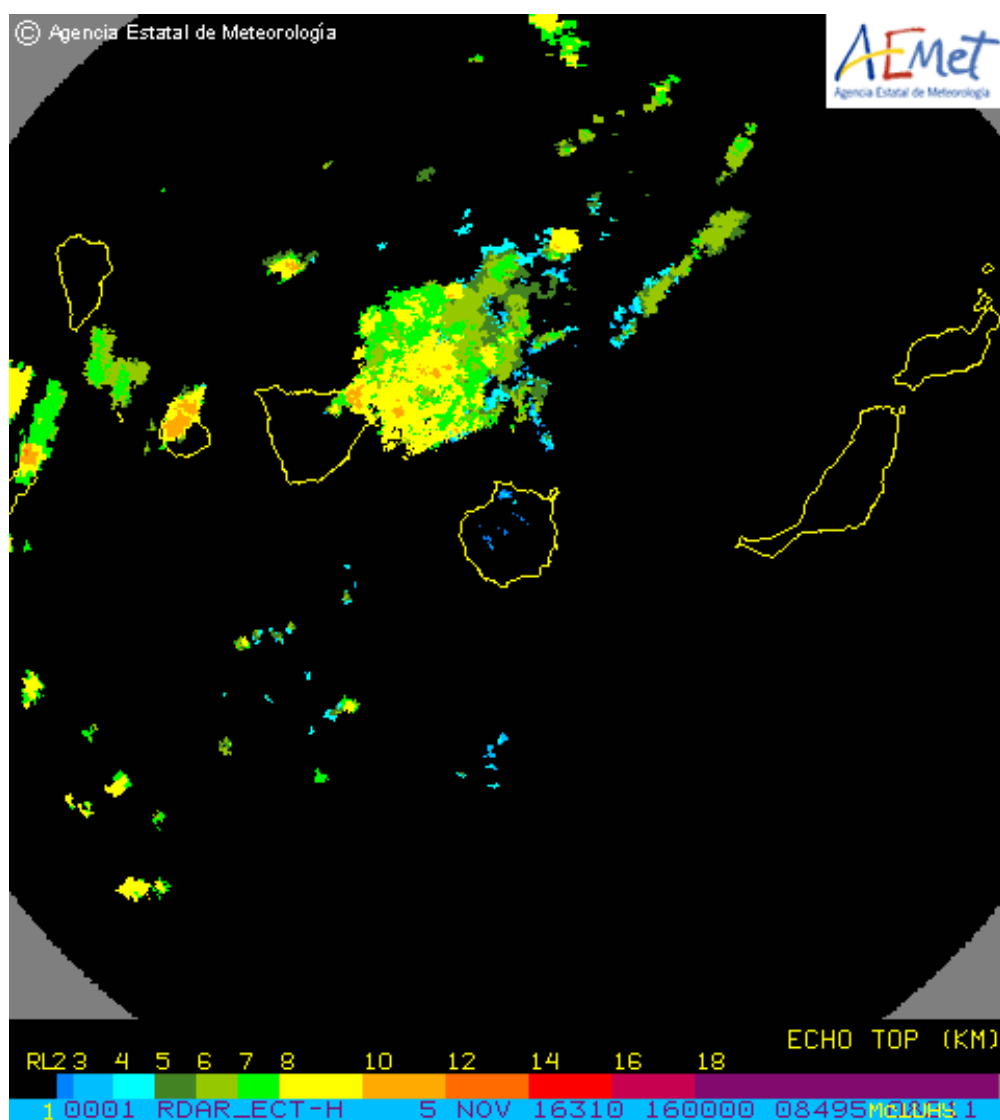


# Estudio del episodio de precipitaciones intensas en la isla de Tenerife el 5 de noviembre de 2016

Nota técnica 30 de AEMET



**RAFAEL POZO LÓPEZ**

Grupo de Predicción y Vigilancia de Sevilla



2020



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


**Edita:**

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico  
Agencia Estatal de Meteorología  
Madrid, 2020

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

NIPO: 666-20-005-5  
<https://doi.org/10.31978/666-20-005-5>

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

 @Aemet\_Esp



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

# Índice

<b>RESUMEN</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>2. ANÁLISIS SINÓPTICO Y MESOESCALAR</b>	<b>5</b>
<b>3. ANÁLISIS DE LA CONVECCIÓN Y LAS PRECIPITACIONES</b>	<b>13</b>
<b>4. ANÁLISIS TÉRMICO Y DINÁMICO VERTICAL DE LA ATMÓSFERA</b>	<b>19</b>
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>25</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>26</b>
<b>ACRÓNIMOS</b>	<b>26</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>26</b>

# ESTUDIO DEL EPISODIO DE PRECIPITACIONES INTENSAS EN LA ISLA DE TENERIFE EL 5 DE NOVIEMBRE DE 2016.

Rafael POZO LÓPEZ  
Agencia Estatal de Meteorología  
Grupo de Predicción y Vigilancia de Sevilla  
[rpozol@aemet.es](mailto:rpozol@aemet.es)

## RESUMEN

En esta nota se describe la situación de precipitaciones intensas del 5 de noviembre de 2016 en la isla de Tenerife y el procedimiento de predicción y avisos seguido por parte de AEMET. También se muestran algunas conclusiones que surgen del análisis de los radiosondeos correspondientes a ese día y se describen algunas consecuencias que tuvo el episodio para la población. El caso es un ejemplo claro de cómo un episodio adverso puede no ser suficientemente previsto por los modelos siendo necesaria una vigilancia eficaz para cuantificar el evento y emitir una alerta aún oportuna. Se verá la importancia del análisis de las condiciones termodinámicas verticales atmosféricas, a través de los sondeos del día, en la predicción de muy corto plazo.

**Palabras clave:** Precipitaciones intensas; Tenerife; FMA; AEMET; DANA; Borrasca Fría; radiosondeo.

## 1. INTRODUCCIÓN

El día 5 de noviembre de 2016 entre las 13Z y las 17Z, coincidiendo con las mismas horas locales, la isla de Tenerife se vio afectada por unas lluvias muy intensas de carácter tormentoso y con aparato eléctrico. El sector nordeste de la isla, desde el valle de la Orotava hasta el de Güimar, y especialmente los municipios de Santa Cruz de Tenerife, San Cristóbal de La Laguna y Tegueste (la mayor parte del Área Metropolitana de Santa Cruz), se vio muy afectado por el evento. En la Figura 1 se muestra un mapa de la zona afectada con las poblaciones y características relevantes de la geografía. Intensidades de precipitación de más de 30mm/h (intensidades muy fuertes) y totales de hasta 60mm se registraron en algunos puntos como en las ciudades de La Laguna, Victoria de Acentejo y Santa Cruz de Tenerife además de precipitaciones simultáneas en otras islas. Para aquella jornada estaban previstas por parte de AEMET, a través de sus boletines, tormentas locales en todo el archipiélago. Sin embargo la gran intensidad de precipitación que se alcanzaría finalmente en el nordeste de Tenerife sólo se pudo confirmar gracias a la vigilancia meteorológica continua realizada ese día.

La acusada pendiente del relieve de la isla fue causa de incidencias importantes tales como cortes e inundaciones de la vía pública, aumento del caudal de las aguas por las ramblas, desperfectos en vías de tránsito y líneas de suministro eléctrico así como caída de árboles aunque sin daños personales. Uno de los puntos que recogió importantes cantidades fue precisamente el propio aeropuerto de Tenerife Norte (Los Rodeos) cuyas instalaciones sufrieron goteras y filtraciones en las salas de espera y de equipaje. No obstante se pudo mantener la operatividad en el aeropuerto.

El episodio tuvo especial eco tanto en los medios de comunicación como a nivel político siendo necesario un comunicado oficial justificativo de las actuaciones por parte de AEMET.



Figura 1: Imagen orientativa de la zona afectada por las precipitaciones. **Fuente:** Cartográfica de Canarias, S.A.



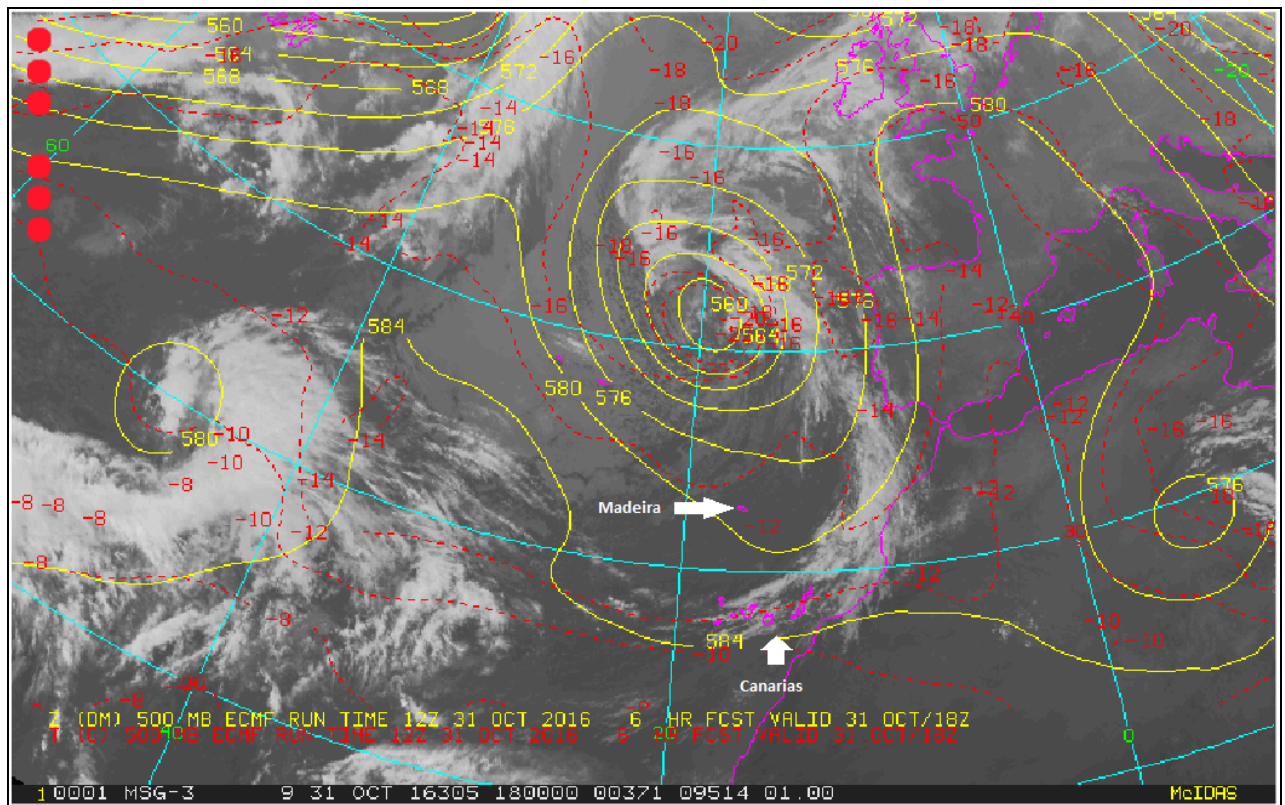


Figura 2: Imagen sinóptica del canal satélite infrarrojo MSG (IR10.8) de las 18Z del 31 de octubre de 2016. Se muestran adicionalmente los campos previstos para el nivel de 500hPa de temperatura (T 500 rojo) y altura geopotencial (Z 500 amarillo), previstos por la salida de las 12Z del modelo CEPPM para H+6 de ese día, delimitándose claramente una borrasca atlántica frente a las costas peninsulares. Se indican la situación de las Islas Canarias y Madeira.

## 2. ANÁLISIS SINÓPTICO Y MESOESCALAR

Una baja presión con núcleo frío, importante desarrollo vertical y reflejo en superficie se encontraba en el extremo sur de una alargada vaguada polar desde el día 31 de octubre de 2016 (Figura 2) desplazándose hacia el sur y ligeramente hacia el este, en dirección a Canarias, frente a la costa oeste de la península Ibérica. El día 4 de noviembre alcanza y se sitúa ya sobre Madeira. El día siguiente llega a Canarias en su desplazamiento al sur donde comenzaría lentamente su desviación al nordeste. La Figura 3.a muestra la imagen del canal de vapor de agua MSG (WV6.2) de las 00Z del día 5 donde se percibe claramente un vórtice húmedo y nuboso sobre Madeira rodeado de un chorro seco trasero envolvente de cierta intensidad. A esta hora este vórtice aún no se sitúa completamente sobre Canarias, y tampoco existe una gran convección en el área de las islas, pero ya le aporta vientos húmedos del oeste a baja altura. En esta imagen satelital se pueden observar las células convectivas sobre Madeira en el centro del sistema de baja presión. Estas células se pueden observar mejor en la imagen del canal infrarrojo MSG (IR10.8) de la Figura 3.b. Son perfectamente distinguibles y por tanto la situación indica próxima inestabilidad. Horas después de las 00Z la baja se situará sobre el archipiélago canario, con la inestabilidad que estaba prevista en los boletines, permaneciendo prácticamente sin cambios el resto de la jornada. Las imágenes satélite correspondientes de las 12Z mostrarán una estructura similar a estas de las 00Z con el sistema ligeramente desplazado al sur y afectando mayormente a la mitad occidental del archipiélago canario.

