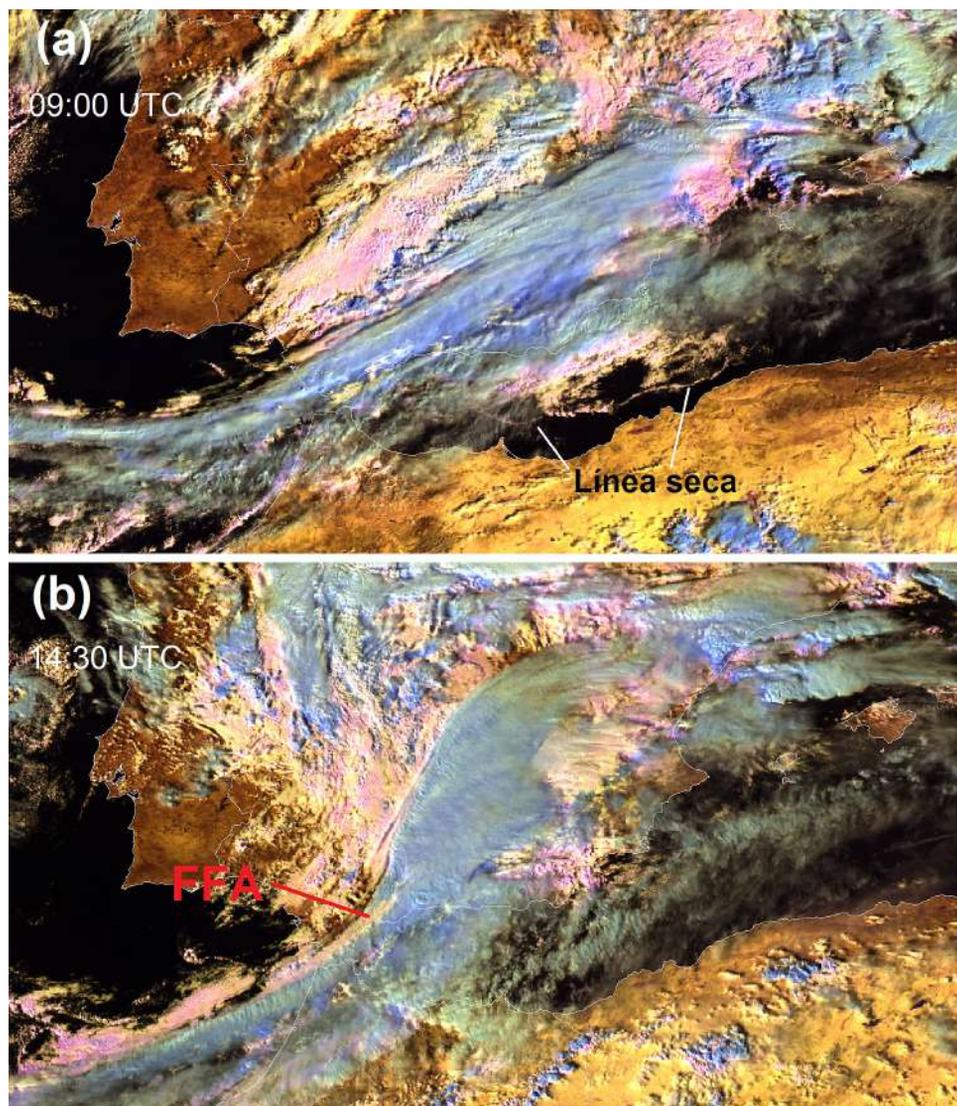


Figura 4. Imágenes RGB "fase de nubes" del MTG de las: (a) 09:00; señalada la nubosidad en cordel (rope cloud) de la línea seca (b) 14:30 UTC; trazado subjetivo de la intrusión de aire polar que dio lugar en su parte delantera al frente frío en altura. Fuente: Eumetsat

ción de LT prefrontales en el sector cálido de ciclones extratropicales al este de las Montañas Rocosas que se resumen en el cuadro de texto.

