

La precipitación engelante en España. Observación y predicción

Nota técnica 42 de AEMET

Sergio FERNÁNDEZ GONZÁLEZ

Daniel MARTÍN PÉREZ

Inmaculada ABIA LLERA

Elia DÍEZ MUYO

M.^a Nieves GARRIDO DEL POZO

Aurora ORTEGA GONZÁLEZ

Brunilda PALACIO MONTEMAYOR

Ana PORTILLO JIMÉNEZ-LANDI

M.^a del Mar VALCÁRCEL HERNÁNDEZ



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, 2023

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

NIPO: 666-23-012-4
<https://doi.org/10.31978/666-23-012-4>

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

 @Aemet_Esp

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

La precipitación engelante en España. Observación y predicción

Nota técnica 42 de AEMET

Sergio FERNÁNDEZ GONZÁLEZ¹, Daniel MARTÍN PÉREZ², Inmaculada ABIA LLERA³, Elia DÍEZ MUYO⁴, M.^a Nieves GARRIDO DEL POZO³, Aurora ORTEGA GONZÁLEZ¹, Brunilda PALACIO MONTEMAYOR⁵, Ana PORTILLO JIMÉNEZ-LANDI⁴, M.^a del Mar VALCÁRCEL HERNÁNDEZ⁶

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

¹ Delegación territorial en Cantabria

² Área de Modelización

³ Delegación territorial en Castilla y León

⁴ Área de Atención a Usuarios

⁵ Delegación territorial en Aragón

⁶ Delegación territorial en Murcia

sfernandezg@aemet.es, dmartinp@aemet.es, iabial@aemet.es, ediezm@aemet.es, mgarridod@aemet.es, aortegag@aemet.es, bpalaciom@aemet.es, aportilloj@aemet.es, mvalcarcelh@aemet.es



Madrid, 2023

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. PRECIPITACIÓN ENGELANTE	4
2.1. Fenómenos meteorológicos que dan lugar a engelamiento en superficie	4
2.1.a. Lluvia engelante	4
2.1.b. Gránulos de hielo (<i>ice pellets</i>)	4
2.1.c. Llovizna engelante	4
2.1.d. Cancellada (engelamiento atmosférico)	4
2.2. Mecanismos de desarrollo de precipitación engelante	5
2.2.a. Con capa cálida	5
2.2.b. Sin capa cálida	7
2.3. Frecuencia de ocurrencia en la península ibérica	8
2.4. Casos de precipitación engelante registrados en METAR, SYNOP y SINOBAS	9
3. PRONÓSTICO DEL TIPO DE PRECIPITACIÓN MEDIANTE MODELOS	13
3.1. Modelo HARMONIE-AROME	13
3.2. Modelo ECMWF	16
3.3. Comparación ECMWF con HARMONIE-AROME	18
4. HERRAMIENTAS PARA EL PRONÓSTICO DE PRECIPITACIÓN ENGELANTE	21
4.1. Pronóstico de precipitación engelante durante episodios en los que se prevé capa cálida ..	22
4.2. Pronóstico de precipitación engelante durante episodios sin capa cálida	29
5. CONCLUSIONES	36
6. AGRADECIMIENTOS	37
7. REFERENCIAS	38

RESUMEN

La precipitación engelante consiste en la caída de hidrometeoros en estado líquido en una región en la que la temperatura en superficie es inferior a 0 °C. Al impactar sobre la superficie de los objetos, las gotas se congelan, pudiendo provocar incidencias potencialmente peligrosas en determinadas actividades como en el transporte terrestre, el suministro eléctrico, etc.

En este trabajo se describen los principales mecanismos que dan lugar a este fenómeno. Así mismo se propone una guía de ayuda a su pronóstico, en la que se integran en tiempo real diferentes productos para asistir al predictor en la identificación de este tipo de precipitación, entre ellas un esquema de toma de decisiones. Un elemento clave y novedoso de esta guía son los campos de modelos numéricos que dan información sobre el tipo de precipitación.

Se propone integrar esta guía en la cadena operativa de AEMET, así como revisar determinados procedimientos de observación. Para ello, se presenta un esquema práctico, que incorpora diferentes herramientas meteorológicas, orientado a mejorar la toma de decisiones de los predictores operativos en la evaluación del diagnóstico del riesgo de precipitación engelante. Ello contribuirá a tener un mejor conocimiento del fenómeno, aumentar los registros, validar los pronósticos y, en definitiva, poder facilitar predicciones de precipitación engelante a la sociedad. A pesar de ser poco frecuente, su adecuado pronóstico contribuirá, sin duda, a mejorar la seguridad de vidas y bienes.

Palabras clave: precipitación engelante; cencellada; gránulos de hielo (*ice pellet*); hielo liso; hielo transparente; SINOBAS; HARMONIE-AROME; ECMWF.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la observación y predicción de precipitación engelante surge como un proyecto en AEMET dentro del plan estratégico 2019-21 para dar respuesta a la demanda de ADIF a raíz de los graves incidentes ocurridos durante el duro episodio de frío invernal del 19 de enero de 2017. Este episodio tuvo gran repercusión mediática por las incidencias causadas en el transporte terrestre, tanto por carretera como por ferrocarril. En el caso de este último, provocó el corte de la circulación y el suministro eléctrico en varias líneas de la red convencional y de alta velocidad en la zona de Albacete, provocando que varios trenes con pasajeros permanecieran a la intemperie y sin calefacción ni luz buena parte del episodio.

Durante el proceso de recopilación de los casos de estudio referidos por el usuario, se constata la necesidad de proporcionar información que anticipe situaciones favorables a la generación de precipitación engelante a los responsables de la gestión de los siguientes sectores:

- **Transporte por carretera.** La situación es especialmente peligrosa ya que al formarse una capa de hielo transparente, los conductores no se percatan del riesgo existente. El principal usuario identificado sería la Demarcación de Carreteras del Estado en las comunidades autónomas con áreas de mayor probabilidad de ocurrencia de este fenómeno como Aragón, Navarra, Madrid, Castilla y León, Castilla - La Mancha, y todas aquellas con sistemas montañosos en su ámbito geográfico.
- **Transporte por ferrocarril.** La acumulación de hielo sobre las catenarias o las vías puede impedir el funcionamiento de los trenes durante largos periodos de tiempo. ADIF sería el principal usuario identificado, ya referido al inicio de esta introducción, con presencia en todo el territorio nacional.
- **Red eléctrica.** La acumulación de hielo sobre los tendidos eléctricos puede llegar a provocar cortes eléctricos, e incluso el colapso de las líneas de alta tensión. Red Eléctrica Española es el principal usuario identificado.
- **Otros sectores** a tener en cuenta son las empresas concesionarias para la explotación de estaciones de esquí y las empresas de explotación de parques de energía eólica. La acumulación de hielo puede causar daños sobre infraestructuras, como es el caso de los telesillas o los aerogeneradores.

Otro aspecto importante que se ha puesto de manifiesto es la necesidad de mejorar el conocimiento y predicción del fenómeno con el fin de llegar de forma más efectiva a los usuarios específicos, pero también al público en general y a los medios de comunicación.

Como se ha comentado anteriormente, la lluvia engelante es un fenómeno poco frecuente, pero que provoca graves perjuicios a la sociedad en general. Precisamente por ser inusual y poco conocido, cobra especial relevancia que los procedimientos para su observación y pronóstico estén bien documentados y sean sencillos de aplicar. Una forma de facilitar la puesta en práctica de una técnica que no se utiliza a menudo es, por un lado, conducir la toma de decisiones y, por otra parte, que los elementos que entren en consideración (en este caso, productos meteorológicos) estén todos integrados en un mismo entorno para facilitar su consulta.

El desarrollo del proyecto ha puesto de manifiesto la necesidad de adecuar los procedimientos internos al conocimiento actual del fenómeno y a las nuevas herramientas disponibles (tipo de precipitación estimada por los modelos numéricos de predicción meteorológica). Precisamente,

el desarrollo de los modelos facilita la labor a los predictores en su pronóstico. Sin embargo, es preciso disponer de un banco de observaciones de buena calidad, y en cantidad suficiente, para validar las previsiones. Un aspecto crítico para avanzar en el desarrollo de productos para la predicción de precipitación engelante es homogeneizar las técnicas de observación, de manera que no dependan tanto ni de la pericia del observador, ni del sensor empleado. De hecho, la ausencia de un amplio banco de casos de estudio, unido a su poca frecuencia, ha sido un problema constante para abordar las distintas tareas en este proyecto. El tiempo dirá si es posible automatizar en mayor medida este tipo de pronósticos.

El trabajo se divide en 4 secciones. Tras una primera sección de introducción, las distintas situaciones meteorológicas en que se puede dar este tipo de precipitación se explican en la sección 2. También se encuentran en esta sección una definición de los fenómenos engelantes y distintas estadísticas obtenidas a partir de observaciones.

En el estudio se han utilizado las salidas del HARMONIE-AROME, modelo mesoescalar operativo en AEMET, y del IFS del ECMWF. Estos modelos disponen de un campo de tipo de precipitación, relativamente novedoso, que permite identificar los casos en que se produce precipitación engelante y que se basan en distintos algoritmos. La descripción de estos, así como distintos casos estudiados con las salidas de los modelos, se encuentra en la sección 3.

La sección 4 se dedica a la descripción de la guía de ayuda al pronóstico propuesta para identificar casos de precipitación engelante, facilitando la labor de los predictores.

2. PRECIPITACIÓN ENGELANTE

La precipitación engelante consiste en la caída de hidrometeoros en estado líquido en una región en la que la temperatura en superficie es inferior a 0 °C. Las gotas se congelan al impactar sobre la superficie de los objetos, formando una capa de hielo encima de, por ejemplo, líneas eléctricas, árboles, catenarias ferroviarias, pistas de aeropuertos y carreteras (CALL, 2010). Cuando la precipitación es intensa y/o prolongada se suele denominar tormenta de hielo (*ice storm*, en la terminología anglosajona). En esta nota técnica no se va a tratar el engelamiento en aviones sufrido en vuelo, ya que se centrará en los fenómenos que tienen lugar en superficie.

2.1. Fenómenos meteorológicos que dan lugar a engelamiento en superficie

El engelamiento en superficie se produce por los siguientes fenómenos meteorológicos:

2.1.a. Lluvia engelante

En general se considera lluvia cuando el diámetro de las gotas es superior a 0,5 mm. La lluvia es engelante cuando cae sobre superficies a temperaturas negativas aunque por lo general cercanas a los 0 °C. Suele producirse de forma asociada a frentes cálidos.