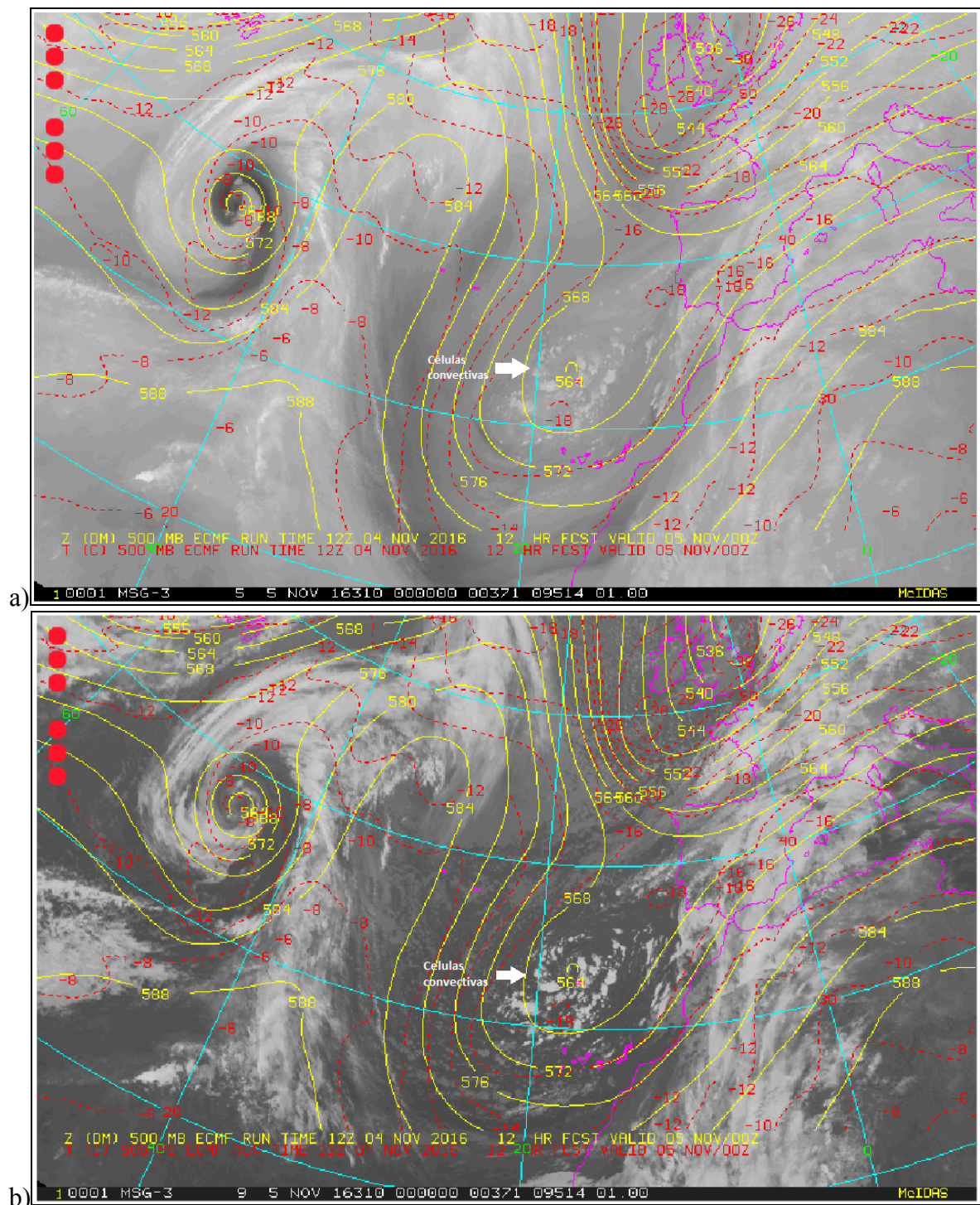


Figura 3: Imágenes MSG de las 00Z del a) canal WV6.2 y b) canal IR10.8 del 5 de noviembre de 2016 donde se aprecian claramente las células convectivas. Se muestran adicionalmente los campos en el nivel de 500hPa de temperatura (T500 rojo) y de altura geopotencial (Z500 amarillo) previstos por el CEPPM a las 12Z del día 4 de noviembre de 2016 para H+12.

La guía técnica de diagnóstico de niveles medios/altos de las 12Z (Figura 4.a) presenta al núcleo de anomalía fría de la baja abarcando la mitad occidental de Canarias. El chorro de altura trasero a su oeste, de componente muy de norte, se sitúa a poca distancia y aportará en su rodeo vientos del suroeste al tercio central del archipiélago (Tenerife y Gran Canaria). El chorro delantero al este de la borrasca tiene dirección hacia el noreste. El análisis de superficie para las 12Z (Figura 4.b) presenta a su vez el reflejo en superficie de la baja. La estructura de la depresión y su núcleo frío quedan por tanto en el lado polar del chorro, el cual

la envuelve, y tendríamos que hablar de una *borrasca fría (polar)* y no de una DANA, que debería quedar en el lado ecuatorial del chorro y aislarse completamente de la circulación de este (Martin, 2003). En el caso de una DANA se hablaría de *borrasca fría aislada* solo cuando aparece reflejo en superficie (Martin, 2003).

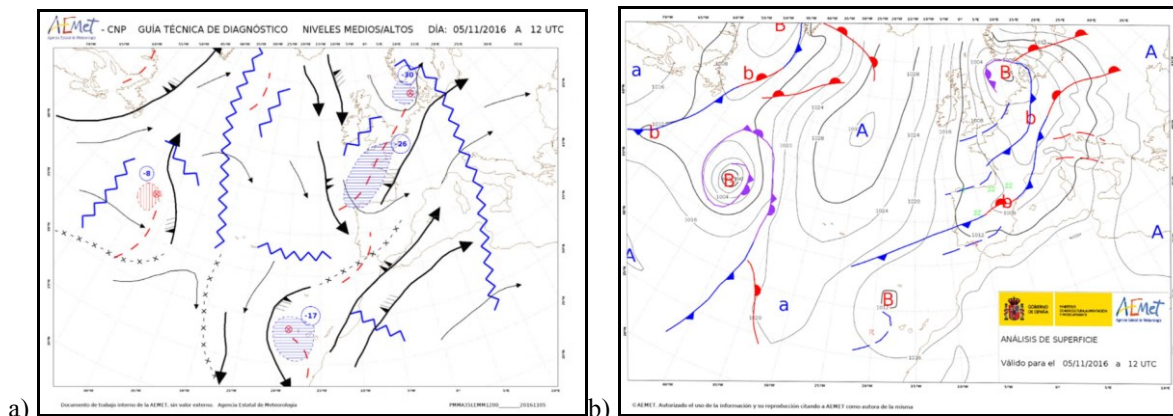


Figura 4: Análisis de las 12z con a) GTD en niveles medios/altos y b) análisis de superficie.

En términos generales el modelo del CEPPM preveía para el día 5 en la pasada de las 00Z para el alcance H+12 (Figura 5) que el sistema fuera desplazándose ligeramente hacia el suroeste con ligera disminución de su intensidad respecto del análisis de las 00Z (Figura 6). Los vientos presumiblemente disminuirían su intensidad y modificarían su dirección ligeramente al suroeste pero en general serían todo el tiempo flujos de importante recorrido marítimo con gran aporte de humedad. De esta misma forma se pronosticaba que para las 12Z en niveles medios-altos la borrasca habría sido ligeramente reabsorbida por el flujo general del oeste, aunque sin perder a priori mucha inestabilidad. En realidad los cambios que habría sufrido el sistema para el final del día 5 respecto al comienzo como se verá eran pocos y básicamente posicionales.

En el mapa de pronóstico de MSLP/Temperatura en el nivel de 850hPa de las 00Z para H+12 del CEPPM (Figura 5.a) se visualiza un desplazamiento al sur-suroeste de la baja en superficie respecto del análisis de las 00Z (Figura 6.a) con un ligero debilitamiento.

En el mapa de pronóstico de altura geopotencial/humedad relativa en 700hPa de las 00Z para H+12 (Figura 5.b) del CEPPM se muestra que el núcleo de la baja se desplazará con las horas también hacia el sur-suroeste respecto del análisis de las 00Z (Figura 6.b), análogamente al nivel anterior, junto con su carga de humedad en la columna vertical. Más adelante se observará en el radiosondeo precisamente este mayor reparto de humedad de las 12Z respecto de las 00Z, especialmente a partir de este nivel de 700hPa hacia arriba.

El mapa de previsión del CEPPM de altura geopotencial/temperatura en 500hPa de las 00Z para H+12 (Figura 5.c) muestra al núcleo frío que se debilitará ligeramente con desplazamiento también hacia el suroeste, en dirección al continente africano, respecto de la imagen de análisis de esta misma pasada (Figura 6.c).

El mapa del CEPPM de previsión de altura geopotencial/temperatura/vientos en 300hPa de las 00Z para H+12 (Figura 5.d) muestra al núcleo frío que se desplaza ligeramente al sur respecto al análisis de esta misma pasada (Figura 6.d), con disminución de la intensidad de los vientos que circulan a esta altura al alejarse el eje del chorro.



Finalmente en el análisis del CEPPM de las 00Z del día 6 de noviembre (Figura 7) se aprecia en términos generales un nuevo debilitamiento de la intensidad de la borrasca, un desplazamiento hacia el suroeste respecto del análisis de la pasada correspondiente del día anterior y una mayor inclusión en la circulación general zonal. Sin embargo la situación reviste menor inestabilidad especialmente desde el nivel de 500hPa a superficie (Figuras 7a, b y c) siendo los vientos en estos niveles más débiles aunque más de suroeste.

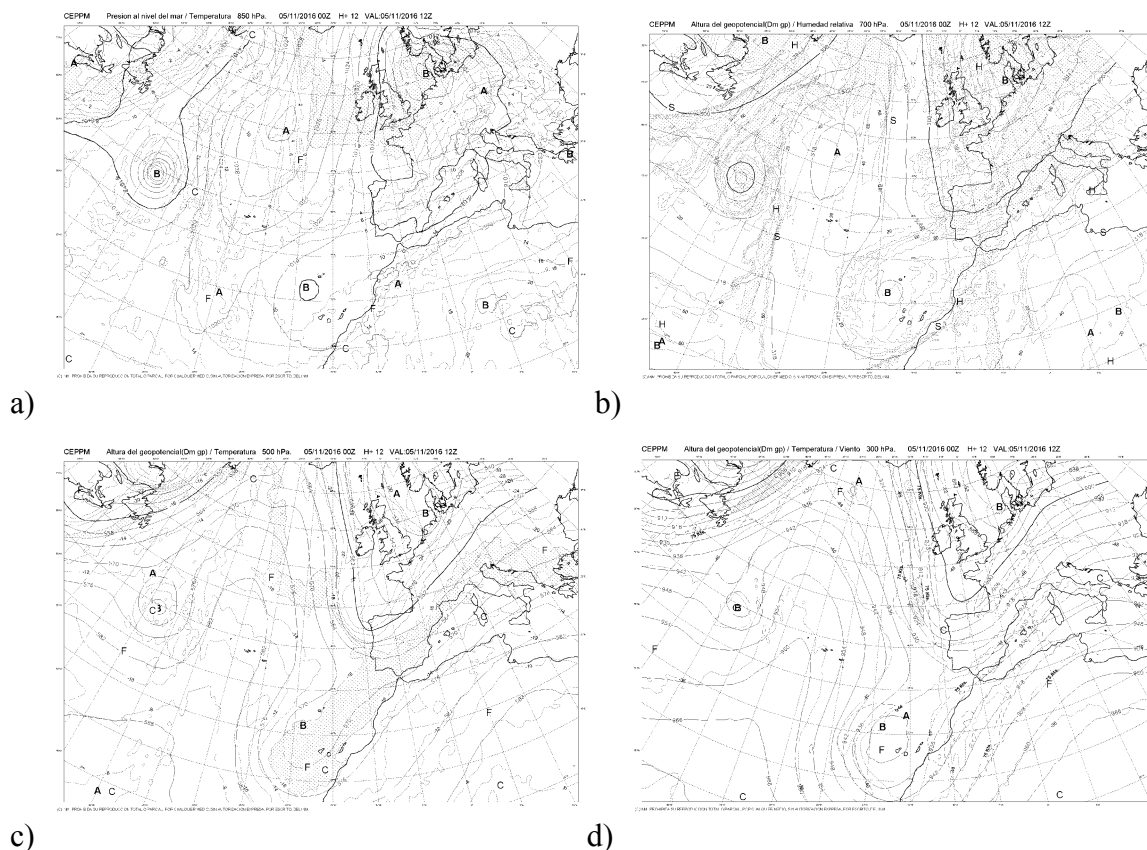


Figura 5: Mapas de pronóstico del CEPPM de 5 de noviembre de 2016 de las 00Z para H+12 de a) MSLP/temperatura en 850hPa, b) altura geopotencial /HR en 700hPa, c) altura geopotencial/temperatura en 500hPa y d) altura geopotencial/ temperatura/V en 300hPa.