El paso de la línea de turbonada sobre la ciudad de Málaga

Las precipitaciones fueron muy intensas en la ciudad de Málaga, con máximo histórico de precipitación acumulada de 85.2 mm en una hora medido en la estación automática Málaga Puerto de AEMET. En la figura 5a se muestran las gráficas del día 13 de: la presión, la temperatura a 2 m, la humedad y el viento en la estación Málaga CMT de AEMET, en las que hay que destacar:

- La entrada del viento de levante a las 06:00 UTC coincide con un máximo relativo

de presión. Posteriormente la presión disminuye, acelerándose la caída de 10:00 a 11:00, producto de los movimientos ascendentes previos al paso del FFA. El mínimo de presión de las 11:00 fue seguido de un máximo alrededor de la 11:30. Esta subida de presión de algo más de 1.5 hPa, de 11:00 a 11:30, refleja el aumento de espesor del aire frío en altura tras el FFA.

- Intensificación del viento de levante hasta el comienzo de las precipitaciones intensas, a las 11:00 UTC, amainando bruscamente a flojos variables bruscamente a esa hora. El movimiento ascendente que genera las precipitaciones es consecuencia de los cambios rápidos en el gradiente de presión al paso por encima del morro de FFA. Este cambio produce vientos ageostróficos y convergencias a medida que las parcelas de aire se ajustan al gradiente de presión

cambiante (ver esquema del cuadro).

- La humedad relativa se mantuvo por debajo del 80 % entre 08:00 y 11:00 UTC, intervalo del viento de levante previo las precipitaciones, debido a que parte de la masa de aire del viento de levante junto a la costa procede de tierra. La humedad solo sube con las precipitaciones, lo que es indicativo de que el aire que alimenta la banda convectiva asociada al FFA se origina mar adentro por elevación hasta la saturación de un flujo del sur, como confirma el esquema de la circulación en niveles bajos interpretado a partir del producto "viento doppler" del radar de Málaga (figura 6).

- Cuatro horas de precipitación ininterrumpida entre las 11:00 y las 15:00 UTC, durante las cuales el aire en superficie se mantuvo saturado, y consiguientemente la actividad convectiva no produjo vientos fuertes en dicho periodo: a partir de las 11:00 los vientos no superaron los 11 km/h. Las máximas intensidades de precipitación ocurrieron al principio de este periodo, siendo 26 mm el máximo de precipitación acumulada en diez minutos (entre 11:21 y 11:30 UTC). Posteriormente la intensidad de precipitación tuvo una tendencia general decreciente. En la figura 5b se muestra el lento desplazamiento hacia el este de la reflectividad máxima medida por el radar de Málaga en las proximidades de esta ciudad de 11:00 a 13:20 UTC.

Interpretación a través de los mapas del modelo HRES del ECMWF

En este apartado analizamos la evolución a lo largo del día 13 por medio de los campos del modelo operativo HRES del ECMWF de las pasadas de las 00 (previstos para 03, 06 y 09 UTC) y de las 12 UTC (análisis y previstos para 15 y 18 UTC), que se muestran en la figura 7: presión a nivel del mar; espesores 600/925 hPa; espesores 850/925 hPa; intensidad de precipitación (columna izquierda), intensidad de precipitación de "gran escala" (columna de la derecha).

Durante las primeras horas del día se produjo un cambio del viento en niveles bajos a levante en Alborán asociado a la disminución de la presión a nivel del mar en la zona del Estrecho respecto al Mediterráneo occidental, y al giro a SO del flujo del en altura sobre el norte de Marruecos (figura 2).