2.1.b. Gránulos de hielo (*ice pellets*)

Se trata de pequeños hidrometeoros esféricos y traslúcidos. El escenario es similar al caso anterior, generalmente asociado a la entrada de un frente cálido. Para que se desarrollen gránulos de hielo se requiere de una capa cálida en la que se fundan los cristales de hielo y, por debajo, una capa fría con un espesor suficiente que permita la congelación parcial de los hidrometeoros antes de alcanzar la superficie.

2.1.c. Llovizna engelante

Se define como una precipitación bastante uniforme compuesta por gotas muy finas (con un diámetro inferior a 0,5 mm) pero con una concentración de gotas muy elevada. Está comúnmente asociado a nubosidad de carácter orográfico, cuando el viento incide de forma perpendicular al sistema montañoso. La nubosidad que da lugar a llovizna engelante suele encontrarse a temperaturas entre 0 y -10 °C.

2.1.d. Cencellada (engelamiento atmosférico)

Se produce cuando la base de la nube (generalmente niebla o nubes de carácter orográfico) se encuentra en contacto con la superficie. En este caso el engelamiento suele ser causado por gotitas nubosas sobreenfriadas (es decir, en estado líquido pero a temperaturas inferiores a 0 °C) de diámetro comprendido entre 4-100 μm (CARRIÈRE *et al.*, 2000). Por tanto, la cencellada puede suceder aunque las gotas no alcancen un tamaño precipitable, por lo que estrictamente no se puede considerar precipitación engelante. En este caso, las gotas nubosas son arrastradas por el viento y se congelan al contactar con los objetos, especialmente con los más expuestos al viento. La acumulación de hielo provocada por la cencellada depende de la distribución de tamaños de las gotas, y es directamente proporcional al contenido de agua líquida y a la velocidad del viento (DRAGE y THIIS, 2012).

La lluvia y llovizna engelantes registradas a temperaturas negativas pero superiores a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, suelen dar lugar a la formación de hielo liso. Como resultado, se forma una capa de hielo transparente debido a un proceso de congelación gradual, que permite a las burbujas de aire escapar. Las capas de hielo así formadas se caracterizan por una mayor densidad, y son más difíciles de eliminar.

Por el contrario, la cencellada suele dar lugar a hielo opaco de color blanquecino, ya que las pequeñas gotas nubosas se congelan de forma prácticamente inmediata al contactar con la superficie de los objetos, no dejando tiempo a las burbujas de aire a escapar. También puede producirse con episodios de llovizna engelante a temperaturas muy bajas (generalmente inferiores a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Es un hielo de menor densidad y fácilmente eliminable.

A temperaturas en torno a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y tamaños intermedios de gotas se suele formar hielo mixto, que es relativamente transparente y posee características intermedias entre los dos tipos anteriores.

No hay que confundir la acumulación de hielo en forma de plumas o agujas con las capas de hielo formadas por la caída de precipitación engelante o cencellada. En el caso de las plumas o agujas, la acumulación de hielo se forma por deposición directa de vapor sobre la superficie de un objeto sólido que se encuentra a una temperatura inferior a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este tipo de englamamiento no requiere la presencia de nubosidad, de hecho es más frecuente en noches despejadas debido al enfriamiento radiativo.

2.2. Mecanismos de desarrollo de precipitación engelante

Mediante el análisis de radiosondeos durante episodios de precipitación engelante, se llegó a la conclusión de que este fenómeno meteorológico puede desarrollarse mediante dos mecanismos principales (CARRIÈRE *et al.*, 2000):

2.2.a. Con capa cálida

El primer mecanismo consiste en la congelación de los hidrometeoros en niveles medios o altos de la troposfera, y su posterior fusión al atravesar una región cálida. Posteriormente, las gotas sobreenfriadas se adentran en una capa de inversión térmica próxima a la superficie del terreno, donde las temperaturas se encuentran por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. A la citada capa cálida se la suele denominar *warm nose* por la estructura que presenta el radiosondeo (figura 1). Este primer mecanismo suele ir asociado a la entrada de un frente cálido y a la presencia de una capa de inversión térmica en superficie. Los copos de nieve se derriten en la capa elevada y cálida para formar gotas de lluvia, que en su descenso pasan a estar sobreenfriadas al caer por debajo de la capa de inversión térmica, congelándose al impactar con la superficie. El modelo conceptual asociado a la entrada de un frente cálido sobre una masa de aire muy fría muestra una transición en el tipo de precipitación recogida en superficie, empezando por precipitaciones en forma de nieve, pudiendo pasar por un intervalo de precipitación engelante (más o menos breve según sea de baja la temperatura en superficie de la que se parta) y, finalmente, lluvia cuando la temperatura en superficie supera el umbral de los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. En ocasiones puede registrarse un corto periodo de tiempo en el que caen en superficie *ice pellets*, intercalados entre la precipitación en forma de nieve y la precipitación engelante (FORBES *et al.*, 2014).

El episodio de lluvia engelante registrado en la meseta Norte el 28 de febrero de 2018 se utilizará como ejemplo del mecanismo de desarrollo de precipitación engelante con presencia de capa

cálida (figura 1) a lo largo de esta nota técnica. Durante este episodio se registró precipitación engelante en los METAR de los aeropuertos de Valladolid, León, Burgos y Bilbao. Además de afectar a las operaciones de aterrizaje y despegue en los aeropuertos, también se vio afectado el tráfico por carretera (figura 2).

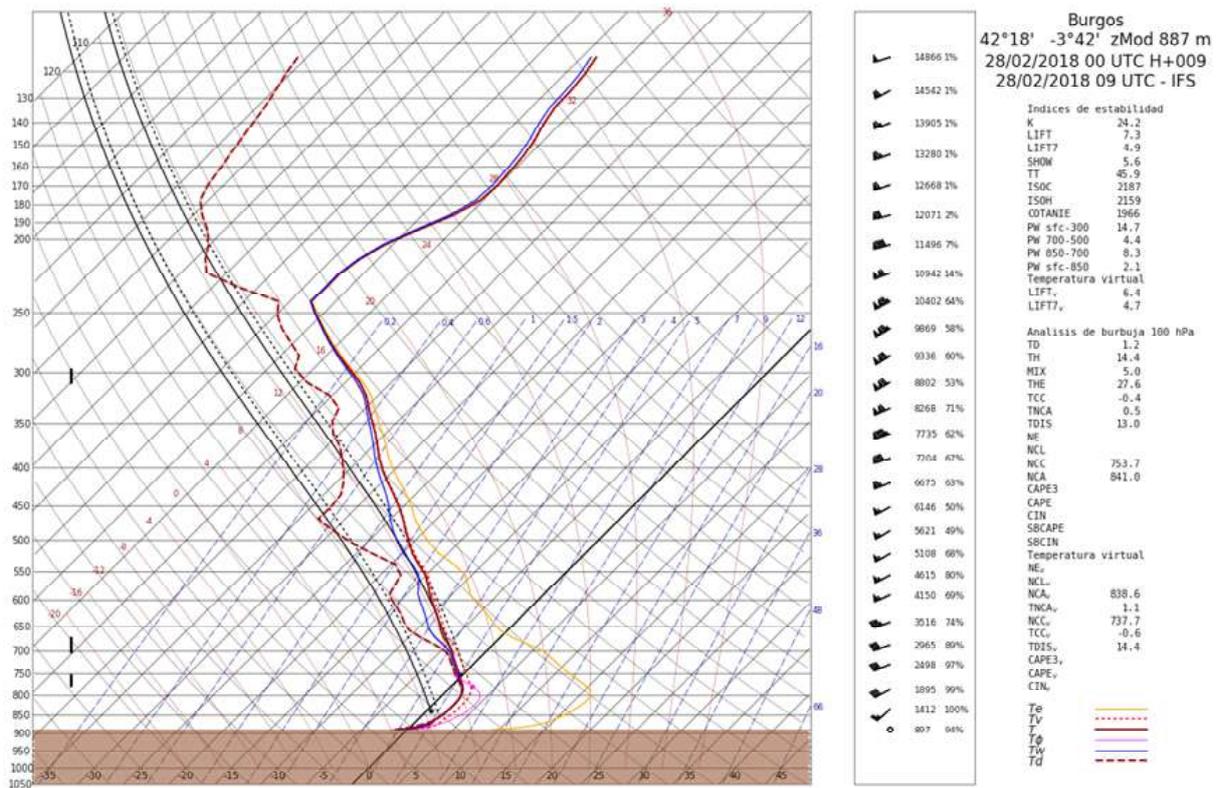


Figura 1. Sondeo pronosticado por el modelo del ECMWF para Burgos a las 09 UTC del 28 de febrero de 2018. Los hidrometeoros en fase sólida se funden al atravesar la capa cálida, dando lugar a precipitación engelante al estar la superficie a temperaturas inferiores a 0 °C.

Figura 2. Reporte en SINOBAS del episodio de lluvia engelante asociado a capa cálida registrado en la meseta el día 28 de febrero de 2018. Este reporte se puede consultar en la siguiente dirección: <https://sinobas.aemet.es/index.php?pag=detal&rep=1488>.

2.2.b. Sin capa cálida

En nubes a temperaturas entre 0 y -15 °C la formación de cristales de hielo es muy poco eficiente y estarán mayoritariamente formadas por gotitas líquidas sobreenfriadas. También en este caso para que la lluvia sea engelante, la temperatura en superficie debe ser inferior a 0 °C. No es necesaria la presencia de un frente, ni que exista una capa con temperaturas superiores a 0 °C (figura 3), ni tampoco la aparición de una capa de inversión térmica en superficie (RAUBER *et al.*, 2000). En este mecanismo, la precipitación engelante se ve favorecida por factores tales como la cizalladura vertical del viento cerca del tope nuboso, la presencia de partículas de sal microscópicas o el forzamiento orográfico. Sin mecanismos de aceleración, el proceso de coalescencia es mucho más lento (del orden de una hora para alcanzar gotas de tamaño precipitable). Este mecanismo suele estar asociado a llovizna engelante y cencellada. STRAPP *et al.* (1996) señalan que aproximadamente el 75 % de los episodios de precipitación engelante tienen su origen en este segundo mecanismo.