En resumen la situación tenía una clara inestabilidad durante el día 5 aunque no se aprecia aún por parte de la unidad de predicción una gran severidad en cuanto al pronóstico sinóptico se refiere. Los boletines de predicción general reflejan poca variación respecto de las condiciones meteorológicas del día anterior. Como se verá más adelante el boletín de predicción general para Tenerife del día 5 para ese mismo día D (Figura 14.e), elaborado antes de las 13:00 local, es prácticamente igual que el del día previo para D+1 (Figura 14.c). El boletín para la comunidad autónoma del día 4 para D+1 (Figura 14.d) refleja una información muy parecida para Tenerife. Análogamente el día 5 se emitió a las 6:57 local para ese día D un aviso amarillo inicial por intensidad de lluvia adversa de 20mm/h (Figura 14.a), que estaría en vigor hasta el final del día 5. Para la hora oficial de comienzo de las precipitaciones intensas, a las 16:42, se emitió un aviso naranja por intensidad observada de 30mm/h (Figura 14.b), tal como establece el Plan Nacional Meteoalerta para la predicción y vigilancia de fenómenos meteorológicos adversos, momento en que aún no estaba disponible la salida de las 12Z del los modelos de CEPPM ni HIRLAM.

En cuanto a los vientos en superficie se refiere no serían excesivamente intensos a las 12Z respecto de las 00Z, e incluso se debilitan. En la Figura 8 se muestra el análisis de vientos en

superficie de las 12Z de HIRLAM. El pronóstico este modelo en la pasada de las 00Z para H+12 (Figura 9) no prevé tampoco vientos promedios intensos superficiales en la zona de Canarias en ese momento. Esta previsión de vientos medios por parte de los modelos es en realidad habitual en un contexto de lluvias generalizadas de este tipo. No obstante sí que podrán pronosticarse rachas intensas las cuales aparecerían junto a la formación de tormentas.

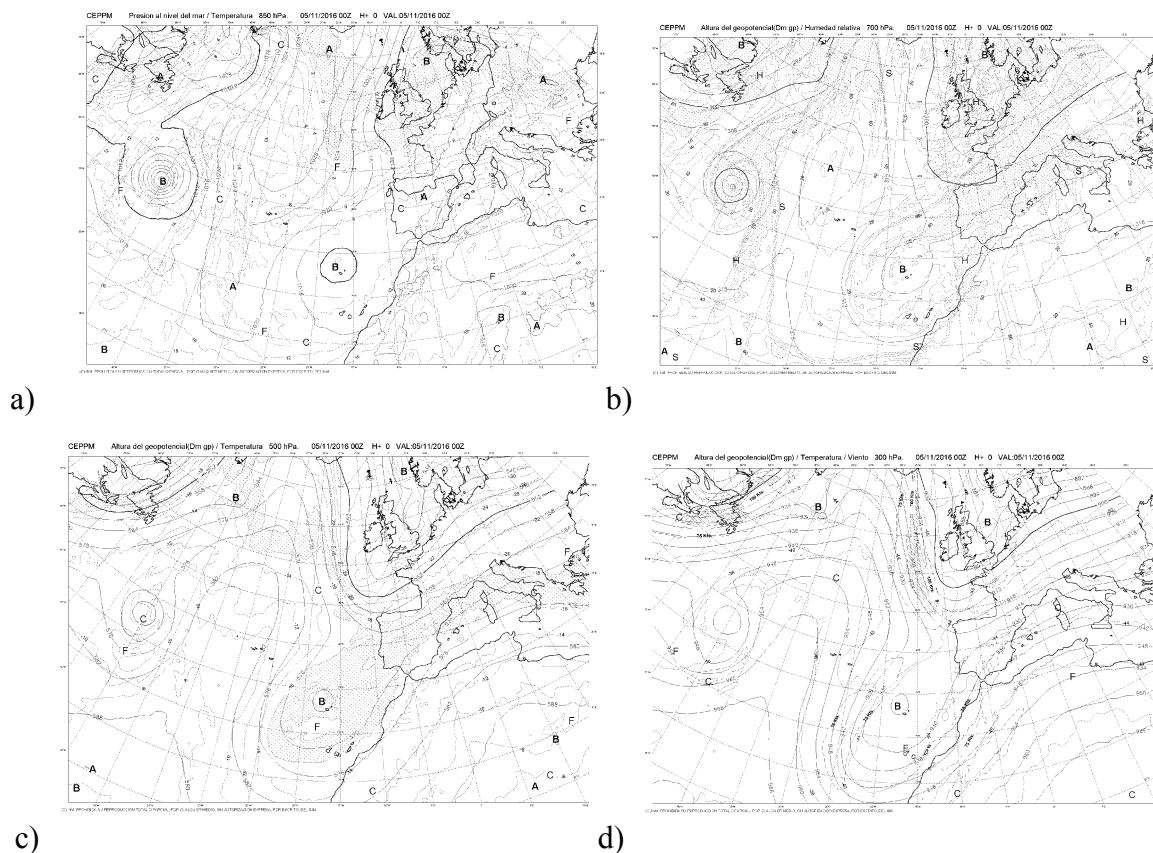


Figura 6: Mapas de análisis del CEPPM de 5 de noviembre de 2016 de las 00Z de a) MSLP/Temp en 850hPa, b) Altura geopotencial /HR en 700hPa, c) Altura geopotencial/Temp en 500hPa y d) Altura geopotencial /Temp/V en 300hPa.

De cara a realizar una predicción, con la configuración atmosférica presente, es difícil precisar la localización última de las precipitaciones que estamos estudiando, las cuales podrían ser mesoescalares o incluso de menor escala. La borrasca, que es de escala sinóptica, reparte la probabilidad de convección en una zona amplia y no se aprecian otros elementos desencadenantes de escala similar (frentes, líneas de convergencias...) que puedan precisar el pronóstico de precipitaciones. Además se une el que la escala de las islas, del relieve y de las propias células convectivas suelen estar por debajo de la resolución de los modelos, los cuales no tendrán suficiente pericia para la precisión de la localización e intensidad de las precipitaciones.

En términos generales la disposición de las barreras orográficas respecto al viento determina que las precipitaciones puedan producirse tanto a barlovento de ellas, por ascenso del aire, como a sotavento, si hay convergencia a baja altura (*Polvorinos, 2010*). Los obstáculos geográficos actúan de forzamiento dinámico en la formación de precipitaciones conforme a su orientación respecto a los vientos reinantes. La orografía elevada también concentra durante el día la humedad y el calor en los puntos elevados, actuando de forzamiento térmico, y favoreciendo la formación nubosa. Con los obstáculos aislados, como ocurre con Tenerife, es habitual que se induzca un dipolo barométrico a baja altura cuando los vientos son bloqueados

a barlovento (*Polvorinos, 2010*). En este caso sólo pueden rodear la isla y converger a sotavento favoreciendo aquí el ascenso (*Polvorinos, 2010*). Esto lo comprobaremos más adelante.

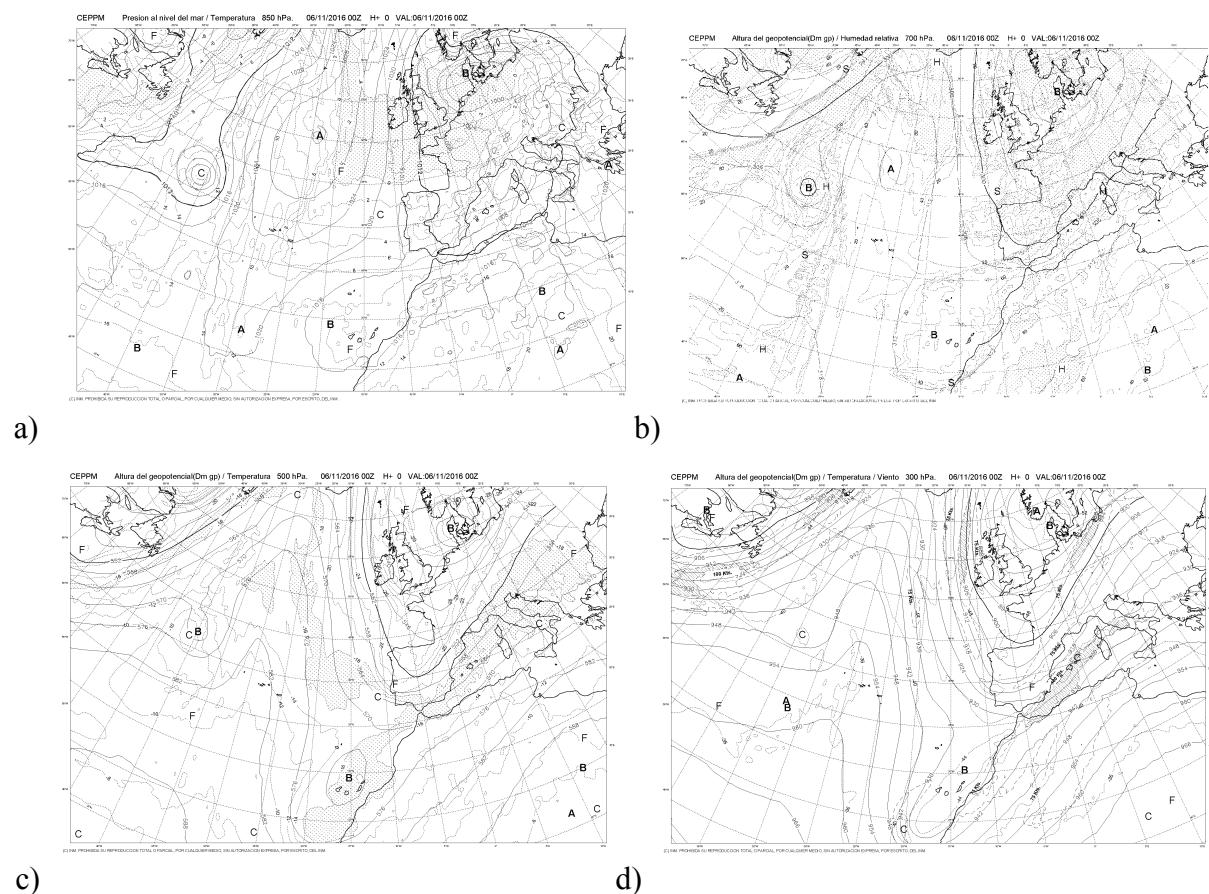


Figura 7: Mapas de análisis del CEPPM de 6 de noviembre de 2016 de las 00Z de a) MSLP/Temp en 850hPa, b) Altura geopotencial/HR en 700hPa, c) Altura geopotencial/Temp en 500hPa y d) Altura geopotencial/Temp/V en 300hPa.

Teniendo en cuenta este modelo conceptual, con el que describimos la formación de dipolos barométricos y convergencia baja a sotavento, la localización de las precipitaciones en Tenerife sería posible ser bien prevista durante las horas centrales del día 5, e incluso desde el día anterior, como así lo muestra el modelo BDDP. Es necesario aclarar que la salida de BDDP coincide para la precipitación con la salida del EPS del CEPPM. No obstante la intensidad prevista fue subestimada por el modelo, como se verá más adelante.

En la Figura 10.b se aprecia el pronóstico del día 4 de noviembre de 2016 del modelo BDDP de superación de 10mm para la precipitación total del día 5. Eran previstas efectivamente superaciones de más de 10mm (Figura 10.b) en la zona de interés, sin embargo el mapa respectivo de superación de más de 20mm (Figura 10.c) apenas aportaría señal en ningún lugar de Canarias, salvo una pequeña zona del noroeste de La Palma. El mapa de superación de más de 2mm (Figura 10.a) sí que daría señal prácticamente en todo el archipiélago estando uno de los máximos al nordeste de Tenerife. El modelo HIRLAM, en su pasada de las 12Z, tampoco prevé acumulación excesiva de precipitación entre las 12Z y las 18Z como se observa en la Figura 11.

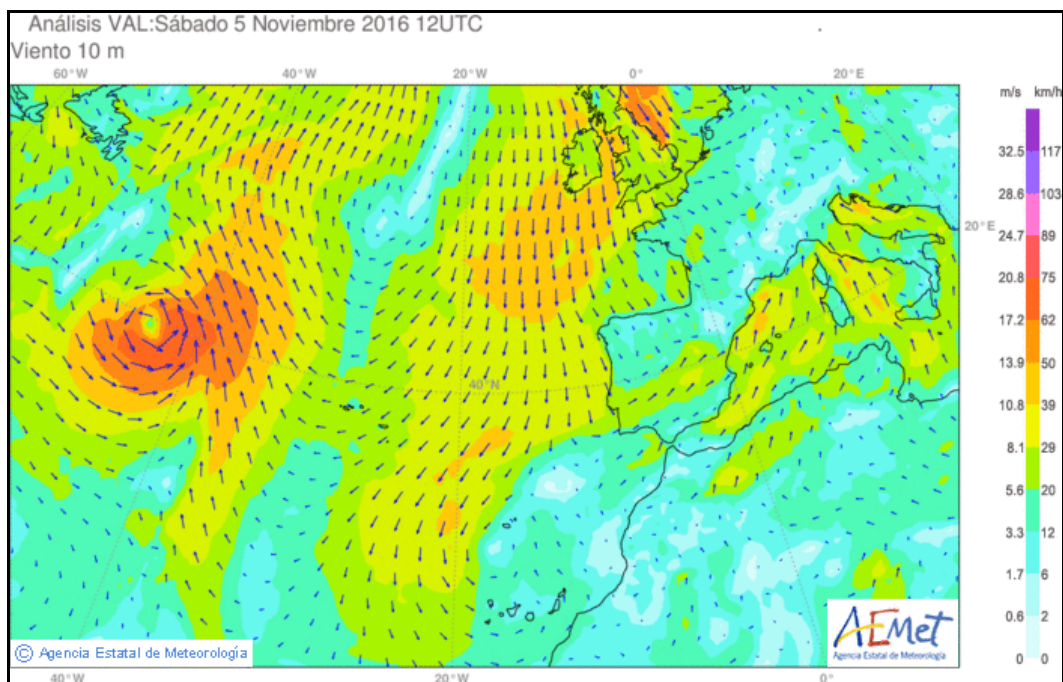


Figura 8: Análisis sinóptico del HIRLAM de las 12Z del 5 de noviembre para vientos a 10m de la superficie.