El levante en Alborán en este caso fue la prolongación hacia el Estrecho de una

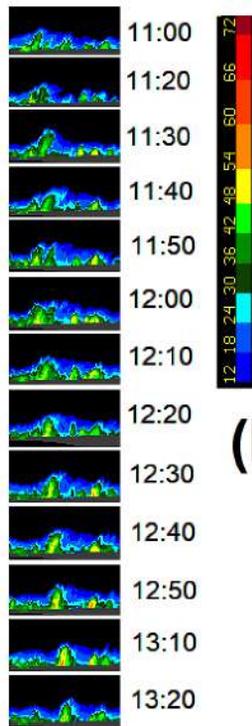
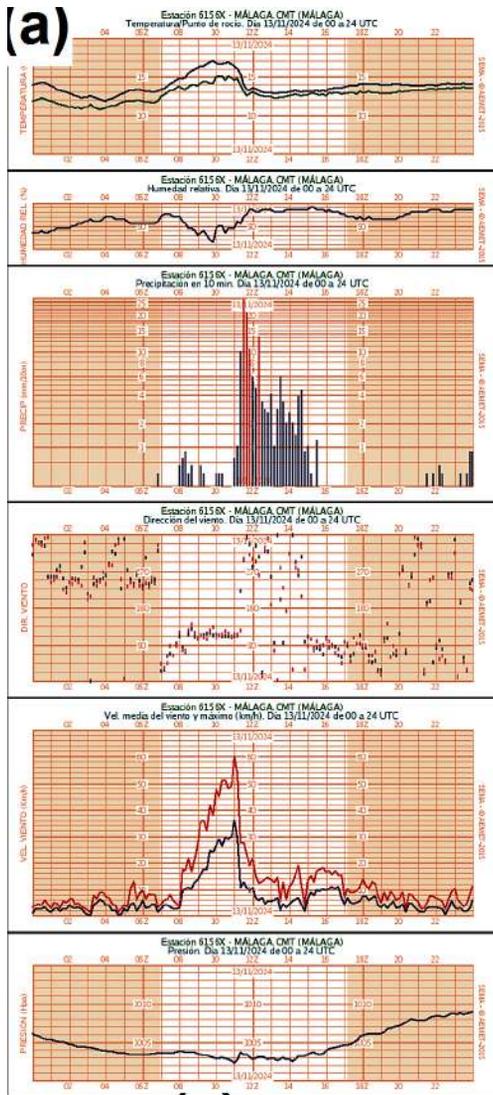
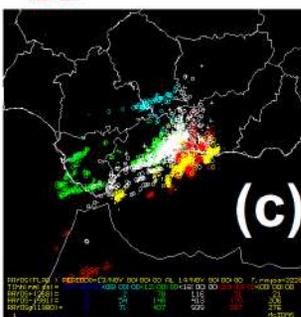


Figura 5. (a) Gráficas del día 13 de la estación automática Málaga CMT de AEMET de: presión, temperatura a 2 m, humedad y el viento; (b) perfil altura-longitud de la máxima reflectividad del radar de Málaga para las proximidades de Málaga ciudad de 11:00 a 13:20 UTC. La dimensión longitudinal de la ciudad está indicada por la raya roja; (c) descargas eléctricas durante el día 13 (+, rayo positivo; -, rayo negativo; o, rayo nube.+nube). Fuente: AEMET



la isobara de 1010 hPa (teniendo en cuenta que está bajando la presión en la zona), marcadas en grueso en color rosa y verde, respectivamente, en los mapas de la columna derecha de la figura 7. El rápido avance de la corriente fría costera se frenó en los estrechamientos del Estrecho propagándose hacia el sur, siguiendo las costa y envolviendo el aire más cálido en una vaguada de presión invertida, marcada con una "b" roja en los mapas previstos para las 09:00 UTC, que desde el este de Melilla se estira hacia la bahía de Málaga.

Por otra parte, en los mapas de las 09:00 UTC se observa sobre la provincia de Cádiz una dorsal en el campo de espesores de 600/925 hPa, con línea de espesor de 277 dam marcada a trazos en los mapas de la izquierda de la figura 7, asociada a la posición prevista del FFA, que se ha señalado con una línea blanca con triángulos.