Las gotas de agua pueden permanecer en estado líquido a temperaturas por debajo de 0 °C. Esto es debido a desequilibrios entre el aporte de contenido de agua líquida por condensación y la velocidad de nucleación, ya que este segundo proceso es mucho más lento (RAUBER y TOKAY, 1991). Además, para que tenga lugar la nucleación se debe superar una barrera de energía libre (ROGERS, 1993). Esto provoca que la nucleación homogénea de cristales de hielo requiera sobresaturaciones muy elevadas, de forma que no tiene lugar en cantidades significativas en la atmósfera hasta temperaturas en torno a -40 °C, cuando aumenta la eficiencia de este proceso. Para facilitar el proceso de congelación es necesaria la presencia de determinadas partículas denominadas núcleos de congelación, que presentan una morfología similar a la estructura de cristalización del hielo, y que participan en el proceso denominado nucleación heterogénea. Sin embargo, la eficiencia del proceso de nucleación es muy reducida a temperaturas por encima de -10 °C, ya que la mayor parte de las partículas que actúan como núcleos de congelación necesitan temperaturas más bajas para activarse (HUFFMAN y NORMAN JR., 1988). A este hecho hay que añadirle que la concentración de núcleos de congelación es varios órdenes de magnitud inferior a la concentración de los núcleos de condensación. Como consecuencia, las nubes cuya cima se encuentra a temperaturas superiores a -15 °C permanecen mayoritariamente en fase líquida, mientras que los hidrometeoros en fase sólida predominan en nubes cuya cima se encuentra a temperaturas inferiores (KOROLEV *et al.*, 2003).

El evento de llovizna engelante que tuvo lugar el 2 de febrero de 2018 en la vertiente norte de la sierra de Guadarrama se utilizará como ejemplo del mecanismo de desarrollo de precipitación engelante sin presencia de capa cálida (figura 4). Este episodio obligó a cerrar durante horas las autopistas AP-51, AP-6 y AP-61 y la autovía A-1 entre las provincias de Madrid y Segovia.

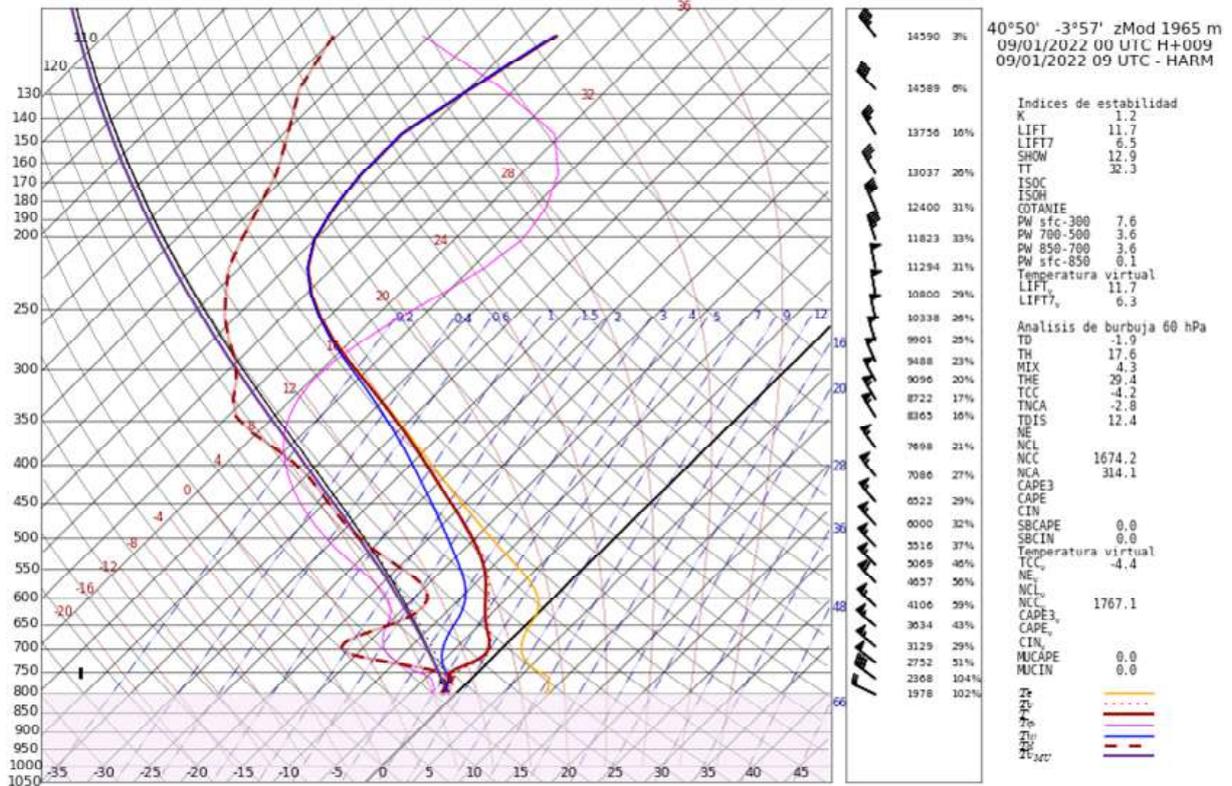


Figura 3. Sondeo pronosticado por el modelo del ECMWF para la sierra de Guadarrama a las 09 UTC del 9 de enero de 2022, durante un episodio de llovizna engelante. Todo el perfil se halla a temperaturas inferiores a 0 °C, sin presencia de capa cálida.



Figura 4. Reporte en SINOBAS del episodio de llovizna engelante, sin capa cálida, registrado en la sierra de Guadarrama el día 2 de febrero de 2018. Este reporte se puede consultar en la siguiente dirección: <https://sinobas.aemet.es/index.php?pag=detal&rep=1054>.

2.3. Frecuencia de ocurrencia en la península ibérica

Aunque los episodios de precipitación engelante son más habituales en latitudes más altas, la península ibérica no se encuentra exenta de episodios de precipitación engelante, siendo más frecuentes en los sistemas montañosos, especialmente a altitudes elevadas.

A escala sinóptica, el mayor riesgo de precipitación engelante tiene lugar cuando un frente cálido (normalmente asociado al desplazamiento de la masa de aire marítima subtropical) se desplaza sobre una masa de aire mucho más fría (generalmente suele ser una masa marítima ártica o continental polar). En nuestras latitudes este es el mecanismo que mayoritariamente ocasiona episodios de precipitación engelante en zonas de altitudes moderadas (es más probable en ambas mesetas, Navarra, Llanada Alavesa, valle medio y alto del Ebro y otras regiones favorables a la retención de aire frío y consecuente formación de inversiones térmicas) siendo menos probable en altitudes cercanas al nivel del mar, aunque en todo caso son episodios muy poco frecuentes.

Otra situación durante la cual se puede producir englamamiento en superficie es a barlovento de sistemas montañosos, cuando vientos húmedos inciden de forma perpendicular a la barrera orográfica. De existir suficiente humedad y corrientes verticales ascendentes intensas se puede producir precipitación, que sería engelante en el caso de haber temperaturas negativas en superficie.

Aunque no se produzca precipitación, si la base de las nubes orográficas se encuentra por debajo de las cimas de las montañas, existirá riesgo de cencellada a altitudes situadas por encima de la isocero en la atmósfera libre. En la Península, estos episodios afectan a las laderas de barlovento de los principales sistemas montañosos. Así mismo, la cencellada es relativamente frecuente en zonas de valles interiores y la meseta Norte durante los meses invernales en situaciones anticiclónicas, de forma asociada a episodios de nieblas radiativas.

2.4. Casos de precipitación engelante registrados en METAR, SYNOP y SINOBAS

Para este trabajo se han analizado los partes METAR y SYNOP emitidos en España durante el periodo 2000-2020, y se han seleccionado los METAR en los que se registró lluvia o llovizna engelante, y los SYNOP con presencia de los siguientes fenómenos engelantes:

- llovizna débil congelándose
- llovizna moderada o fuerte congelándose
- lluvia débil congelándose
- lluvia moderada o fuerte congelándose

Las páginas siguientes muestran la detección temporal en cada mes durante todo el periodo y en las distintas estaciones de medida. Así, la tabla 1 y la figura 5 reflejan la ocurrencia temporal del fenómeno, mientras que las gráficas 6, 7 y 8 se refieren a la detección espacial.

De acuerdo a la distribución mensual de METAR con precipitación engelante en el periodo 2000-2020 (tabla 1 y figura 5), el mes en el que más boletines registraron precipitación engelante fue febrero. Le siguen, por este orden: diciembre y enero, marzo y, finalmente, abril y noviembre. La distribución mensual de boletines SYNOP con registro de fenómenos engelantes (número de boletines en un mes concreto teniendo en cuenta todo el periodo) es mayor en febrero, seguido por diciembre y marzo, enero, noviembre y abril. Por tanto, la distribución temporal de la detección de precipitación engelante (o de fenómenos relacionados) es muy similar en METAR y en SYNOP si bien el número de registros de precipitación engelante en SYNOP es mayor que en los METAR, entre otras razones porque hay más observatorios del primer tipo.

		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
METAR	TOTAL	9	14	2	1							1	10
	Porcentaje (%)	24,3	37,8	5,4	2,7							2,7	27,0
SYNOP	TOTAL	24	46	26	16	3	5		2	4	9	18	26
	Porcentaje (%)	13,4	25,7	14,5	8,9	1,7	2,8		1,1	2,2	5,0	10,1	14,5

Tabla 1. Distribución mensual de boletines METAR con registro de precipitación y llovizna engelante (parte superior, en azul) y SYNOP con presencia de fenómenos engelantes (parte inferior, en verde) para el periodo 2000-2020. Los porcentajes se refieren al número de casos por mes, respecto al total del periodo analizado.