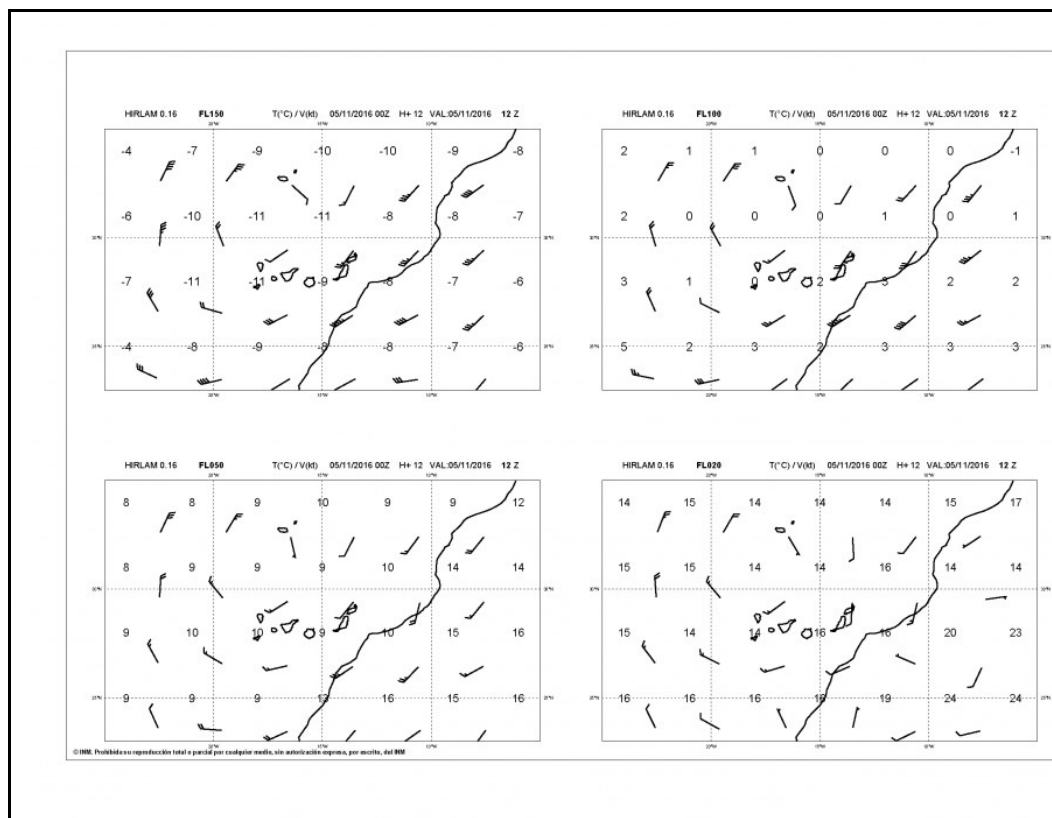


Figura 9: Vientos previstos en distintos niveles sobre Canarias. Salida del HIRLAM de las 00z para H+12. Las altitudes aproximadas en metros son: FL020 (600m), FL050 (1500), FL100 (3050m) y FL150 (4550m).



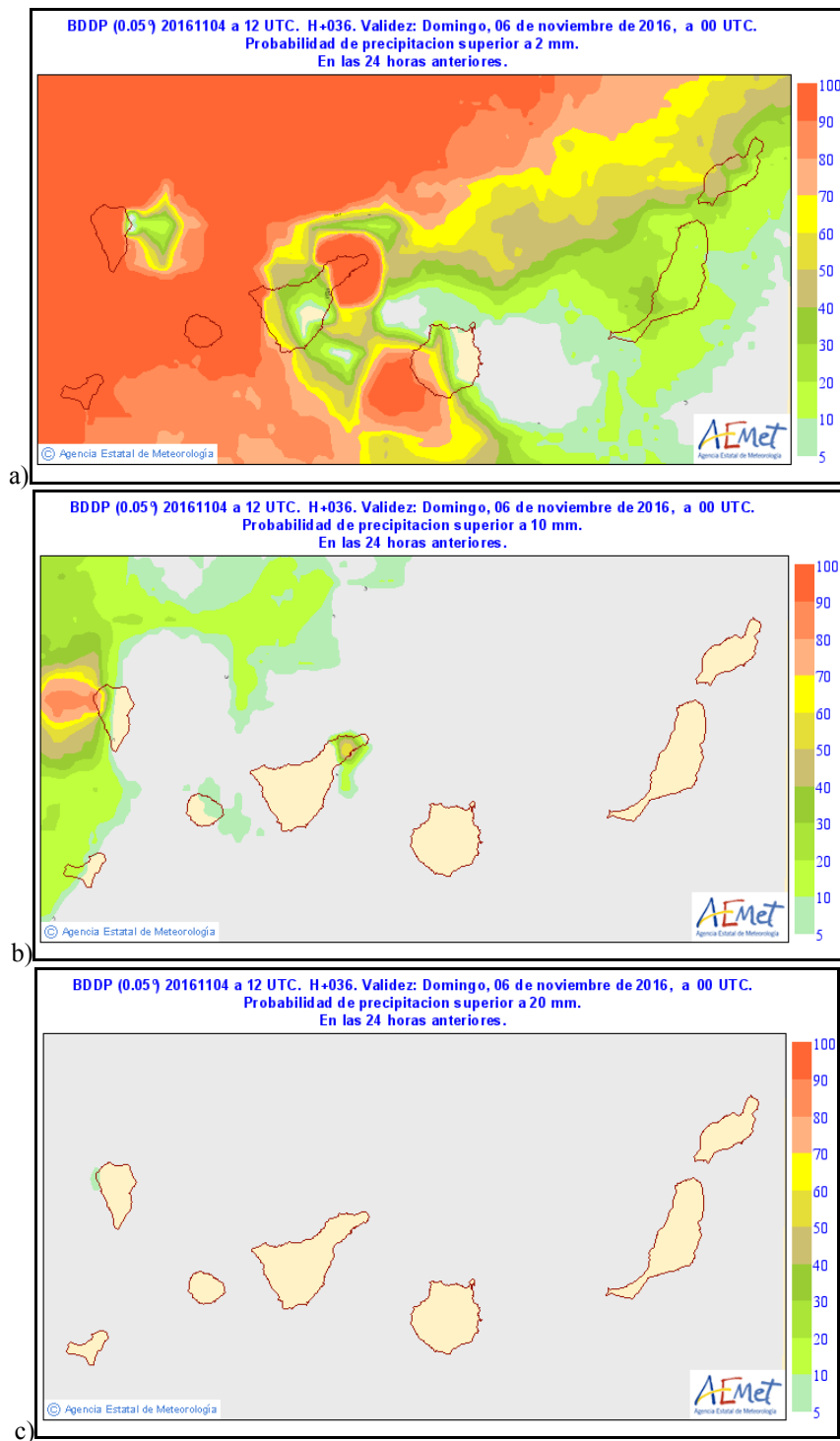


Figura 10: Mapas de probabilidad de superación de umbrales de precipitación en 24h del modelo BDDP para el 5 de noviembre de 2016: a) 2mm, b) 10mm y c) 20mm.

Por tanto, tras analizar los modelos, las precipitaciones iban a ser previsiblemente generalizadas con carácter localmente tormentoso. De esta manera se reflejó en los boletines de predicción general, tanto regionales como para Tenerife (Figuras 14.d y 14.c). También se emitió un aviso de FMA amarillo por intensidad de precipitaciones previstas por la mañana, el cual se muestra en la Figura 14.a, que en la isla de Tenerife se emite para más de 15mm/h. Finalmente en la Figura 14.b, como comentaremos más adelante, se observa el boletín de aviso de FMA de nivel naranja por precipitaciones intensas observadas.

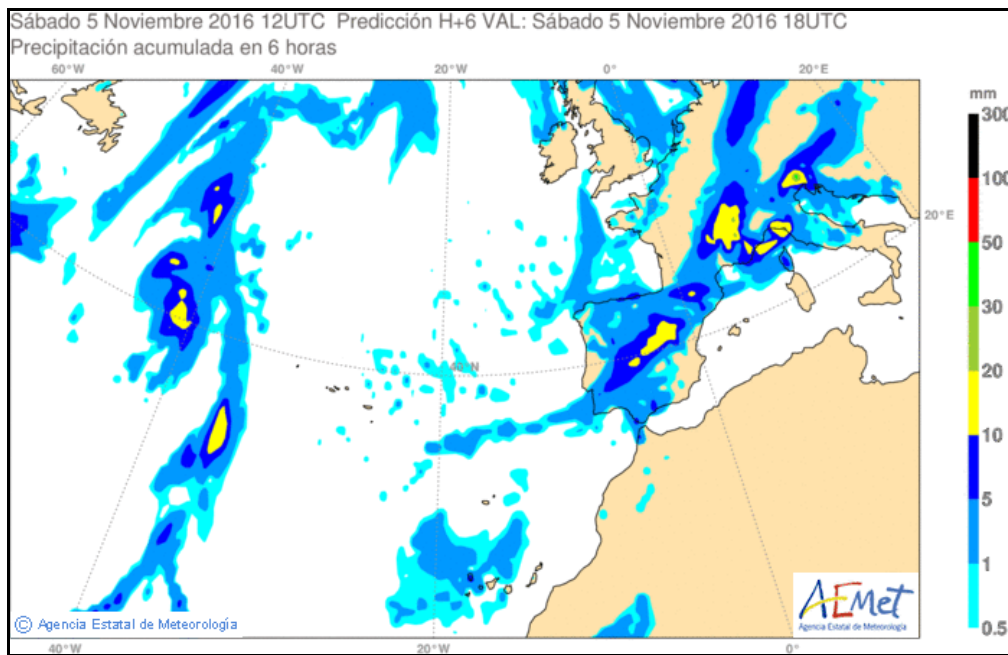


Figura 11: Mapas de predicción de acumulación de precipitación en 6 horas del HIRLAM de área amplia del 5 de noviembre de 2016 de las 12Z para H+6.

### 3. ANÁLISIS DE LA CONVECCIÓN Y LAS PRECIPITACIONES

En cuanto al desarrollo de la convección generada a partir de las 13Z, y sobre todo desde las 15Z, hasta más o menos las 17Z precipitaciones más intensas de las esperadas se sucedieron en la isla de Tenerife. En particular se registraron intensidades de 32.5mm/h y acumulaciones totales de 49.2mm en el Aeropuerto de los Rodeos (San Cristóbal de La Laguna) y 37.6mm/h y 64.2mm respectivamente en la Victoria de Acentejo, según la red principal de estaciones de AEMET como se comprobará a posteriori. La causa fue una importante célula convectiva que se formó en el sector nordeste de la isla, inicialmente tierra adentro, y en cuya fase de madurez afectó a poblaciones de todo ese extremo aunque especialmente La Laguna, La Victoria y Santa Cruz.

En la Figura 12 se muestra la imagen MSG (HRV) de las 16Z de la secuencia de imágenes satelitales del evento: uno de los momentos de madurez de la célula y actividad convectiva en el entorno de Tenerife. En la secuencia completa se podía observar el desarrollo inicial de la tormenta en el extremo nordeste de la isla, su maduración y posterior alejamiento en el sentido de los vientos dominantes. Se podía observar además como en los estadios iniciales se formaban condensaciones nubosas a barlovento del Teide (3718m). La montaña retiene esta nubosidad baja en forma de capa nubosa, extendiéndose hacia el nordeste en el sentido de los vientos, aportando bajo la tormenta aire muy saturado y nuboso. La orografía de la isla, como obstáculo aislado, provocó a sotavento la convergencia de los vientos de nivel bajo (*Polvorinos, 2010*). En la secuencia de imágenes satelitales se podían observar además réplicas convectivas simultáneas, pero sin tanta envergadura y también en el sentido de los vientos, en la Palma, La Gomera, suroeste de Gran Canaria, Hierro...

Las secuencias de imágenes de reflectividad del radar de Gran Canaria darán además idea de la cantidad de condensación acumulada por el cumulonimbo tinerfeño con reflectividades de más de 48dBz. El núcleo tormentoso nace tierra adentro para crecer alejándose hacia el nordeste. En la Figura 13.a se muestra la imagen de reflectividad PPI de las 16Z. Igualmente

la imagen ECHOTOP simultánea de las 16Z dará idea de la envergadura vertical de la torre nubosa de más de 12km en su momento de madurez (Figura 13.b).