Los campos del análisis de las 12:00 UTC muestran intensidades de precipitación "de gran escala" ¹ muy intensas, que indican el desarrollo de la línea de turbonada

corriente de aire de componente norte atrapada en la costa oriental de la Península que se aprecia en la figura 2b y que es relativamente frío al incorporar vientos catabáticos procedentes de tierra. El morro de esta corriente avanzó hacia el oeste de Alborán, alcanzando las proximidades del Estrecho sobre las 09:00 UTC. Dada la estrechez del mar de Alborán el flujo acaba ocupando prácticamente toda la anchura de este mar (se puede apreciar la línea seca que limita el flujo por el sur próxima a la costa sur de Alborán en la imagen de las 09:00 de la figura 4a) empujando hacia el oeste el aire más cálido que previamente existía en niveles bajos. El avance del levante se puede ver en el desplazamiento hacia el oeste de la línea de espesor 850/925 hPa de 70 dam o de

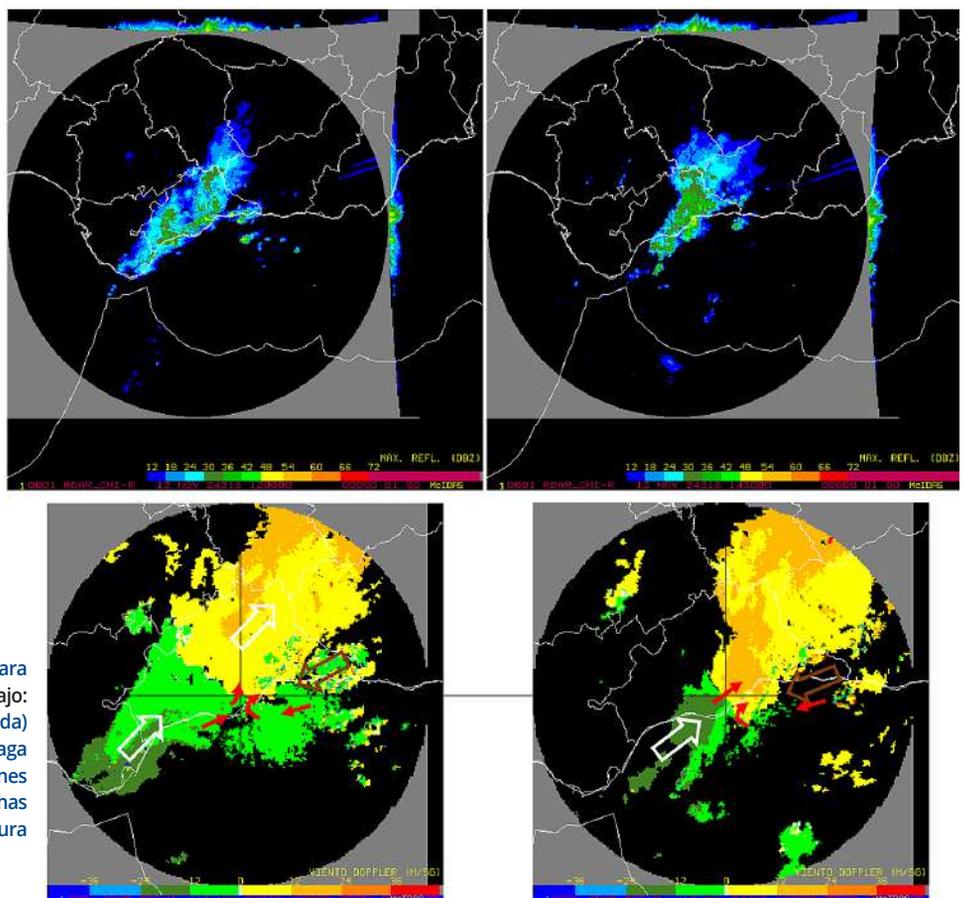


Figura 6. Arriba: imágenes reflectividad máxima para las 12:00 UTC (izquierda) y para las 14:30 UTC; abajo: imágenes viento doppler para las 12:00 UTC (izquierda) y para las 14:30 UTC, obtenidas por el radar Málaga de AEMET. Las flechas en rojo indican circulaciones deducidas próximas a la superficie. Las flechas contorneadas grandes indican vientos en altura