Número de METAR acumulado por mes (2000-2020)

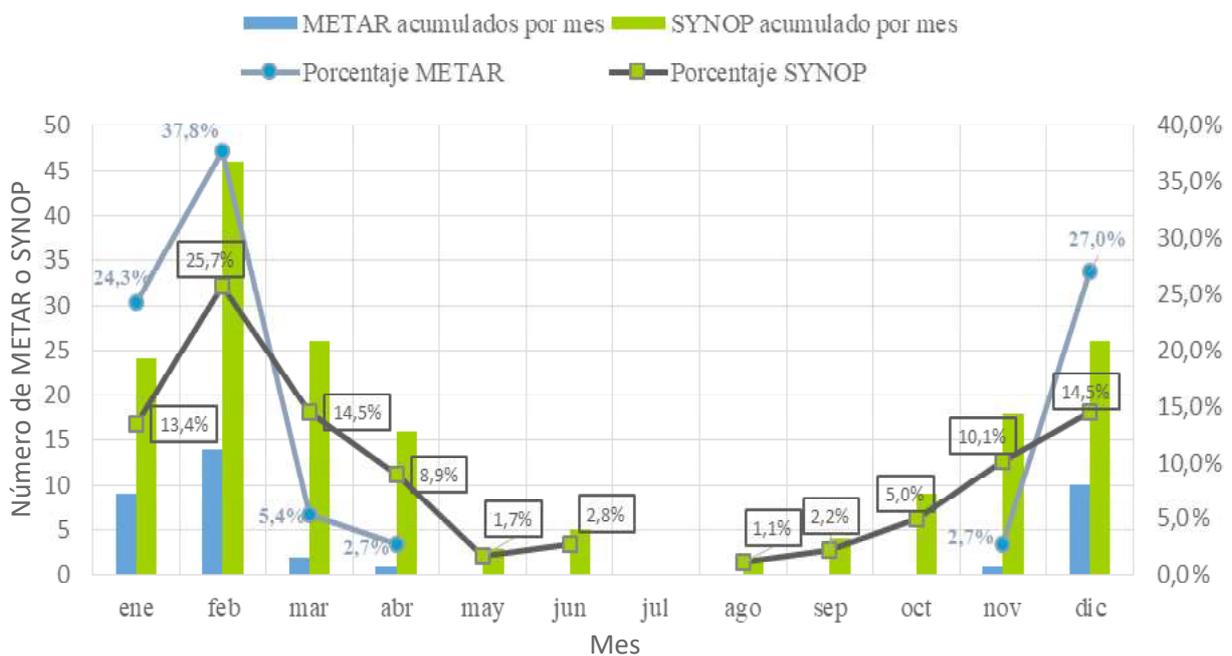


Figura 5. Número de días con METAR y SYNOP por mes en el periodo 2000-2020 con registro de algún tipo de precipitación engelante.

En cuanto a la distribución espacial, la figura 6 recoge los aeródromos en los que hubo más días con registro de lluvia o llovizna engelante en METAR, dentro del periodo 2000-2020. Hay que tener en cuenta que la frecuencia y horario de emisión de METAR depende de cada aeródromo,

Días con FZRA y FZDZ en METAR, por aeródromos (2000-2020)

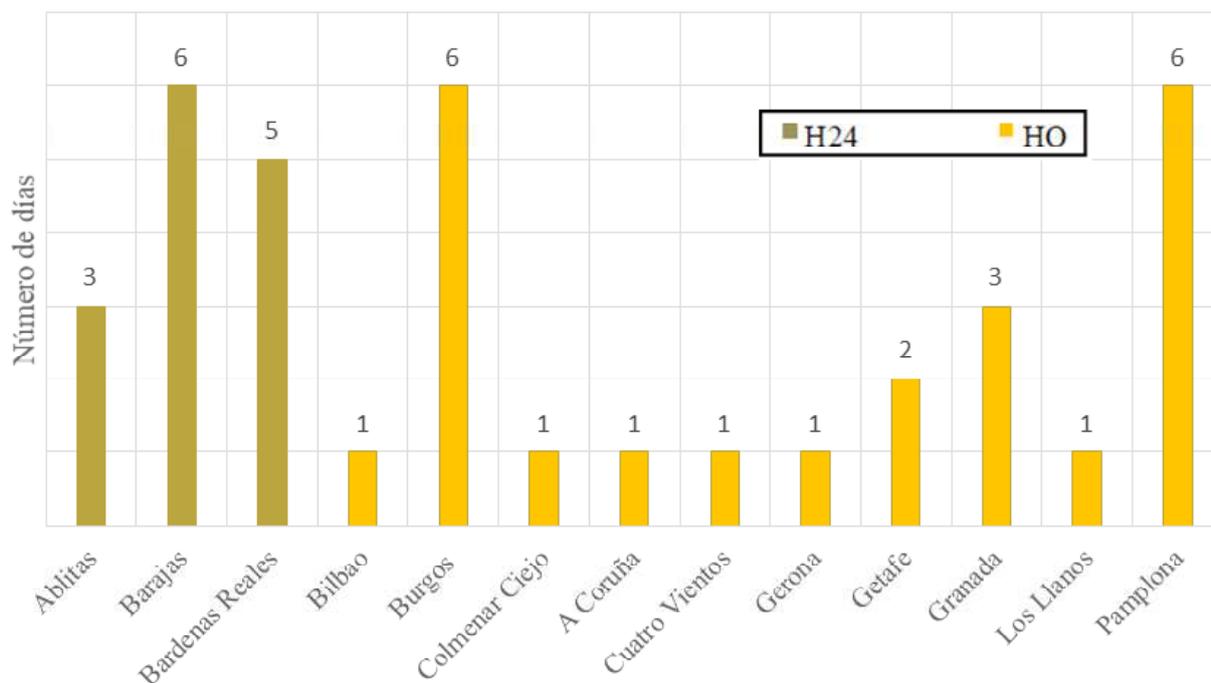


Figura 6. Número de días con registro de lluvia y llovizna engelante en METAR (FZRA y FZDZ, respectivamente), según aeródromos (2000-2020), teniendo en cuenta el horario de apertura de cada aeródromo (H24: abierto las 24h, HO: Horario operativo).

que puede estar abierto dentro de un horario determinado (HO: horario operativo), o durante las 24 horas (H24). La heterogeneidad en los horarios de observación no permite realizar ninguna estadística.

Los procedimientos de elaboración de los METAR no son similares, ya que se mezclan los manuales con los automáticos. En los campos de prácticas (Bardenas y Ablitas) siempre se han emitido de forma automática, y en el resto casi siempre han sido de forma manual, si bien hay cuatro casos de precipitación engelante que proceden de METAR AUTO, concretamente tres en Granada-Jaén (LEGR) y uno en Barajas (LEMD).

La distribución geográfica de los SYNOP con registro de precipitación engelante se representa en la figura 7, donde destaca la detección en Navacerrada. La causa de que el Observatorio de Navacerrada sea donde más episodios de precipitación engelante se han registrado es debido a que es la localización a más altitud (1894 m) desde la que se realizan SYNOP en España, sin tener en cuenta los observatorios de alta montaña.

Por citar algunas localidades, aparte de Navacerrada, los observatorios con más días con registros de precipitación engelante en SYNOP son: Ponferrada, Madrid, Zamora y Segovia.

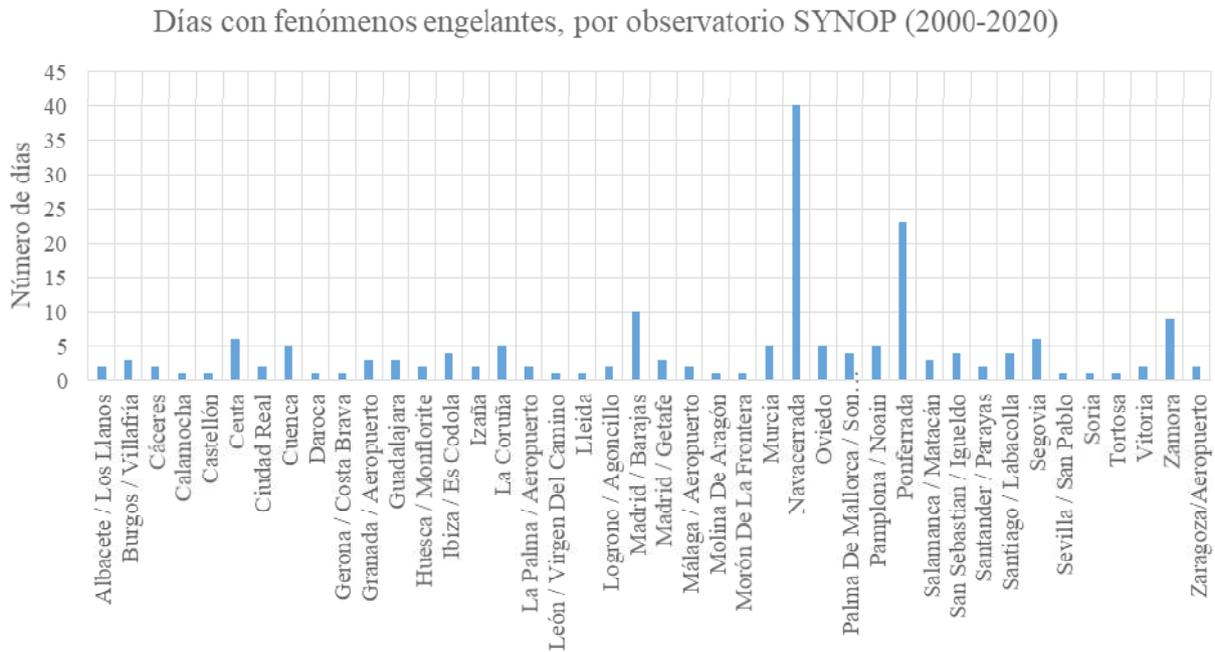


Figura 7. Número de días de SYNOP con registro de precipitación engelante en diferentes observatorios para el periodo 2000-2020.

La figura 8 representa el número de días con fenómenos engelantes registrados en SYNOP emitidos desde observatorios de alta montaña. En este tipo de observatorios solo emiten parte NIMET a las 08 UTC, aunque unos pocos casos lo emiten también a las 13 UTC, por lo que la frecuencia de observación es menor que en los SYNOP convencionales. Por este motivo las figuras 7 y 8 no son comparables.

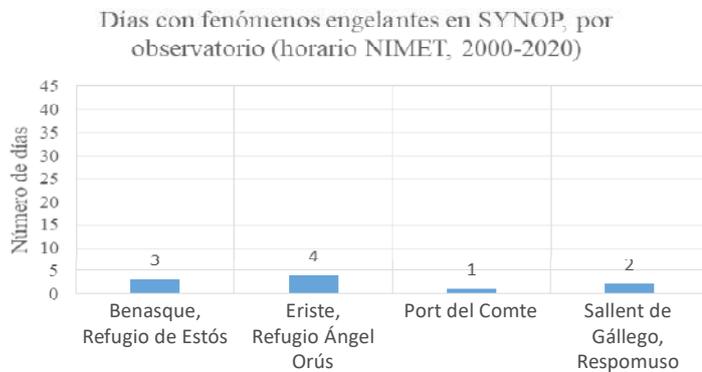


Figura 8. SYNOP registrados en observatorios con horario NIMET.

Otra fuente de datos utilizada para recabar información sobre episodios de precipitación engelante ha sido SINOBAS (Sistema de Notificación de OBServaciones Atmosféricas Singulares, <http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/sinobas>). Cabe remarcar que son muy escasos los reportes en SINOBAS de precipitación engelante, lo que es coherente con la baja frecuencia de este fenómeno meteorológico en nuestras latitudes.