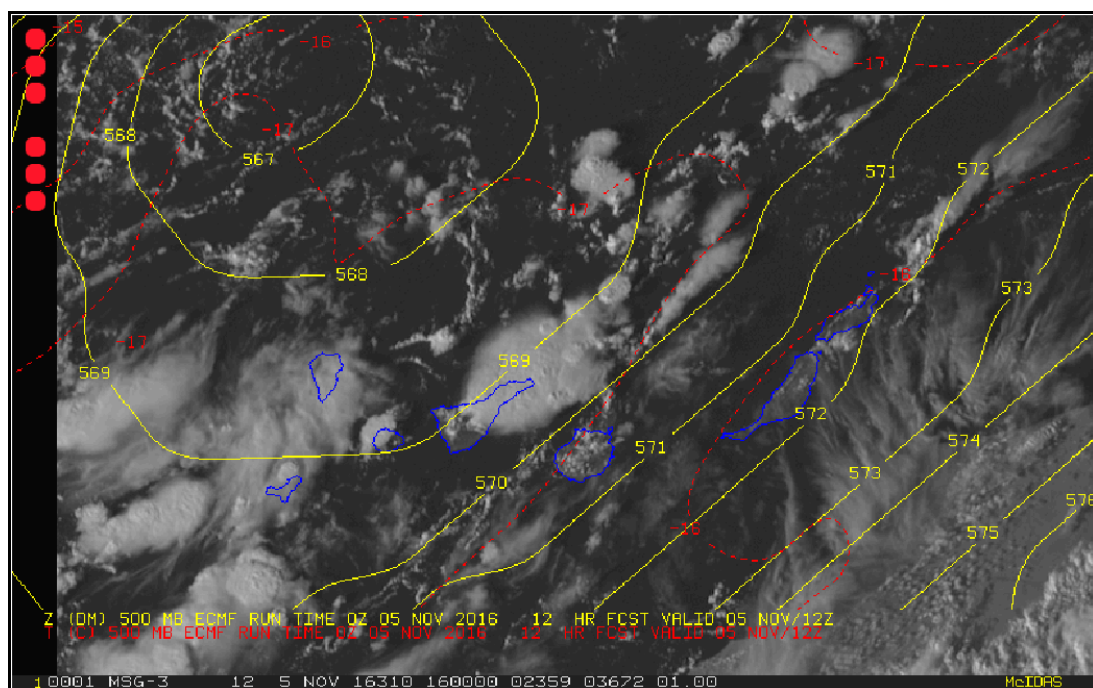


Figura 12: Tormenta sobre Tenerife. Imagen MSG (HRV) de las 16Z del 5 de noviembre de 2016 junto con los campos T500 (rojo) y Z500 (amarillo) previstos por el modelo ECMWF de las 00Z para H+12 de ese mismo día.

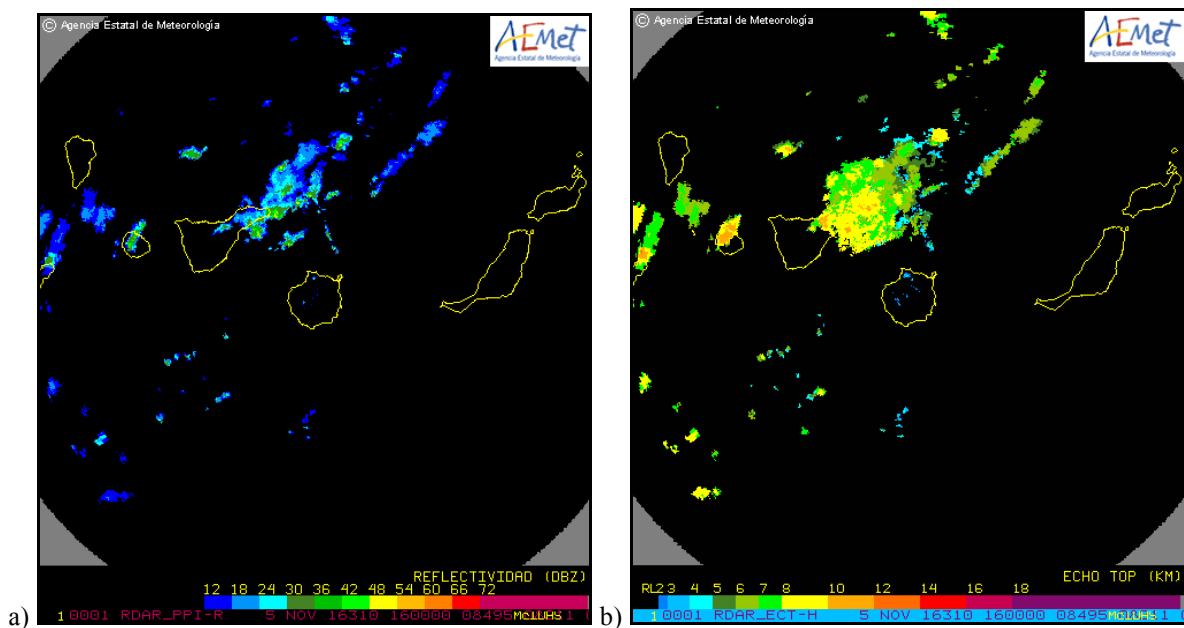


Figura 13: Imágenes del radar de Gran Canaria de las 16Z: a) reflectividad PPI y b) ECHOTOP del 5 de Noviembre de 2016.

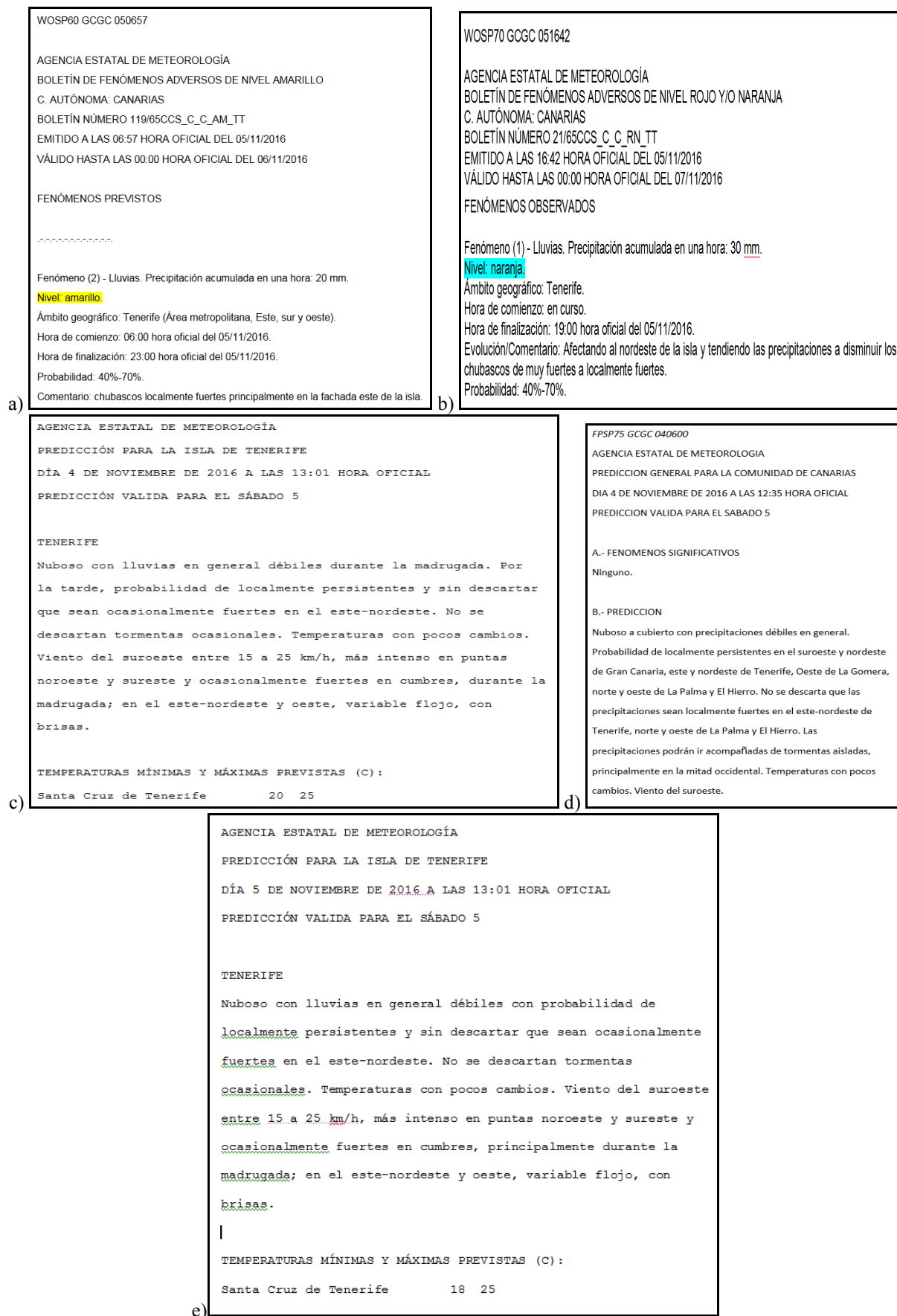


Figura 14: Boletines de predicción válidos para el día 5 de noviembre de 2016 para Tenerife: : a) FMA amarillo (D), b) FMA Naranja observado, c) Boletín de Predicción general para Tenerife (D+1), d) para Canarias (D+1) y e) para Tenerife (D).



Ante los primeros signos de precipitación intensa detectada gracias a la vigilancia radar, en torno a las 16:42Z, se decidió modificar inmediatamente los avisos de FMA. Así se estableció que desde las 16:42Z hasta las 19Z habría vigente un aviso naranja de FMA por precipitaciones intensas observadas de hasta 30mm/h (Figura 14.b). A partir de las 19Z, una vez la convección se esperaba debilitada, se retomará el aviso amarillo por acumulaciones de 20mm/h como venía puesto anteriormente (Figura 14.a).

Al revisarse a posteriori el registro de precipitaciones de la red pluviométrica se comprobó la necesidad (y lo acertado) de haber emitido el aviso FMA naranja para ese intervalo. También se pudieron observar las acumulaciones recogidas en la provincia. En la Figura 15 se muestra el registro de las estaciones con mayor pluviometría. En general en toda la provincia de Santa Cruz de Tenerife se registraron precipitaciones, aunque de diferentes intensidades, como muestra la Figura 16. En la Figura 17 se estima la precipitación total en la zona de Tenerife afectada por las lluvias en el día pluviométrico del 5 de noviembre considerándose la red principal de estaciones de AEMET (Figura 17.a) y la principal más la secundaria (Figura 17.b). Se puede ver que, en cuanto a la pluviometría total de este periodo, las zonas más afectadas también estuvieron en el entorno de San Cristóbal de la Laguna y La Victoria de Acentejo. Según la red global (Figura 17.b) hubo incluso puntos que consiguieron superar a la máxima registrada por solo la red principal (Figura 17.a).

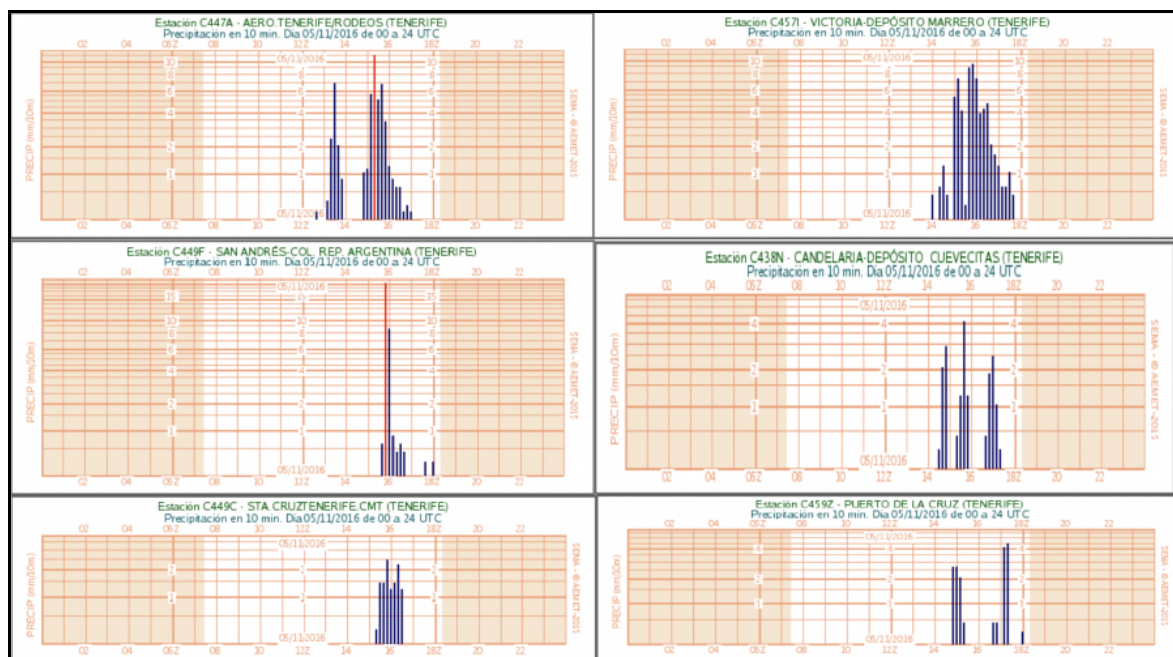


Figura 15: Registro de precipitaciones en 24h (aplicación SEMA) de las estaciones de mayor pluviometría durante el día 5 de noviembre de 2016 de la zona afectada por las lluvias. La línea roja indica intensidades de precipitación momentáneas que superan los 60mm/h (intensidad torrencial).