La línea de turbonada de las inundaciones Málaga 13 noviembre 2024

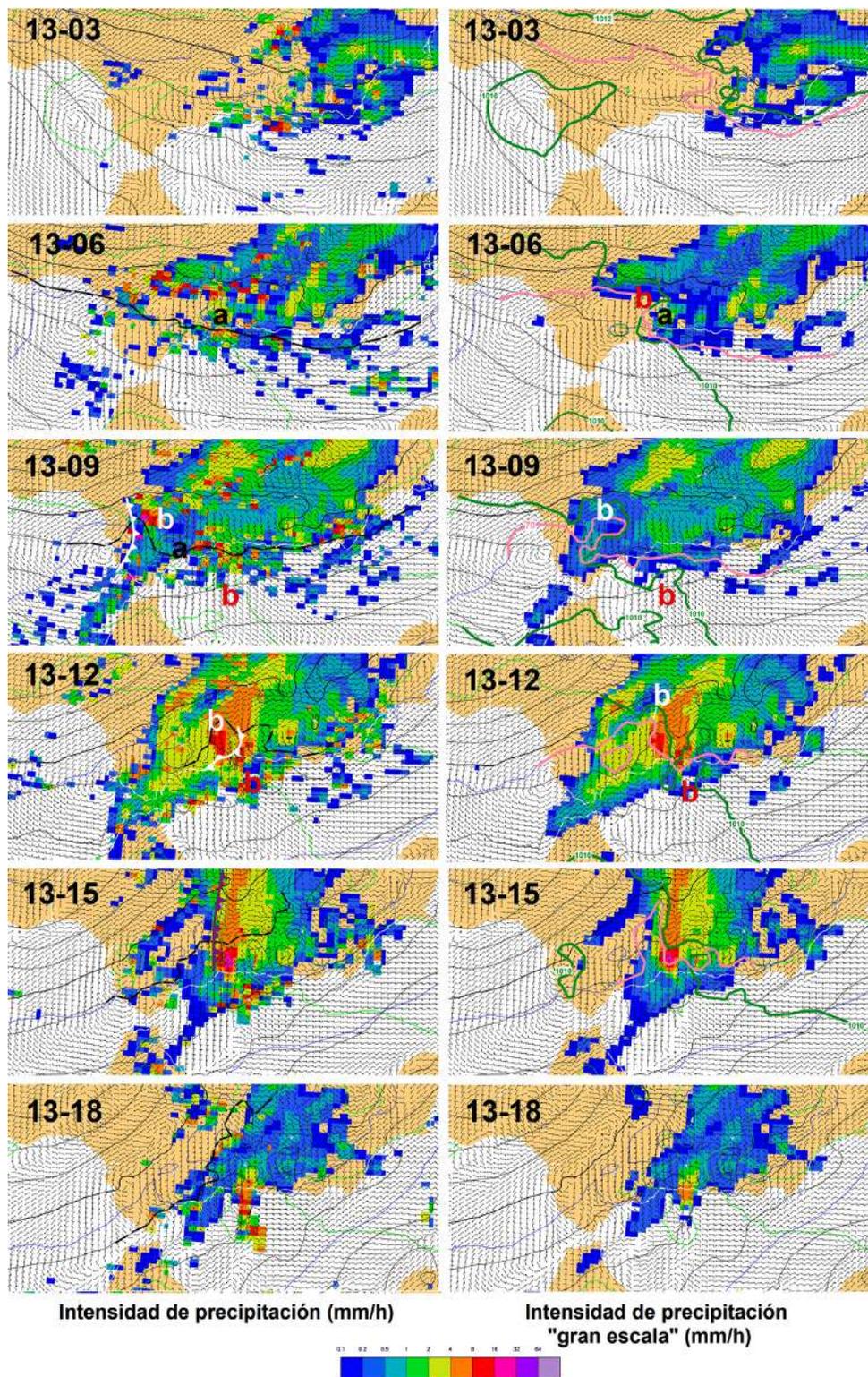


Figura 7. Presión a nivel del mar (isobaras en verde, intervalo 2 hPa; isobara gruesa de 1010 hPa); espesores 600/925 hPa (líneas negras, intervalo 10 m; en grueso la línea de espesor de 277 dam); espesores 850/925 hPa (líneas azules, intervalo 20 m; en grueso y en rosa la línea de espesor de 70 dam); intensidad de precipitación (columna izquierda, mm/h colores según la escala), intensidad de precipitación de "gran escala" (columna de la derecha, mm/h colores según la escala). Modelo operativo del ECMWF pasadas del día 13: a las 00 h (03, 06 y 09); a las 12 h (12, 15, 18)

toda una amplia zona contigua en forma de lambda (λ) en el este de la provincia de Málaga con la bifurcación sobre el mar, consecuencia del calentamiento latente debido al ascenso de las columnas de aire convectivamente inestables compuestas por el embolsamiento cálido y húmedo en capas bajas sobrevolado por aire seco: el sector ESE corresponde a su ascenso sobre el flujo de levante "frío"; el sector SO, paralela a la costa al oeste de Málaga, a su ascenso por la circulación vertical directa de la parte estacionaria del FFA. El sector norte sobre tierra, con aspecto de frente ocluido, es producto del volteo vertical de capas debido a los intensos movimientos ascendentes en la parte delantera del FFA. En la figura 8 se muestran cuatro sondeos del análisis de las 12 UTC del modelo ECMWF, todos en la zona lambda. El sondeo 1, el más alejado de la costa, la precipitación es de pequeña escala (parametrizada) pero muestra una capa de gran espesor con inestabilidad absoluta húmeda (MAUL, según sus siglas en inglés) lo que indica que, es más rápida la saturación por elevación de la capa que el proceso