Debido a la heterogeneidad de las fuentes utilizadas, las diferentes frecuencias de observación, los distintos procedimientos utilizados y la escasez de datos, no es posible realizar una estadística que permita extraer conclusiones relevantes sobre la ocurrencia temporal y espacial del fenómeno. Es importante, por tanto, revisar los procedimientos de observación, completar la formación del personal colaborador y promover campañas invernales específicas que permitan mejorar el conocimiento de este fenómeno.

3. PRONÓSTICO DEL TIPO DE PRECIPITACIÓN MEDIANTE MODELOS

3.1. Modelo HARMONIE-AROME

El modelo HARMONIE-AROME es el operativo en AEMET desde junio de 2017. Hasta el 12 de septiembre de 2021 la versión operativa del modelo era la 40h11, desde entonces se instaló la versión 43h211. Para este estudio se han utilizado las salidas de la primera versión del modelo (40h11). Una descripción de este modelo se puede encontrar en CALVO *et al.* (2018).

La parametrización de los procesos de microfísica utilizada en el modelo HARMONIE-AROME se denomina ICE3 porque implica tres tipos de variables de hielo: cristales de hielo, nieve y *graupel* (que denominaremos nieve granulada aunque incluiría otros tipos de precipitación sólida). Los campos tridimensionales de intensidad de nieve e intensidad de nieve granulada, además del campo intensidad de lluvia, se van a utilizar para determinar el tipo de precipitación.

El algoritmo que determina el tipo de precipitación en HARMONIE-AROME (BONEKAMP y TJM, 2017) emplea, además de los campos mencionados anteriormente, los campos de temperatura a dos metros, altura y espesor de las nubes estratiformes y nubosidad media por encima de las nubes estratiformes y la integración vertical de la nieve granulada. En la tabla de contingencia del algoritmo de precipitación (tabla 2) se describen las condiciones para determinar cada tipo de precipitación. Se considera un total de ocho tipos de precipitación, que son: lluvia, llovizna, nieve, nieve granulada, aguanieve, lluvia engelante, llovizna engelante y granizo. Como se observa en la tabla, la intensidad total de precipitación debe ser superior a 0,1 mm/h para que se cifre cualquier tipo de precipitación. La razón de lluvia respecto a la precipitación total permite distinguir entre los tipos de precipitación líquida (lluvia o llovizna) y sólida (nieve o nieve granulada). La llovizna además requiere presencia de una nube estratiforme en niveles bajos sin capas de nubes por encima. Para obtener precipitación engelante es indispensable que la temperatura a 2 metros sea inferior a 0 °C. Por otra parte, en caso de que las condiciones sean compatibles con más de un tipo de precipitación se cifraría el que se considera más dañino en este orden: granizo, llovizna engelante y lluvia engelante.

	r+g+s (mm/h)	r/(r+g+s) (mm/h)	s/g+s (mm/h)	Temp. a 2 m (K)	Base de la nube (m)	Espesor de la nube (m)	Cob. nub.	vintg (kg/m ²)
Lluvia	≥ 0,1	≥ 0,8						
Llovizna	≥ 0,1 & ≤ 0,3	≥ 0,8			≤ 300	≥ 500	≤ 0,4	
Nieve	≥ 0,1	< 0,2	≥ 0,025					
Nieve granulada	≥ 0,1	< 0,2	< 0,025					
Aguanieve	≥ 0,1	< 0,8 & > 0,2						
Lluvia engelante*	≥ 0,1	≥ 0,025		< 273,15				
Llovizna engelante*	≥ 0,1 & ≤ 0,3	≥ 0,025		< 273,15	≤ 300	≥ 500	≤ 0,4	
Granizo*	≥ 0,1							≥ 16

* sobrescribe las opciones anteriores

Tabla 2. Algoritmo de tipo de precipitación del modelo HARMONIE-AROME. Cada tipo de precipitación se identifica de la siguiente forma: r: intensidad de lluvia, rain intensity / g: intensidad de nieve granulada, graupel intensity / s: intensidad de la nieve, snow intensity / Cob. nub.: nubosidad media sobre la capa de nubes / vintg: integración de nieve granulada en la vertical, vertical integration of graupel.

En la figura 9 se muestran los campos de tipo de precipitación, temperatura a 2 metros, intensidad de la lluvia e intensidad de nieve para un alcance de 3 horas del modelo HARMONIE-AROME y la pasada de las 00 UTC del día 28 de febrero de 2018. En este día se dio un episodio de lluvia engelante con capa cálida que afectó a la mitad norte de la península ibérica. En las imágenes de intensidad de nieve y lluvia se aprecia la transición de un tipo de precipitación a otro a medida que el frente avanza. En la zona donde la temperatura a 2 metros es inferior a cero y se produce precipitación en forma de lluvia, esta se considera lluvia engelante.

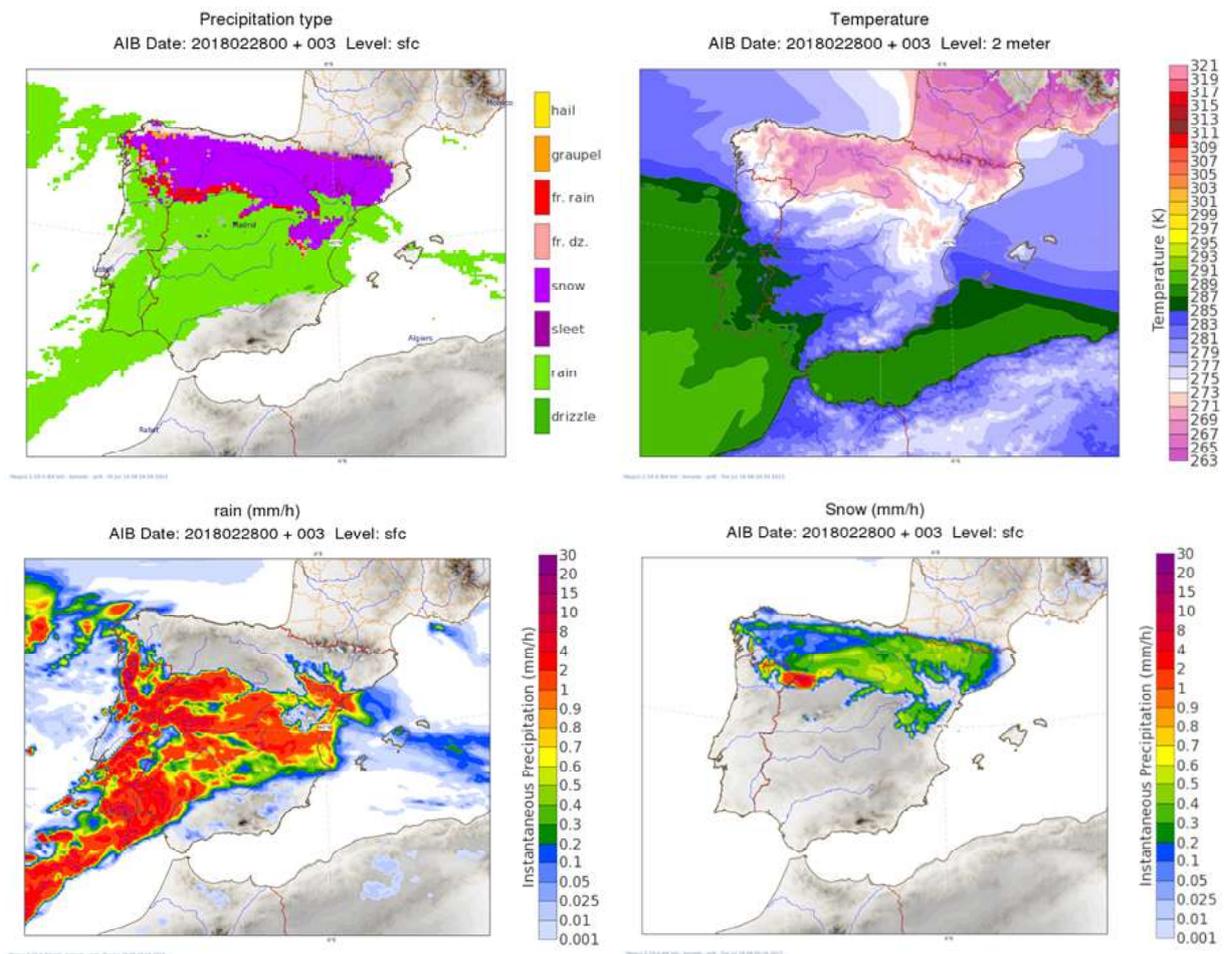


Figura 9. De izquierda a derecha y de arriba abajo, campos de tipo de precipitación, temperatura a 2 metros, intensidad de la lluvia e intensidad de la nieve correspondientes al alcance de H+03 horas del modelo HARMONIE-AROME y la pasada de las 00 UTC del día 28 de febrero de 2018.

El código de colores correspondiente al tipo de precipitación es el siguiente:
 amarillo: granizo / naranja: graupel / rojo: lluvia engelante / rosa: llovizna engelante / morado: nieve / granate oscuro: aguanieve / verde claro: lluvia / verde oscuro: llovizna.

Otro caso de precipitación engelante, ahora sin capa cálida, al norte de la sierra de Guadarrama, se muestra en la figura 10. En esta ocasión fue necesario el cierre de carreteras debido a la formación de hielo, como la AP-6 entre Madrid y Segovia, entre los kilómetros 47 y 80, además de la AP-61, del kilómetro 62 al 88, entre los municipios segovianos de El Espinar y Ortigosa del Monte, y la A-1, en el municipio segoviano de La Rades (sentido Madrid), a la altura del puerto de Somosierra (fuente: <https://www.elmundo.es/espana/2018/02/02/5a740e96e2704e901f8b4618.html>).

LA PRECIPITACIÓN ENGELANTE EN ESPAÑA. OBSERVACION Y PREDICCIÓN

En este caso, la precipitación engelante dada por el modelo se limita a la zona montañosa. Es posible que la extensión del fenómeno no esté reflejada bien por el modelo teniendo en cuenta las consecuencias que tuvo para el tráfico. Esto puede ser debido a una subestimación de la precipitación de la lluvia o a considerar un límite inferior demasiado exigente (0,1 mm/h) para el cifrado del tipo de precipitación. Siendo la temperatura inferior a 0 °C en toda la meseta Norte, un incremento en la extensión de la intensidad de la lluvia conllevaría que la precipitación engelante se extendiera a zonas más bajas.