En el registro total de rayos del evento de la aplicación WebRayos (Figura 18) se ve que la fase de crecimiento y madurez de la tormenta se concentra tierra adentro. Posteriormente, una vez que esta se ha desarrollado, se desplaza mar adentro arrastrada por los vientos dominantes de niveles medios-altos de suroeste.



Figura 16: a) Resumen pluviométrico de las 24 horas del 5 de noviembre de 2016 según la aplicación SEMA (red principal de estaciones) en la provincia de Tenerife y b) código de colores utilizado por la aplicación.

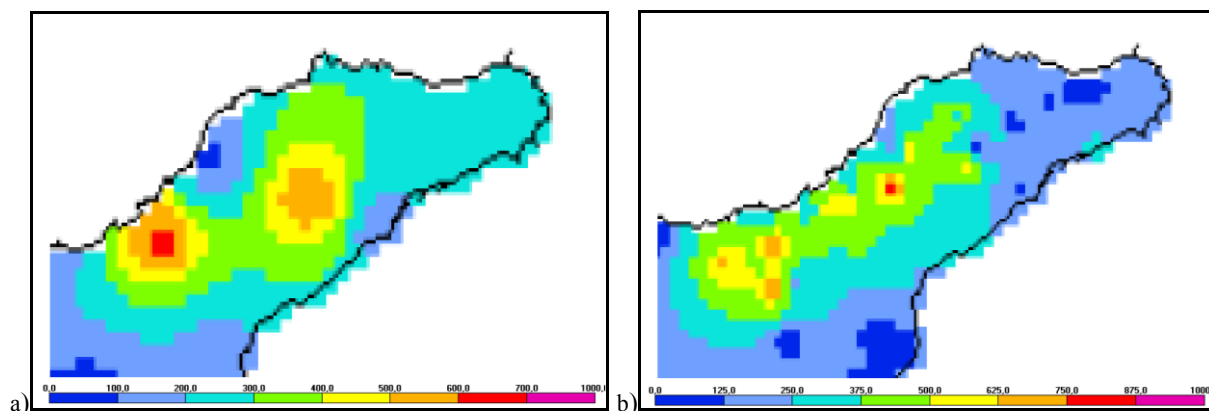


Figura 17: Mapas estimativos de la precipitación total en décimas de milímetros en la zona afectada de Tenerife durante el día pluviométrico del 5 de noviembre de 2016 (7Z a 7Z). Se consideran a) la red principal y b) la red completa de estaciones de AEMET. La red de colaboradores (secundaria) pudo realizar un registro del total diario aun mayor que el de la red principal.

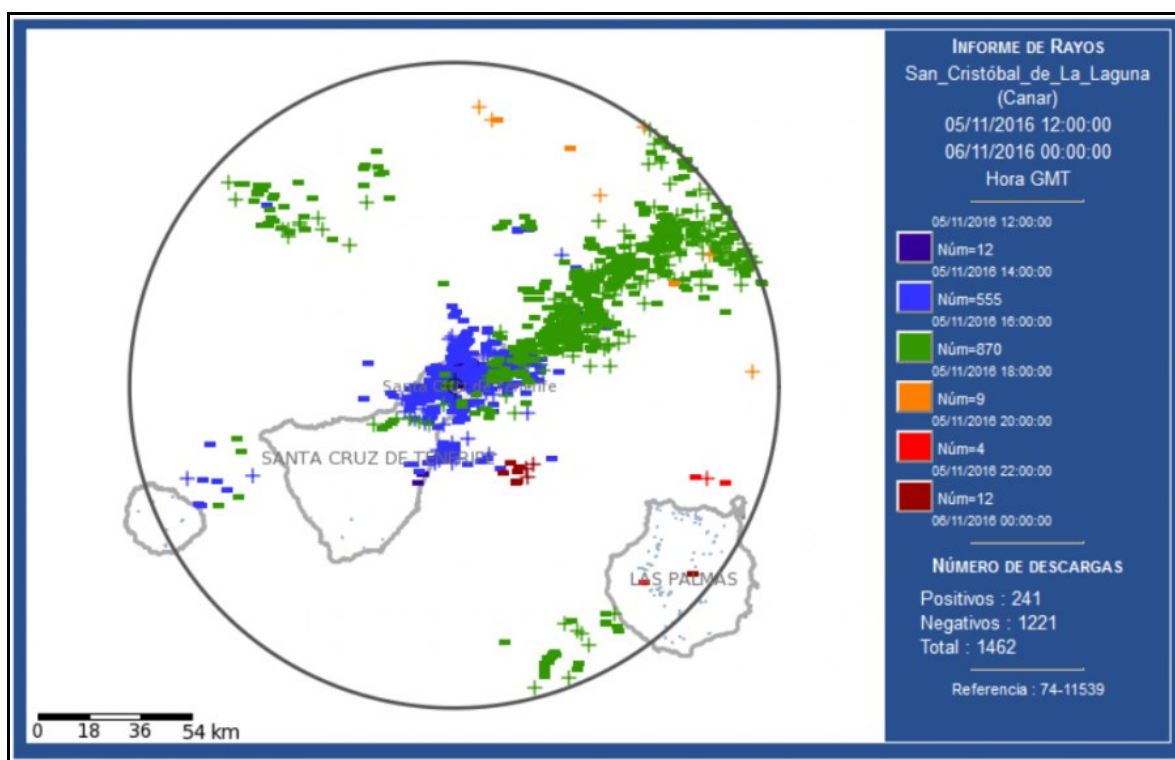


Figura 18: Registro de rayos acumulados en 12 horas en la zona de Tenerife a partir de las 12:00Z del 5 de noviembre de 2019. Las descargas representadas en azul corresponden al intervalo temporal entre las 14:00Z y las 16:00Z, representadas en verde al intervalo entre las 16:00Z y las 18:00Z.

#### 4. ANÁLISIS TÉRMICO Y DINÁMICO VERTICAL DE LA ATMÓSFERA

Prever con antelación y certeza los detalles de un fenómeno convectivo unicelular es, como decíamos anteriormente, realmente difícil aunque sí que es plausible conocer las condiciones de ocurrencia y reforzar entonces la vigilancia. La altura del Teide, un punto singular en la geografía de la zona, ha venido estando mal representada por los modelos quedándose su dimensión muy por debajo de la realidad. Este hecho dificulta una predicción adecuada y en general esta circunstancia es habitual con la orografía montañosa. La configuración local es decisiva en la meteorología local pero no suele ser bien representada por los modelos. Frecuentemente la vigilancia y el conocimiento de situaciones anteriores complementan a la pericia del modelo o al menos ponen sobre especial alerta ante una posible fenomenología adversa.

Tras analizar la secuencia de imágenes de satélite anteriores (Figura 12) se extrae que esencialmente hubo forzamiento térmico. La acumulación de calor diurno es mayor en las laderas soleadas del este que en el terreno llano (*Polvorinos, 2010*). Esto se apoya además en que los distintos desencadenamientos que se aprecian fueron todos más o menos coincidentes con las horas de mayor acumulación superficial de calor. Adicionalmente, el que estas convecciones nacieran sobre las islas o muy cerca y menos sobre el mar resalta el forzamiento orográfico como segundo factor. Por tanto ambos factores, térmico y orográfico, actuaron en conjunto en las islas y en el caso de Tenerife fueron aún más pronunciados que en zonas de alrededor por la mayor elevación que originó que la convección desencadenada fuera más profunda.

Del análisis de las 12Z del HIRLAM de los vientos en superficie (Figura 8) vemos que estos fueron flojos (entre 1.7m/s y 3.3m/s) y de suroeste en el entorno de la isla de Tenerife, con incluso calmas a sotavento. Como observaremos más adelante en el sondeo de las 12Z (Figura 19.b), esto último implica necesariamente convergencia superficial y elevación del aire a sotavento (*Polvorinos, 2010*). Además este hecho se establece muy bien con el cálculo del número de Froude, la relación entre las fuerzas de inercia y gravitatoria que actúan sobre un fluido. En meteorología, en el caso de un obstáculo en el sentido del flujo, se aproxima como  $Fr=U/(N \cdot h)$  siendo  $U$  la velocidad superficial perpendicular al obstáculo,  $N$  la frecuencia de Brunt-Väisälä y  $h$  la altura del obstáculo. La convección a sotavento de un obstáculo tipo montaña aislada, en este caso el Teide, implicaría un cálculo de  $Fr$  menor que 1 (*Polvorinos, 2010*). No obstante en nuestro caso este cálculo de  $Fr$  sólo sería una confirmación de las suposiciones previas y podría obviarse tanto por la gran altura del obstáculo como por la poca intensidad de los vientos. Hay que añadir que hubo pocos cambios en el viento superficial según el sondeo de las 12Z respecto del de las 00Z (Figura 19.a), solo giro ligero a suroeste y ligera reducción de la velocidad del viento, por lo que estas condiciones de convergencia perduraron ese día.

Del registro de rayos (Figura 18) vemos que los primeros tuvieron lugar efectivamente a sotavento del Teide y al este del Valle de la Orotava, para alejarse con las horas hacia el noreste. El núcleo tormentoso se originó por encima la altitud de 545m (altitud de San Cristóbal de la Laguna), a unos 950hPa de presión atmosférica según la atmósfera tipo. En este lugar el terreno hace de plataforma elevada, de unos 15km de ancha y 30km de larga en dirección NE-SW y con una ligera pendiente ascendente hacia el SW (Figura 1). Esta característica del terreno facilitaría la convección por encima suya al actuar de foco elevado de humedad y de calentamiento (*Polvorinos, 2010*).



Finalmente debemos considerar que la orografía del Teide, situado más al suroeste de la zona del evento, es capaz de forzar el ascenso de los vientos de suroeste (barlovento) hasta una altitud unos 2500m o más, el nivel de 750hPa. Este elemento facilita en gran medida la superación de posibles capas de estabilidad, e incluso de inversiones térmicas, de baja altitud, favoreciendo el desarrollo vertical del aire húmedo en aproximación (*Morán, 1984*).

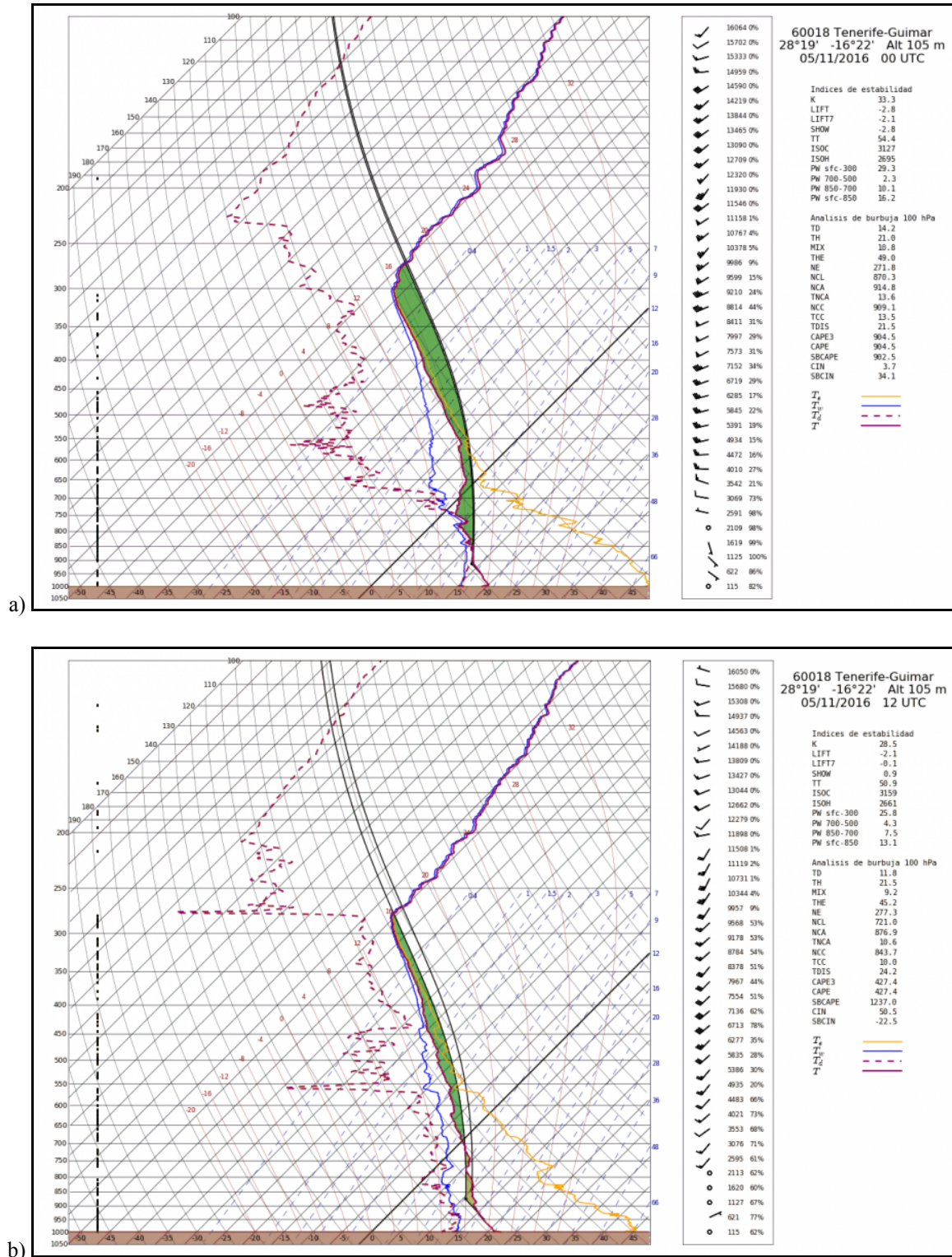


Figura 19: Sondeos de Güimar de las a) 00Z y b) 12Z del 5 de noviembre de 2016.