de desestabilización. El sondeo 2, próximo a la costa, tiene una capa aire de 900 a 800 hPa con inestabilidad absoluta húmeda y por encima otra capa 800-550 hPa con aire saturado y más frío que la del sondeo 1, probablemente refleja un estado de desestabilización de la capa MAUL. Los otros dos sondeos 3 y 4 localizados sobre tierra, sobre máximos de precipitación, que son principalmente de gran escala, muestran estabilidad. Se puede concluir que las columnas atmosféricas con MAUL se desestabilizan rápidamente al propagarse a la parte delantera del FFA donde los ascensos son muy intensos en niveles bajos. Este proceso fue reiterativo sobre la ciudad de Málaga dado que el estancamiento del FFA en la costa al oeste de la ciudad (con dirección SO-NE) generaba frecuentes torres convectivas

(LT) coincidiendo con que la parte delantera del FFA se situó sobre la parte oriental de la vaguada de niveles bajos, sobre Alborán. La dorsal del campo de espesores de 600/925 hPa asociada al frente se encontraba sobre el límite de las provincias de Málaga y Granada, aunque se fundía con la producida por el calor liberado por la convección asociada al máximo de intensidad de precipitación que ha quedado detrás del frente. Cuando el FFA alcanzó el mar,

en el tramo entre el faro de Calaburras y Málaga, se hizo casi estacionario como muestran las imágenes de reflectividad radar (figura 6), y que se explica por el calor liberado en altura por la convección. Consiguientemente parte del FFA se ha dibujado con triángulos y semicírculos en el mapa de las 12:00 de la figura 7.

En la figura 8a se muestra la velocidad vertical omega a las 12 UTC. Se observa que omega es negativa (ascendente) en

¹ Precipitación a gran escala es la resuelta por el modelo, que tiene una resolución de unos 9 km.