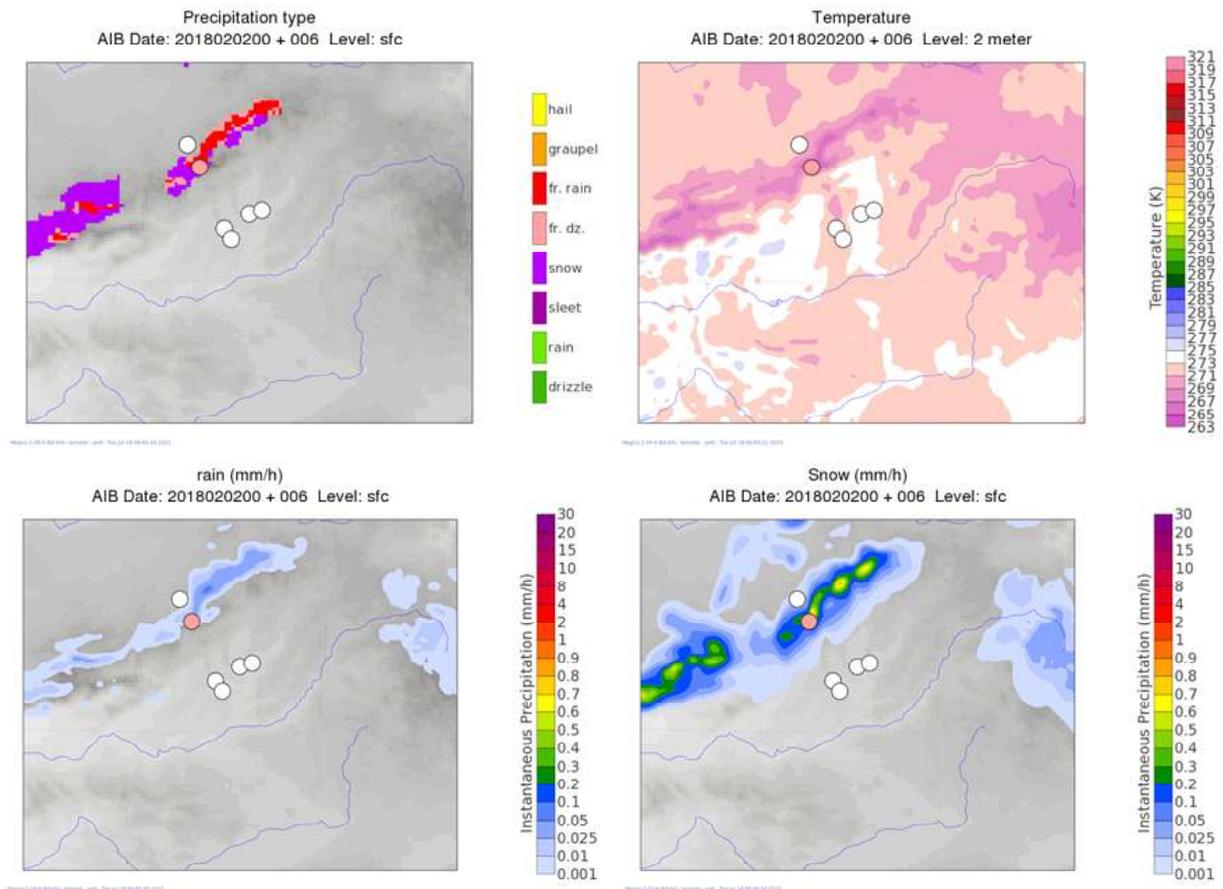


Figura 10. Misma descripción que en la figura 9, salvo que corresponde a un área del centro de la Península para la pasada de las 00 UTC del día 2 de febrero de 2018 y un alcance de H+06 horas.

Se incluyen también localización de la estación de Navacerrada, que registró precipitación engelante, y de los aeropuertos que emitieron METAR a esa hora marcados con el color del código correspondiente al tipo de precipitación cifrado en el boletín.

Una buena predicción de la precipitación engelante depende de la pericia del modelo para predecir las variables implicadas: temperatura a 2 metros, precipitación en forma de lluvia y en forma de nieve. Aunque el modelo presenta un buen comportamiento a la hora de predecir estas variables, tiene un cierto sesgo positivo en la temperatura durante los meses de invierno para el intervalo de temperaturas de -5 °C a 0 °C, con lo cual podría subestimarse la precipitación engelante en ocasiones, a pesar de que en estos meses la predicción es más acertada para temperaturas cercanas a 0 °C. En primavera la predicción de temperaturas no es tan precisa. De todas formas, estos son resultados generales para toda la Península; en cada región, la predicción presenta particularidades diferentes.

Dado el escaso número de casos de precipitación engelante registrados, no se han dado casos de acierto del modelo, por tanto no ha sido posible realizar una verificación puntual del fenómeno. Comparando con los registros de los METAR para días en los que se observó precipitación engelante, se ha encontrado que, con el algoritmo utilizado, los eventos de llovizna se subestiman, también los de nieve, aunque en menor medida, mientras que los eventos de lluvia se sobrestiman.

El modelo se ha ejecutado para un total de 24 días entre enero de 2017 y marzo de 2020 en los que se registró precipitación engelante en boletines METAR y/o SYNOP. Se ha contabilizado para cada punto de la rejilla del modelo el número de veces en que se produjo este tipo de precipitación en las salidas horarias para todas las ejecuciones del modelo. El resultado se muestra en la figura 11. No hay que considerar esta imagen en términos absolutos, sino en términos relativos para conocer las zonas en las que es más frecuente la precipitación engelante. Como era de esperar, este fenómeno se circunscribe principalmente a regiones montañosas, más importante cuanto más al norte. La franja que atraviesa la meseta Norte es debida casi exclusivamente al evento del 28 de febrero de 2018, mientras que también se observan algunos puntos aislados en el valle del Ebro.

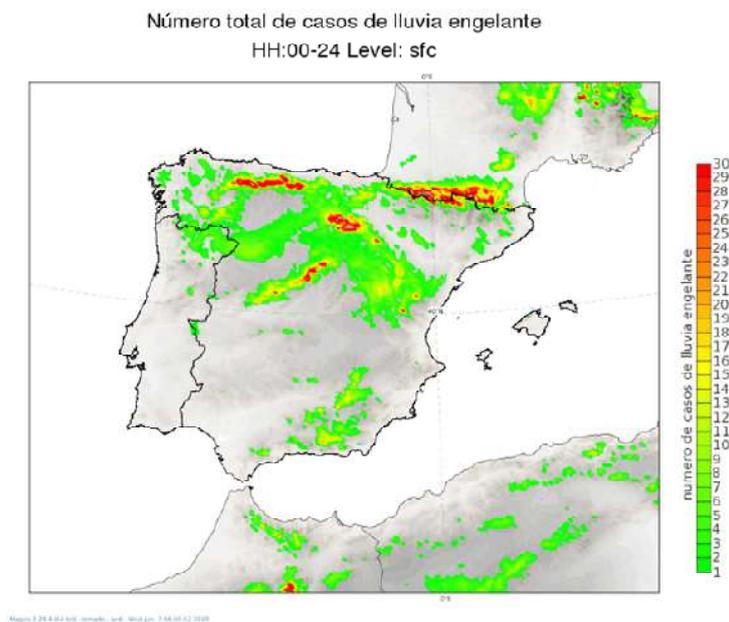


Figura 11. Número de veces que se predijo precipitación engelante en cada punto de grid del modelo en las horas enteras para los casos analizados.

3.2. Modelo ECMWF

El método de evaluación del tipo de precipitación utilizado por el ECMWF se basa en la estructura térmica de la atmósfera, aunque el perfil de humedad es también relevante. Los algoritmos se aplican tanto para las salidas operativas del *ensemble* de 50 miembros (ENS), como para el modelo determinista de alta resolución (HRES) del *Integrated Forecasting System* (IFS).

El tipo de precipitación se diagnostica de acuerdo a la proporción de lluvia y nieve entre las siguientes opciones: lluvia, nieve, precipitación engelante, hielo granulado (*ice pellets*), nieve

húmeda y aguanieve. El modelo también tiene en cuenta el balance de calor en relación con el proceso de fusión, calculando la proporción de fusión. La parametrización captura la dependencia de la diferencia de temperatura desde 0 °C, el efecto del enfriamiento por evaporación en aire subsaturado mediante el uso de temperatura de bulbo húmedo y el espesor de la capa de fusión.

El algoritmo utilizado por el ECMWF (FORBES *et al.*, 2014) determina que el tipo de precipitación esperado será:

- Precipitación engelante: si la temperatura a 2 metros está por debajo de 0 °C, al menos el 80 % de la masa de precipitación está en fase líquida en la base de la capa cálida, y al menos el 20 % permanece como lluvia sobreenfriada cuando llega a la superficie.
- Gránulos de hielo (*ice pellets*): si el porcentaje de masa de precipitación en la fase de hielo en la base de la capa cálida está entre 20 % y 80 %.
- Nieve, en caso contrario.

Como resultado, el ECMWF ofrece diversos productos que muestran el tipo de precipitación esperado, mostrando los resultados tanto en formato de mapas (figura 12) como meteorogramas (figura 13). Al estar basados estos productos en el *ensemble* de 50 miembros, son capaces de dar información en términos probabilísticos de los distintos tipos de precipitación, lo que ofrece al predictor una estimación de la incertidumbre asociada a la predicción.