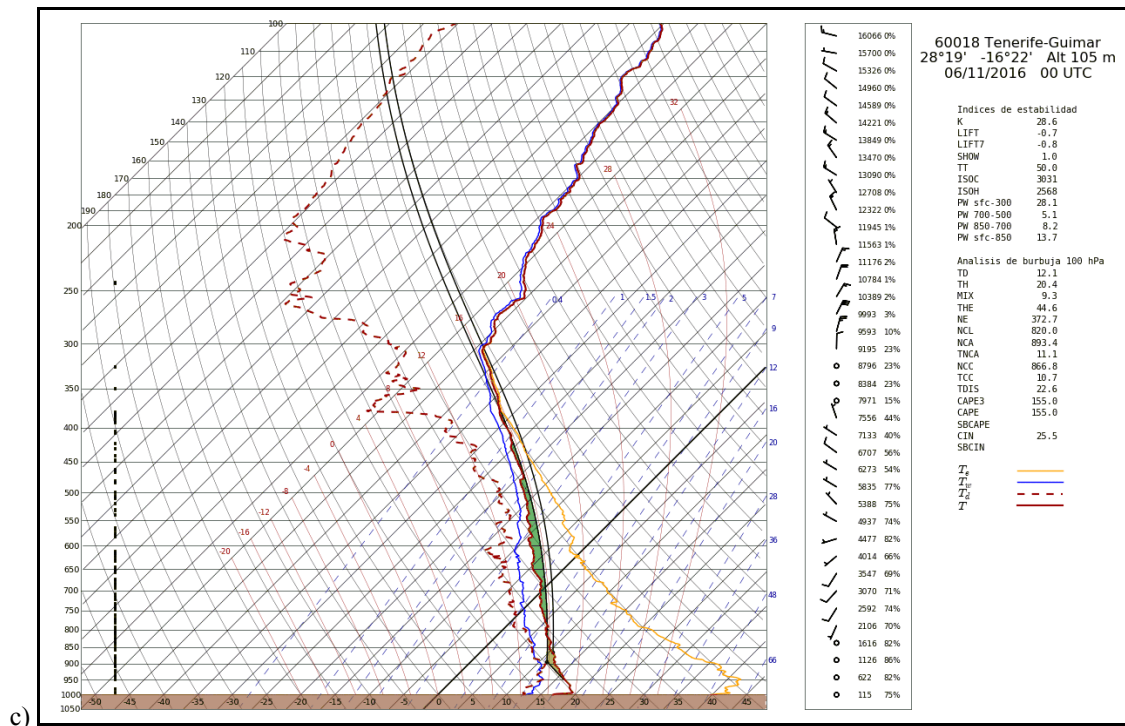


Figura 19: c) de las 00Z del 6 de noviembre de 2016.

Por tanto, de los elementos previos de los que se disponía, y tras su análisis, la convección en sí se suponía muy probable en el nordeste de la isla.

Podemos analizar detenidamente los radiosondeos meteorológicos lanzados aquel día desde Güimar (estación de Tenerife-Güimar con indicativo 60018), mostrados en la Figura 19, que aportan las condiciones termodinámicas verticales de la zona, para extraer conclusiones e intentar confirmar una precipitación más severa que la pronosticada por los modelos.

Lo primero que se observa comparando los sondeos de las 00Z y 12Z del día 5 (Figuras 19.a y 19.b) es que aparentemente el primero muestra una atmósfera más inestable que el segundo. Como se observa, una burbuja de aire en ascenso libre desde superficie se enfría más lentamente que la atmósfera circundante a las 00Z que a las 12Z (*Morán, 1984*). Las áreas verdes de la Figura 19 representan esta libertad térmica de ascenso, y por tanto convección libre, mientras que las zonas marrones representan zonas de subsidencia o retención. De forma aproximada tanto en la Figura 19.a de las 00Z como en la 19.b de las 12Z la convección libre se observa hasta el nivel de 270hPa. En términos cuantitativos el sondeo de las 00Z del día 5 posee muy poco CIN (3.7 J/kg) y mucho más CAPE (904.5 J/kg) que el de las 12Z. Los índices de inestabilidad son también algo más determinantes a las 00Z especialmente el índice K (en torno a 30°C), LI (entre 0°C y -4°C) y TT (más de 40°C) (*Davison et al., 2016*). De hecho a las 00Z se produce algún que otro chubasco local, como en la propia Güimar, pero en general las precipitaciones venían siendo dispersas y no continuas ni intensas. A las 12Z se observa en la baja atmósfera una capa de estabilidad térmica, que no llega a ser inversión, desde superficie hasta los 740hPa aproximadamente, y que en principio actuaría de “tapadera” contra los ascensos de una burbuja de aire libre superficial (CIN = 50.5 J/kg). No obstante, se observa ya a las 12Z la intrusión del núcleo de aire de la borrasca que reparte la humedad en la columna con bajada de las temperaturas en los niveles entre los 700hPa y 400hPa. En general, como decimos, ambos sondeos representan una atmósfera inestable como lo indican los respectivos índices CAPE, K, LI y TT (*Davison et al. 2016*).

A las 00Z del día 5 de noviembre, repartidas en altura, se observan algunas capas de estabilidad o de inversión térmica débil, con una de ellas en superficie (Figura 19.a), que podrían impedir los ascensos libres del aire desde distintas alturas en ausencia de otros forzamientos adecuados (Morán, 1984).

A las 12Z del día 5 de noviembre desde el nivel de 700hPa en altura no existen inversiones (Figura 19.b) y la “tapadera” superficial será superada como veremos por los forzamientos térmico y dinámico en la isla. Tras una observación de este sondeo vemos que existe una importante cizalladura de la intensidad del viento en torno al nivel 770hPa. Entre el nivel de 800hPa y 750hPa hay más de 27,78km/h (15kt) de intensidad de viento frente a la casi calma por debajo. El nivel de 750hPa equivale a unos 2300m de altitud y supondremos que esta es la de comienzo de forzamiento orográfico efectivo para la masa de aire.

Finalmente el sondeo de las 00Z del 6 de noviembre (Figura 19.c) muestra una distribución vertical más parecida a la de las 12Z que a la de las 00Z del día previo. Sigue existiendo una capa estable superficial hasta los 820hPa aproximadamente, con CIN=25.5kg/J y viento en calma, y una capa inestable desde este nivel hasta los 370hPa aproximadamente, con CAPE=155kg/J y vientos flojos. Existe mayor humedad repartida en altura pero la cizalladura vertical es mucho menor que a las 12Z del día 5. El índice LI=-0.7°C es muy bajo lo que indica poca inestabilidad pero como K=28.6°C y TT=50°C existe probabilidad de tormentas locales (Davison et al., 2016). En la isla de Tenerife ya solo se registraron algunas precipitaciones débiles entre las 00Z y las 12Z del día 6. Sí que se registraron algunos chubascos de cierta intensidad de madrugada en la costa sur de Gran Canaria, como se verá.

En la Figura 20 representamos el número de Froude y la frecuencia de Brunt-Väisälä que se obtendrían del sondeo de las 12Z por debajo de 2500m. Toda esta capa baja es en principio ligera y estáticamente estable, pues como veíamos en el sondeo existe una CIN (50.5 J/kg), y del cálculo de los valores del número de Froude ( $<0.25$ ) confirmamos que el aire rodea al obstáculo y converge a sotavento (Polvorinos, 2010). Para estos cálculos se ha usado el sondeo que aporta la web de la Universidad de Wyoming.

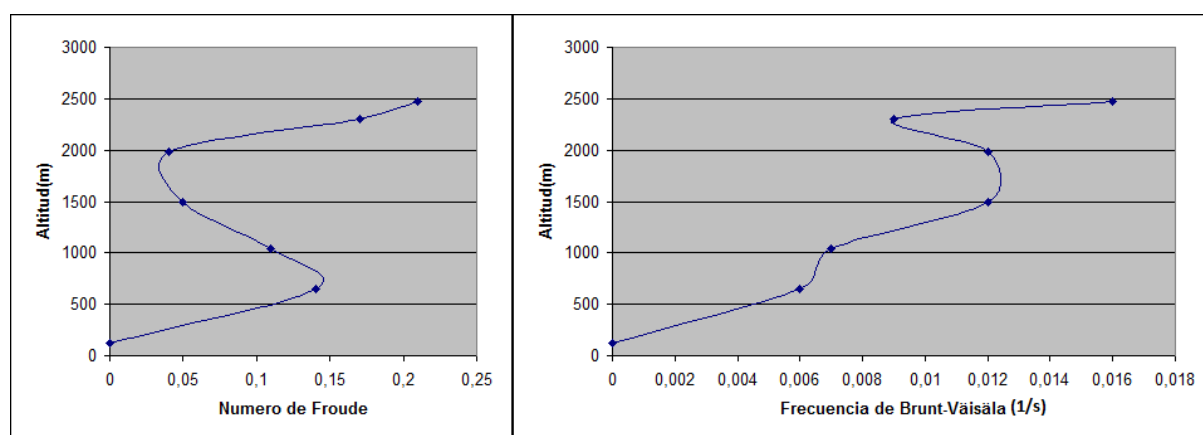


Figura 20: Número de Froude y frecuencia de Brunt-Väisälä según los datos del radiosondeo de Güimar de las 12z del 5 de noviembre de 2016 desde superficie hasta los 2500m.

Para estudiar el posible disparo térmico superficial volvemos a los sondeos de la Figura 19. Observamos que para las 00Z del 5 de noviembre se requiere una temperatura de disparo de 21.5°C al nivel del mar en Güimar para desencadenar convección térmica (Morán, 1984). Esto será muy difícil de conseguir a esa hora de la noche que la media estaba varios grados



por debajo (Figura 21.a) y la superficie tiende a perder calor por radiación (Morán, 1984). Si buscamos en este mismo sondeo la temperatura de disparo a la altitud de La Laguna (545m) esta estaría en torno a 17°C. El registro térmico del Aeropuerto de los Rodeos (Figura 21.b), a pocos kilómetros de La Laguna, marca varios grados por debajo a esa hora. Podemos suponer estas condiciones extendidas en una cierta área de alrededor.

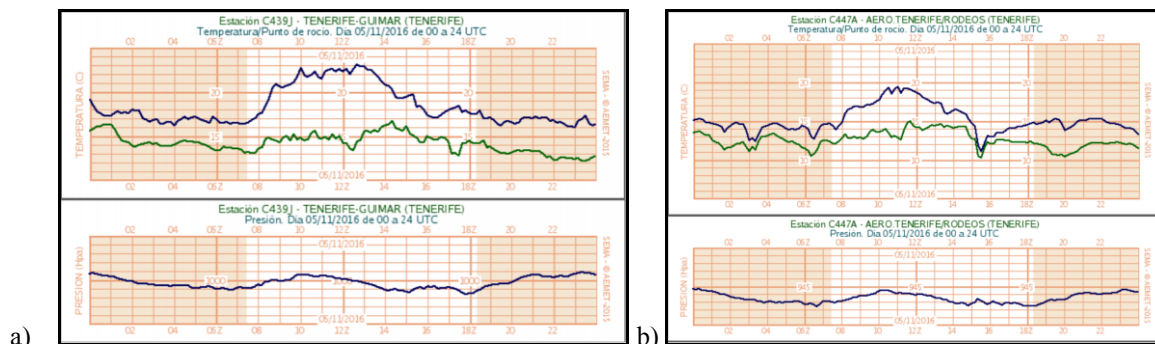


Figura 21: Registros de temperatura y presión barométrica en a) Güimar y b) GCXO del 5 de noviembre de 2016

Las temperaturas no comenzarían a ascender hasta más o menos las 7:30Z (Figura 21), después de la salida del sol. A las 12Z la temperatura de disparo en 1000hPa se sitúa en 24.2°C según el sondeo de Güimar (Figura 19.b), cercana a la máxima que mantuvo este enclave durante varias de las horas centrales del día. Al nivel del Aeropuerto de Los Rodeos el disparo estaría en torno a 19°C, cercana también de la máxima que mantuvo este enclave durante varias horas centrales del día. Considerando que estas condiciones fuesen extensas a la zona nordeste, o al menos a una zona suficientemente amplia, el disparo estaba garantizado en algún punto durante las horas centrales del día. Finalmente a las 00Z del día 6 la temperatura de disparo se coloca en 22.6°C al nivel mar (Figura 19.c), mayor aún que la de las 00Z día anterior, y por tanto aún más difícil de alcanzar. Sin embargo sí que estuvo cerca de las temperaturas de puntos del sur de Gran Canaria, donde se facilitó el desencadenamiento de algunos chubascos cortos de madrugada pero de cierta intensidad (Figura 22).