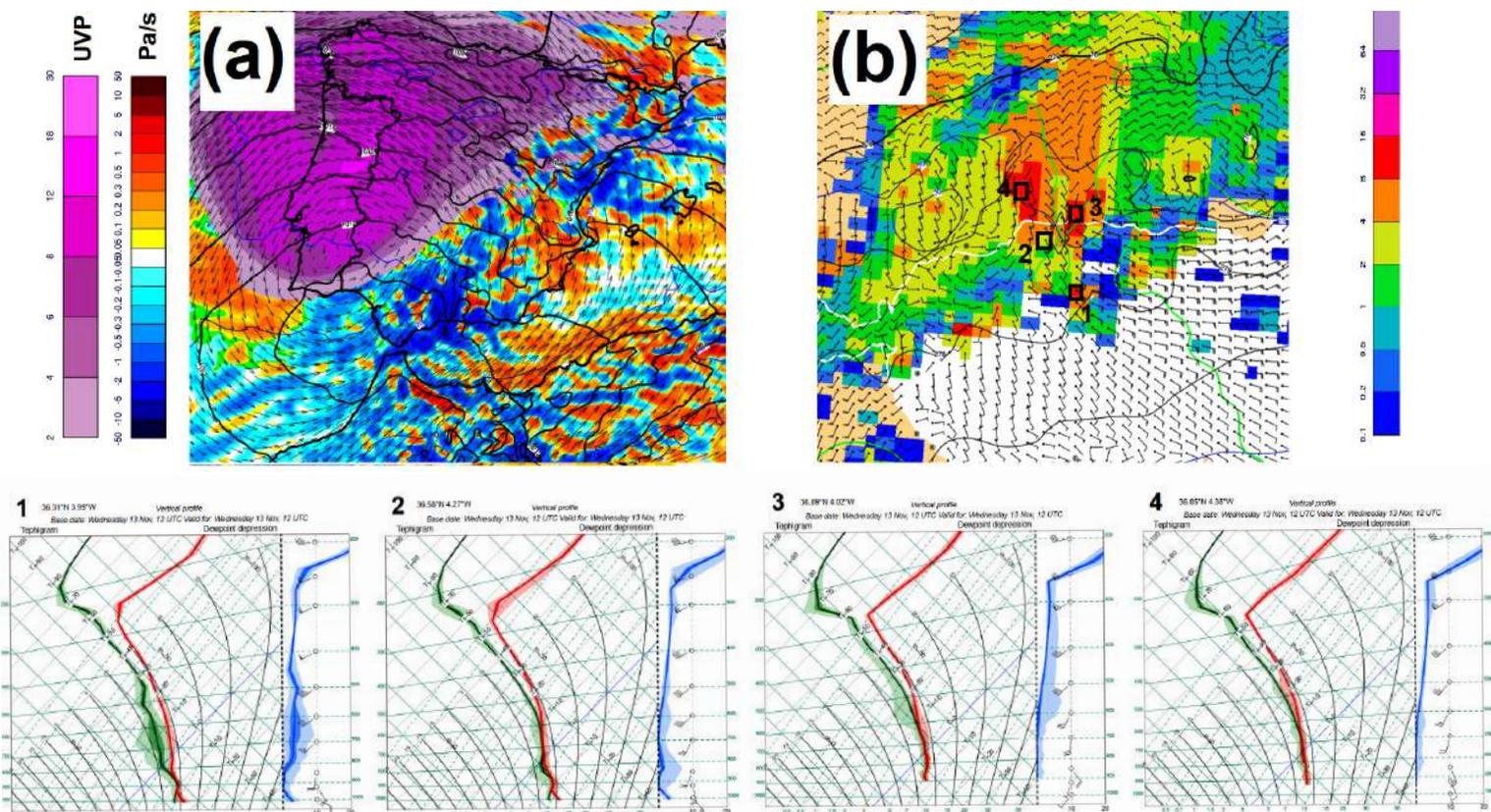


Figura 8. Arriba: (a) Viento en 700 hPa y presión a nivel del mar (isobaras cada 2 hPa), vorticidad potencial en la superficie de temperatura potencial 315 K (colores según la escala, en UVP) y velocidad vertical omega (color según la escala, en Pa/s), análisis del modelo; (b) los mismos campos que en la figura 7 izquierda para las 12 UTC con la localización de los sondeos mostrados abajo. Abajo: sondeos de los análisis del modelo ENS del ECMWF de las 12 UTC del día 13 en las localizaciones indicadas: las gráficas muestran con distintos sombreados el mínimo, la mediana y el máximo, y los percentiles 25 y 75 de las distribuciones de temperatura y punto de rocío en cada nivel