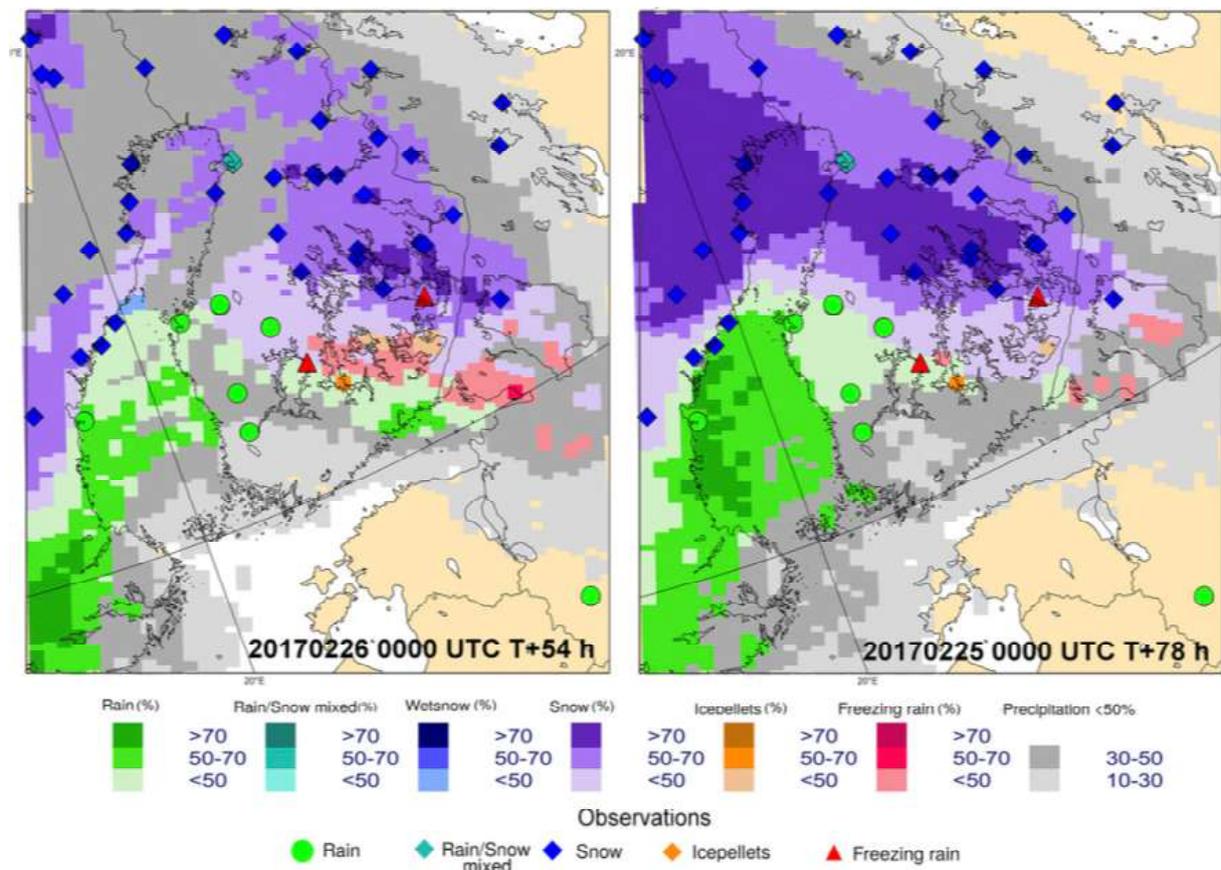


Figura 12. Mapas de probabilidad de los distintos tipos de precipitación estimados por dos pasadas del ensemble del ECMWF con validez para las 06 UTC del 28 de febrero de 2017.

Fuente: GASCÓN et al. (2018).

Los errores en la determinación del tipo de precipitación pueden deberse a:

- Errores en el flujo a gran escala (advección de aire más frío o más cálido).
- Superficies demasiado cálidas o frías.
- Intensidad de precipitación incorrecta (mayor o menor enfriamiento por evaporación o fusión, que cambian la altura del nivel de fusión).
- Altura incorrecta de la capa de fusión.
- Espesor incorrecto de la capa de fusión.
- Humedad ambiental incorrecta de la masa de aire (en aire seco, la temperatura de fusión de la nieve se sitúa por encima de 0 °C, debido al enfriamiento por evaporación).

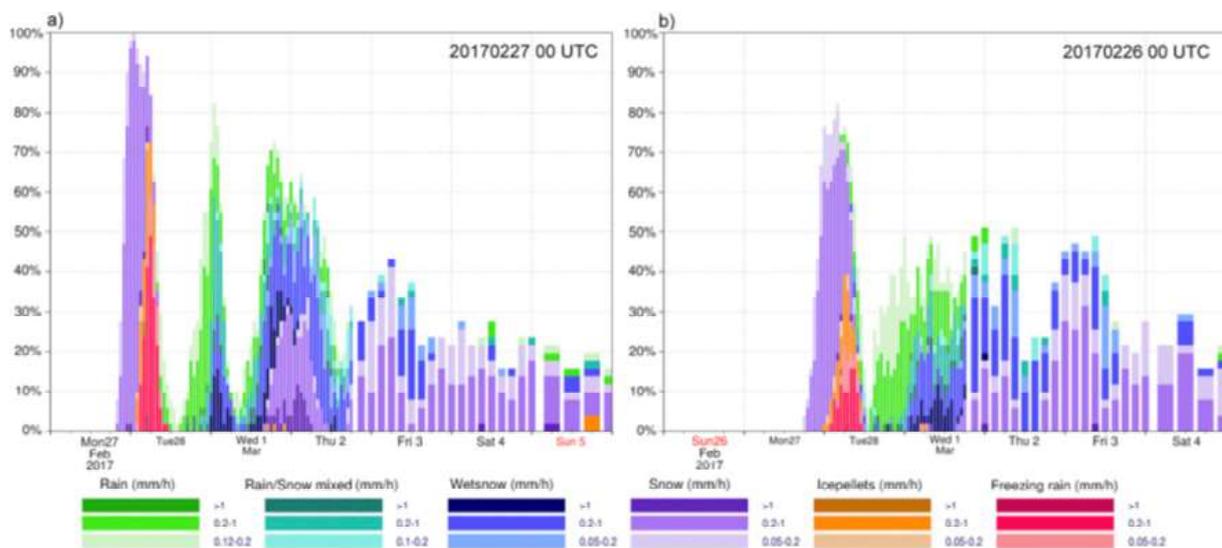


Figura 13. Meteogramas de probabilidad de los distintos tipos de precipitación en una zona concreta por dos pasadas del ECMWF. Fuente: GASCÓN et al. (2018).

3.3. Comparación ECMWF con HARMONIE-AROME

En este apartado se comparan someramente las salidas obtenidas por los modelos HARMONIE-AROME y HRES del ECMWF, a partir de dos casos de estudio. El primero de ellos se corresponde a una situación con capa cálida, que se produjo el 28 de febrero de 2018. El segundo se registró el 2 de febrero del mismo año y se corresponde a una situación sin capa cálida. En las figuras se ha intentado emplear, para los tipos de precipitación de HARMONIE-AROME, un código de colores similar al de los mapas del IFS del ECMWF en aquellos que coincide. Se hace notar que los tipos de precipitación son diferentes ya que el ECMWF distingue nieve húmeda de la nieve seca, pero no hace distinción entre llovizna y lluvia.

LA PRECIPITACIÓN ENGELANTE EN ESPAÑA. OBSERVACION Y PREDICCIÓN

La figura 14 muestra el tipo de precipitación prevista para el 28 de febrero de 2018, con la pasada de las 00 UTC y alcances H+03 y H+05 horas con los modelos HRES y HARMONIE-AROME. La predicción de precipitación engelante es similar en ambos modelos, siendo la principal diferencia el pronóstico de gránulos de hielo (*ice pellets*) por parte del HRES del ECMWF.

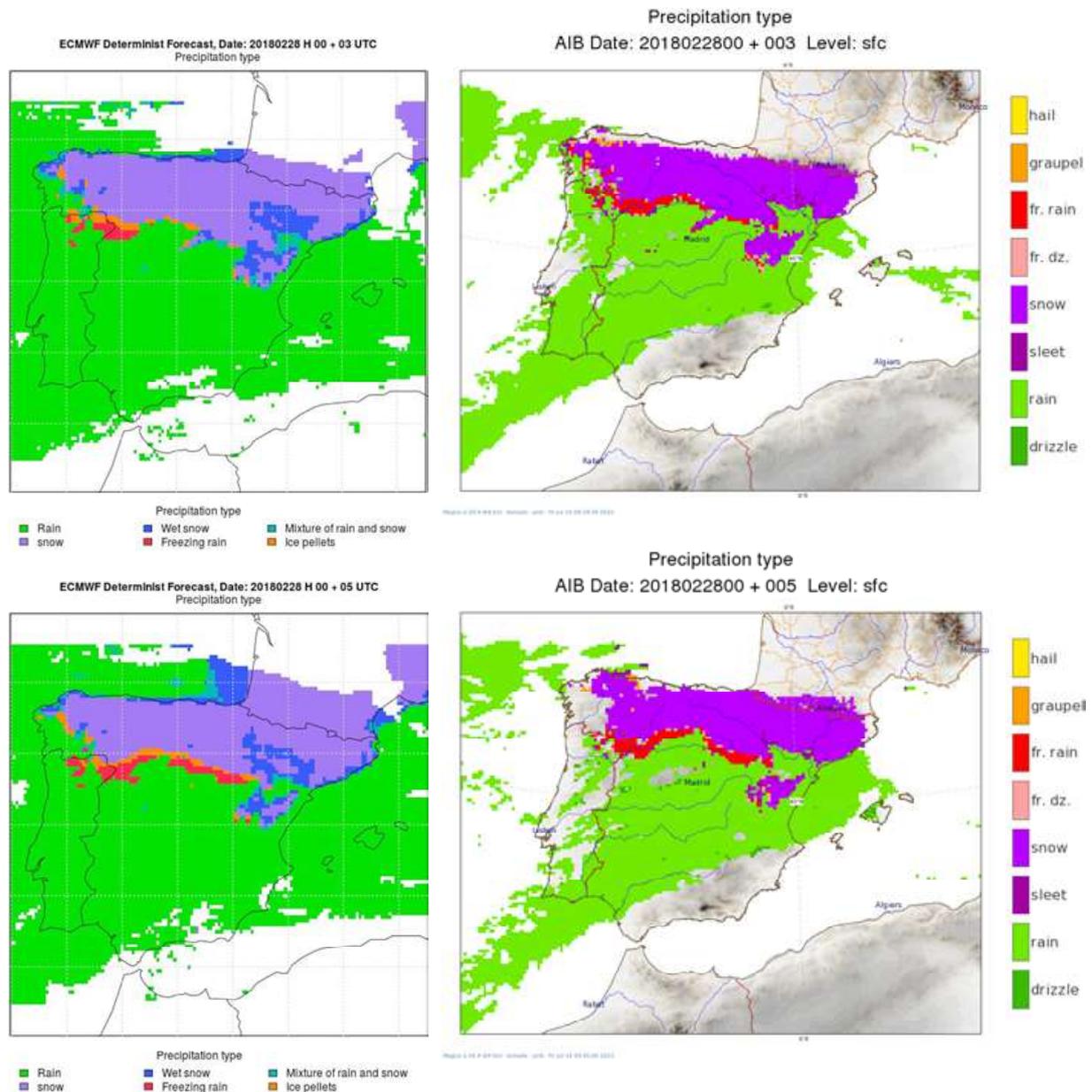


Figura 14. Comparación entre el tipo de precipitación pronosticado en la pasada de las 00 UTC por los modelos HRES del ECMWF (izquierda) y HARMONIE-AROME (derecha) para el 28 de febrero de 2018, alcances H+03 y H+05 (arriba y abajo, respectivamente).