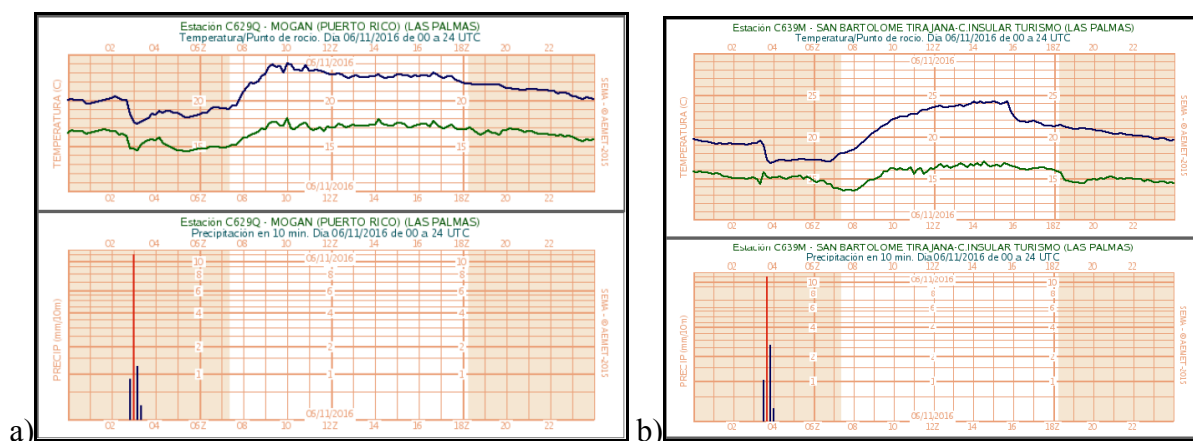


Figura 22: Registros de temperatura y precipitación en a) Mogán y b) San Bartolomé de Tirajana (sur de Gran Canaria) del 6 de noviembre de 2016.

Completando el análisis de los sondeos del día 5 de noviembre (Figura 19) vemos que el isocero húmedo, nivel a partir de donde se podrían ya formar núcleos de hielo en la convección (Rogers, 1977), está en torno a 2700m y el isocero seco en torno a 3150m en ambos. Estos niveles están al alcance de los vientos en ascensos forzados por la isla, por



debajo de la altura total de esta. Recordemos que en el interior de las nubes tormentosas hay una gran cantidad de gotas líquidas subfundidas entre los niveles de 0°C y -4°C (Rogers, 1977). Además ya habría muchas partículas de agua congeladas en el nivel de -10°C (Rogers, 1977). La capa entre 0°C y -10°C, entre los 700hPa y los 550hPa, esta bastante más saturada en humedad a las 12Z y por tanto hay más facilidad de formación de condensación, fundamental para una posterior formación de gotas y desarrollo vertical de la nube, que a las 00Z.

En cuanto al forzamiento dinámico se refiere el viento de baja altura de las 00Z del día 5 de noviembre es flojo en todo momento (Figura 19.a) y el forzamiento orográfico no parece suficiente para elevar el aire lo necesario y generar disparo. El enfriamiento nocturno de la superficie lo inhibe además en parte por lo que una eventual convección, o ascenso suficiente del aire, se percibe aún difícil en estas condiciones de las 00Z.

Más tarde a las 12Z el viento promedio en superficie esta por debajo de 3.3m/s en el entorno de Tenerife (Figura 8) pero del sondeo (Figura 19.b) observamos que a sotavento de Tenerife es más débil, incluso calma, hasta aproximadamente 770hPa. Por encima de este nivel aumenta significativamente existiendo un cizalladura vertical importante, por lo que suponemos la convergencia superficial a sotavento de la isla (Güimar) como veíamos anteriormente. Ciertamente los vientos en niveles altos no son tan intensos a las 12Z respecto a las 00Z, al haberse alejado el chorro de estas latitudes, pero aún así la cizalladura es suficiente como forzamiento de desarrollo vertical (Rogers, 1977). En superficie la mayor racha registrada en Tenerife fue precisamente en Los Rodeos con 53.7km/h (29kt) a las 15:19Z, según el registro METAR (Figura 23), muy cerca de la necesidad de aviso de aeródromo de 30kt (55,56km/h), aunque ya había uno en vigor por tormentas previstas desde las 12Z a las 20Z (Figura 23). El registro METAR muestra finalmente que las precipitaciones en el aeropuerto duraron en torno a dos horas y media con intensidades moderadas o fuertes.

```
GCXO AD WRNG 1 VALID 051200/052000 TS FCST NC=

SPECI GCXO 051341Z 10005KT 050V140 9999 RA FEW012 BKN016 BKN032TCU 16/15 Q1015 NOSIG=
SPECI GCXO 051346Z 10006KT 050V150 9999 TS RA FEW012 BKN016 BKN032CB 16/14 Q1015 NOSIG=
METAR GCXO 051400Z 09004KT 050V130 9999 TS FEW013 BKN023 BKN031CB 16/14 Q1015 NOSIG=
METAR GCXO 051430Z 35004KT 310V020 9000 TS FEW007 BKN019 BKN035CB 16/14 Q1015 NOSIG=
SPECI GCXO 051442Z 36004KT 320V050 9999 1800NW TS RA FEW000 BKN015 BKN020CB 15/14 Q1014 NOSIG=
METAR GCXO 051500Z 32005KT 260V350 9000 2000NW TS RA FEW000 SCT013 BKN026CB 14/13 Q1014 NOSIG=
SPECI GCXO 051505Z 29007KT 260V340 9000 1300NW TS RA SCT000 SCT013 BKN021CB 14/12 Q1015 NOSIG=
SPECI GCXO 051519Z 29019G29KT 0800 R30/1100N TS +RA OVC000CB 11/10 Q1015 NOSIG=
METAR GCXO 051530Z 31012KT 1000 R30/1200U TS RA SCT000 OVC008CB 11/11 Q1015 NOSIG=
SPECI GCXO 051549Z 27007KT 240V300 8000 1300SE TS RA FEW000 SCT016 BKN027CB 13/12 Q1014 NOSIG=
METAR GCXO 051600Z 25008KT 210V280 8000 1300SE TS RA FEW005 SCT015 BKN025CB 12/12 Q1014 NOSIG=
SPECI GCXO 051616Z 25005KT 210V300 9999 4000SE TS DZ FEW005 SCT017 BKN050CB 13/13 Q1015 NOSIG=
METAR GCXO 051630Z 29004KT 250V340 9000 TS -DZ FEW008 SCT017 BKN047CB 13/12 Q1014 NOSIG=
METAR GCXO 051700Z 26008KT 230V290 9999 -DZ FEW015 SCT030 BKN070TCU 14/13 Q1015 RERA BECMGNSW=
```

Figura 23: Avisos de aeródromo y registro de METAR de Los Rodeos (GCXO) durante la tormenta.

En el entorno de Los Rodeos la tormenta duraría en total algo más de dos horas abarcando desde las 13:45z hasta las 16:00Z aproximadamente. La base nubosa de la tormenta debe estar entre los niveles de condensación NCA y NCC (Morán, 1984), los cuales están más bajos a las 00Z que a las 12Z. No obstante a las 12Z dichos niveles están en 876hPa y 843hPa respectivamente, unos 1200m y 1500m según la atmósfera tipo. Al estar por debajo de la mayor altura del relieve, no se limita la efectividad del forzamiento orográfico de las 12Z. Según el registro METAR (Figura 23) de Los Rodeos la base de la convección (TCU o CB) en sus primeros estadios estuvo en torno a 3500ft respecto al aeródromo, unos 1600m

respecto al nivel del mar, cercano al NCC. Además existe siempre una capa casi permanente de cobertura nubosa (SCT o BKN) oscilando en torno a 1700ft alrededor del aeródromo, a unos 1100m sobre el mar, cercano al NCA. En el momento del microreventón de la tormenta, entre la 15:00Z y las 15:30Z previo a la mayor racha, la nubosidad tocaría suelo por la corriente descendente y se acentuarían el viento promedio hasta 35,19km/h (19kt) y las rachas hasta 53,70km/h (29kt) (Figura 23).

## **5. CONCLUSIONES**

La predicción de fenómenos meteorológicos adversos es ciertamente uno de los cometidos más críticos de cualquier servicio meteorológico. Son fenómenos de tal intensidad que generalmente afectan a personas o bienes de manera importante. No obstante, como se sabe que los medios técnicos de predicción actuales tienen sus limitaciones, en cualquier protocolo de predicción meteorológica se ha de considerar la notificación de fenómenos de especial significación no pronosticados y detectados tras la vigilancia atmosférica en tiempo real.

El caso de lluvias intensas del 5 de noviembre de 2016 en Tenerife ejemplifica uno de estos casos: predicción general meteorológica bien trabajada pero donde aparece una intensidad de precipitación difícilmente previsible por los modelos. No obstante el estudio detallado de los radiosondeos meteorológicos, especialmente el observado a la hora nominal de las 12Z, dieron una idea de la potencialidad de una eventual convección. En principio, las condiciones verticales registradas eran aplicables a una zona amplia, no especificándose el momento final ni lugar del evento. Casualmente, como el lugar de ocurrencia de las lluvias es prácticamente el del lanzamiento del sondeo (Güimar), podemos hacer un uso directo de los datos atmosféricos obtenidos para las distintas capas representadas en cada sondeo obteniéndose, si no la causalidad final, mayor información y certeza que el uso exclusivo del modelo en la predicción a muy corto plazo.

El fenómeno quedó bien registrado y el desarrollo nuboso fue profundo y de cierta severidad no sólo por la presencia de la baja sinóptica sino también por el forzamiento térmico y dinámico de menor escala que aportaba la isla. La rapidez de desarrollo de la tormenta manifestó imprescindible el uso de la vigilancia satélite y radar para lanzar un aviso oportuno.

No obstante, a posteriori la prensa se hizo eco precisamente de la falta de previsión de la intensidad de las lluvias y no tanto de la tormenta en sí. Para los medios y el público resultaba extraño que estos avisos de FMA “observados” fuesen parte del sistema de avisos y necesarios en casos donde sólo la vigilancia permanente pone sobre conocimiento. Incluso a nivel político se reclamó la necesidad de una mayor antelación de aviso para este tipo de fenómenos, por lo que hubo de redactarse una nota oficial explicativa del procedimiento de aviso seguido.

## AGRADECIMIENTOS

A los predictores meteorológicos del GPV de Las Palmas, por su profesionalidad, que estuvieron de guardia el día de las lluvias descritas. A los equipos del ATAP y DT de AEMET en Andalucía, entre otras unidades de AEMET, que me han facilitado algunas de las imágenes y registros de datos necesarios para analizar esta situación pasada del tiempo.

## ACRÓNIMOS

AEMET:	Agencia Estatal de Meteorología.
ATAP:	Área de Técnicas Aplicadas a la Predicción.
BDDP:	Base de Datos Digital de Predicción.
BKN:	Broken (Muy nuboso)
CAPE:	Convective Available Potential Energy.
CB:	Cumulonimbus
CEPPM:	Centro Europeo de Predicciones de Plazo Medio.
CIN:	Convective Inhibition Energy.
DANA:	Depresión aislada en niveles altos.
DT:	Delegación Territorial.
ECHOTOP:	Altura de los topos nubosos, ecos de reflectividad de umbral 12dBZ.
EPS:	Ensemble Prediction System.
FMA:	Fenómeno Meteorológico Adverso.
GTD:	Guía Técnica de Diagnóstico.
HIRLAM:	High Resolution Local Area Modelling.
HRV:	High-Resolution Channel.
LI:	Lifted Index.
METAR:	Meteorological Aviation Routine Weather Report.
MSG:	Meteosat Segunda Generación.
MSLP:	Mean Sea Level Pressure.
NCA:	Nivel de condensación por ascenso.
NCC:	Nivel de condensación por convección.
PPI:	Plan Position Indicator.
SABD:	Sección de Archivos y Bases de Datos.
SCT:	Scattered (Dispersas)
SEMA:	Seguimiento de Estaciones Meteorológicas Automáticas.
TCU:	Towering Cumulus (Torrecúmulos).
TT:	Total Totals.

## REFERENCIAS

Davison, M. y Gálvez J. *Índices de inestabilidad*. WPC International Desks (2016)

Martín, F. *Las gotas frías/DANAS. Ideas y conceptos básicos. Nota Técnica STAP n° 38 (2003)*. AEMET.

Morán, F. *Apuntes de termodinámica de la atmósfera (1984)*. INM.

Polvorinos, F. *Curso de meteorología de montaña. Precipitaciones orográficas (2010)*. AEMET.

Polvorinos, F. *Curso de meteorología de montaña. Rodeo o cruce de una barrera montañosa* (2010). AEMET.

Rogers, R. R. *Física de las nubes* (1977). Universidad McGill.

Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos (Plan Meteoalerta).

**[https://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/prediccion/avisos/plan\\_meteoalerta/plan\\_meteoalerta.pdf](https://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/prediccion/avisos/plan_meteoalerta/plan_meteoalerta.pdf)**

Sistema de Información Territorial de Canarias. **<https://visor.grafcan.es/visorweb>**

Sondeos de la Universidad de Wyoming. **<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>**