que se desplazaban con el viento del SE de niveles medios con capas MAUL hacia Málaga donde estaba anclada la parte delantera del FFA y donde los fuertes movimientos ascendente acababan por completar la desestabilización.

Este proceso acabó liquidando el FFA. A las 15 UTC la dorsal asociada al FFA había desaparecido y alternativamente se ha dibujado un "frente ocluido" con la masa cálida en altura procedente de la LT, que genera una línea de precipitación estratiforme orientada norte sur. Aunque ha desaparecido el forzamiento del FFA, la precipitación a gran escala sigue siendo la más intensa debido a que el sistema se sigue realimentando como un sistema convectivo mesoscalar (SCM) junto a la costa por la convergencia del flujo de levante y la rama descendente de la circulación frontogénica del "frente ocluido", que haría las funciones del *rear inflow jet* (RIJ) en los SCM con la parte estratiforme trasera.

A partir de las 18 y a las 21 UTC el modelo numérico vuelve a representar tormentas intensas de pequeña escala, basadas en la parametrización convectiva.

Resumen

La entrada de viento de levante a prime-

ra horas del día dejó una seclusión de aire cálido y húmedo en niveles bajos sobre el mar de Alborán, frente a la bahía de Málaga. Las columnas de aire compuestas por la seclusión sobrevoladas por aire seco procedente de la dana eran convectivamente inestable.

Sobre las 09.00 UTC Se formó un frente frío en altura (FFA) en la provincia de Cádiz que se desplazó hacia el este afectando a la costa norte de Alborán. Al situarse el morro del FFA sobre el este de la seclusión el ascenso desarrolló la banda convectiva de la línea de turbonada.

El FFA quedó estancado sobre la costa de dirección SO-NE al oeste de Málaga y las células convectivas formadas a lo largo de esta costa fueron empujadas por los vientos hacia la parte delantera de FFA anclado sobre la ciudad de Málaga, donde los fuertes movimientos verticales asociados desestabilizaban las capas con MAUL que transportaban las células convectivas, generando intensas precipitaciones sobre la ciudad.

Este proceso acabó liquidando el frente en altura a primeras horas de la tarde, pero la convección continuó en la zona hasta el final del día, organizada con la dinámica de un SCM.

Agradecimientos

A Alejandro Roa (AEMET, Madrid) y a Pablo Aguayo (AEMET, Málaga) por la información amablemente facilitada

Referencias

- Crawford, M. E., 1950: A synoptic study of squall lines. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 31, 351-357.
- Hobbs, P. V., J. D. Locatelli, and J. E. Martin, 1990: Cold fronts aloft and the forecasting of precipitation and severe weather east of the Rocky Mountains. *Wea. Forecasting*, 5, 613-626.
- Hobbs, P. V., J. D. Locatelli, and J. E. Martin, 1996: A New Conceptual Model for Cyclones Generated in the Lee of the Rocky Mountains. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 1169-1178, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<1169:ANCMFC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<1169:ANCMFC>2.0.CO;2).
- Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, & A. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 111: 877-946.
- Locatelli, J. D., J. E. Martin, J. A. Castle, and P. V. Hobbs, 1995: Structure and Evolution of Winter Cyclones in the Central United States and Their Effects on the Distribution of Precipitation. Part III: The Development of a Squall Line Associated with Weak Cold Frontogenesis Aloft. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 2641-2662, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<2641:SAEOWC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<2641:SAEOWC>2.0.CO;2).