El código de colores correspondiente al tipo de precipitación en HARMONIE-AROME es el siguiente: amarillo: granizo / naranja: graupel / rojo: lluvia engelante / rosa: llovizna engelante / morado: nieve / granate oscuro: aguanieve / verde claro: lluvia / verde oscuro: llovizna.

La figura 15 muestra la comparación del campo tipo de precipitación para ambos modelos en una situación sin capa cálida.

En este caso vemos que el HRES detecta lluvia engelante en unos pocos puntos aislados en algunos alcances (hasta H+03), mientras que con el modelo HARMONIE-AROME se detecta en zonas más amplias y con mayor persistencia.

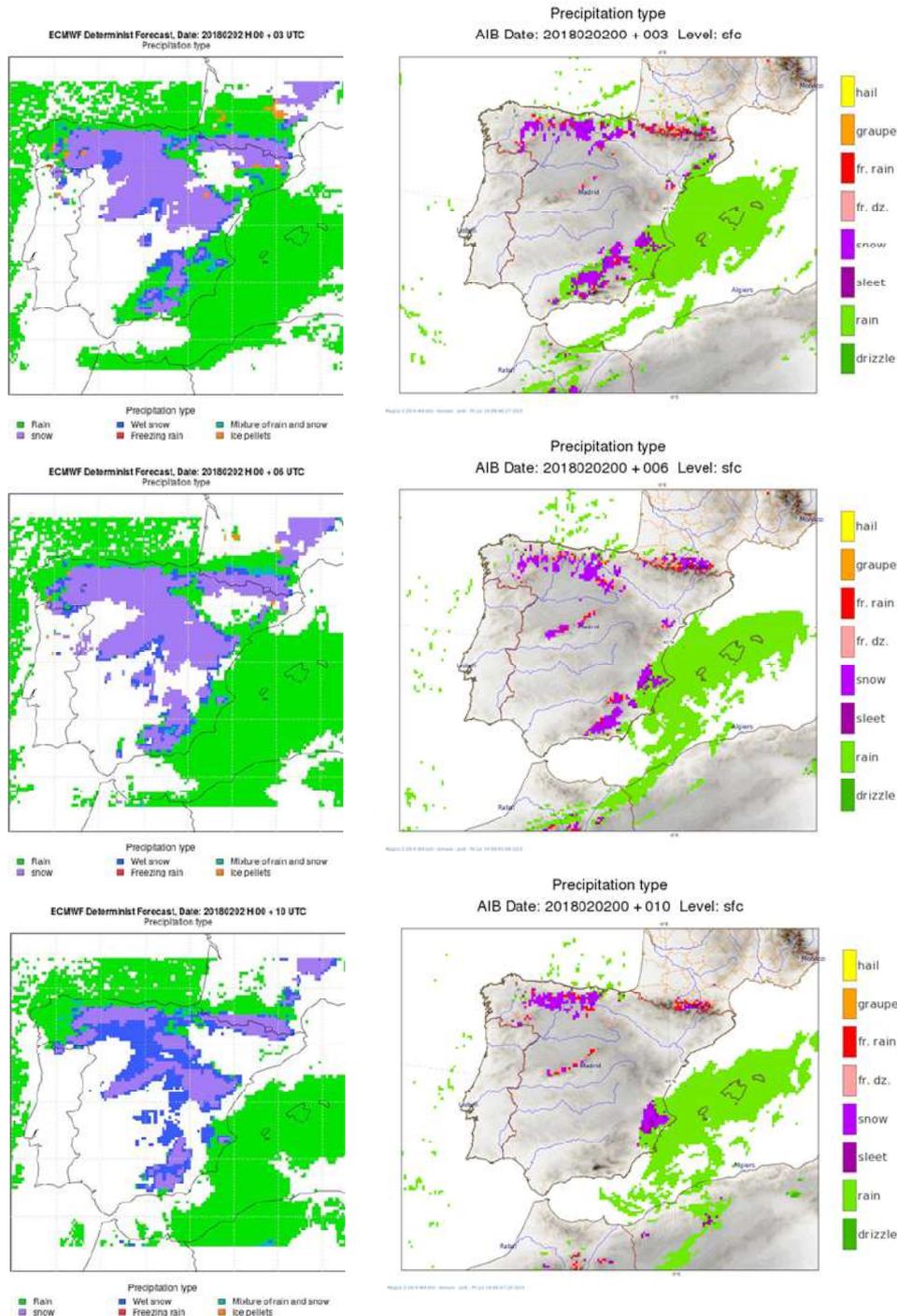


Figura 15. Comparación entre el tipo de precipitación pronosticado en la pasada de las 00 por los modelos HRES del ECMWF (izquierda) y HARMONIE-AROME (derecha) para el 2 de febrero de 2018, alcances de arriba abajo: H+03 y H+06 y H+10. El código de colores es el descrito en la figura 14.

4. HERRAMIENTAS PARA EL PRONÓSTICO DE PRECIPITACIÓN ENGELANTE

En este apartado se van a describir las herramientas, tanto para la predicción como para la vigilancia y seguimiento en tiempo real, más útiles para el diagnóstico del riesgo de precipitación engelante. El diagnóstico del riesgo de precipitación engelante puede ser evaluado siguiendo el esquema mostrado en la figura 16, con el fin de ayudar a los predictores operativos en la toma de decisiones.

A partir de la información obtenida de estas herramientas, el predictor deberá analizar qué tipo de escenario se presenta durante una jornada en concreto (con o sin capa cálida), y si se dan las condiciones propicias para que se produzca precipitación engelante en una zona concreta. Con el objetivo de facilitar la interpretación, se van a describir estas herramientas basándonos en dos ejemplos, uno con presencia de capa cálida y otro sin ella, para mostrar las características típicas de cada situación, así como las diferencias entre ambos casos.

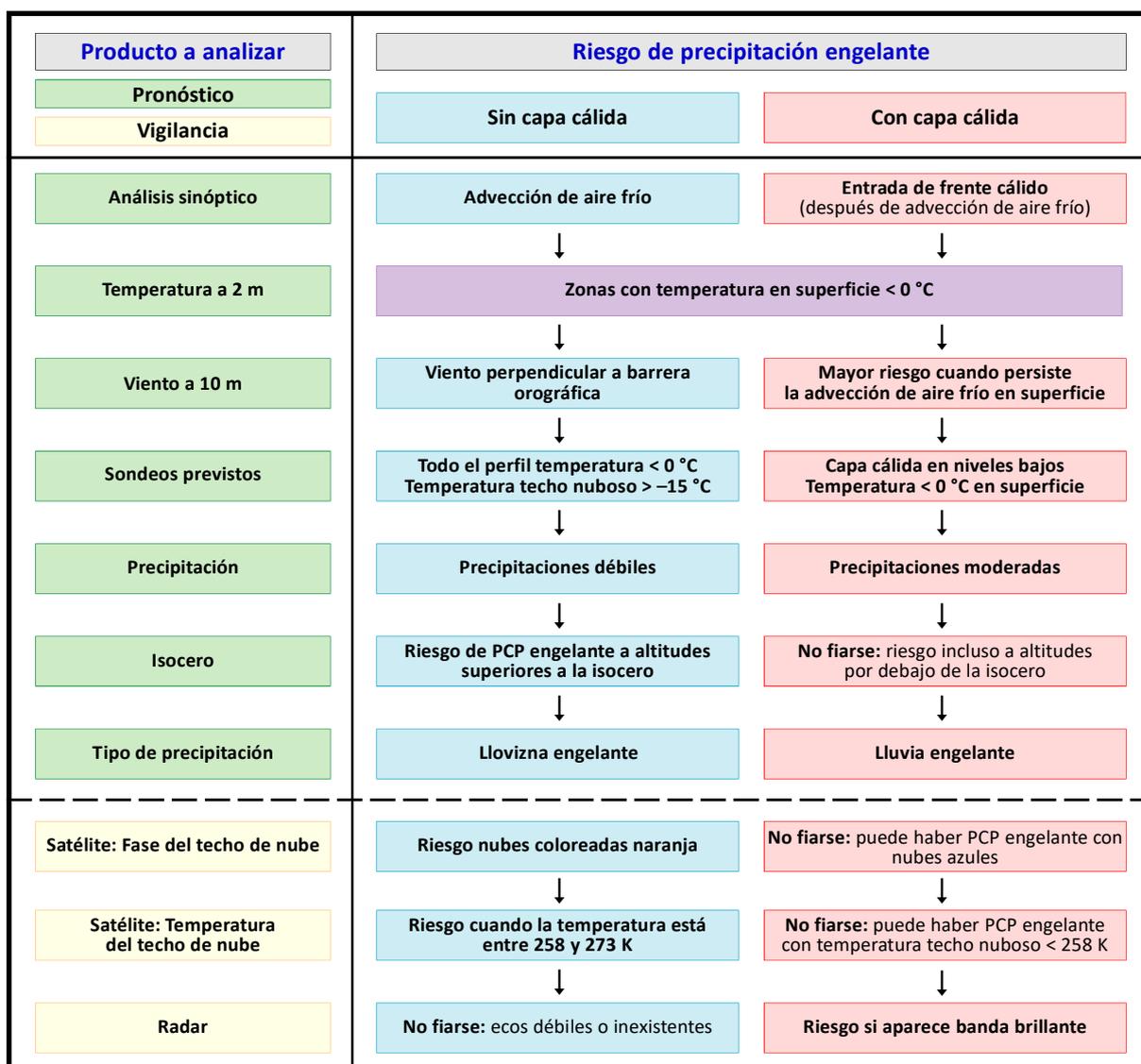


Figura 16. Esquema para el diagnóstico del riesgo de precipitación engelante. Se recomienda realizar la vigilancia de la fase del techo nuboso con el producto "Cloud Top Phase del SAF de nowcasting".

4.1. Pronóstico de precipitación engelante durante episodios en los que se prevé capa cálida

A escala sinóptica, la presencia de una masa de aire muy fría sobre la península ibérica es un ingrediente esencial en los episodios de precipitación engelante con presencia de capa cálida. Este aire muy frío es generalmente advechado por la masa de aire continental polar o marítima ártica, aunque en situaciones de bloqueo en las que se interrumpe la circulación zonal, la Península puede generar una masa de aire muy fría sin necesidad de advección. Esto es debido al intenso enfriamiento radiativo que tiene lugar durante las largas noches invernales. Tras el establecimiento de una masa de aire muy frío en superficie, el requisito fundamental es la entrada de un frente cálido, generalmente asociado a la masa de aire marítima polar o marítima subtropical (figuras 17 y 18).

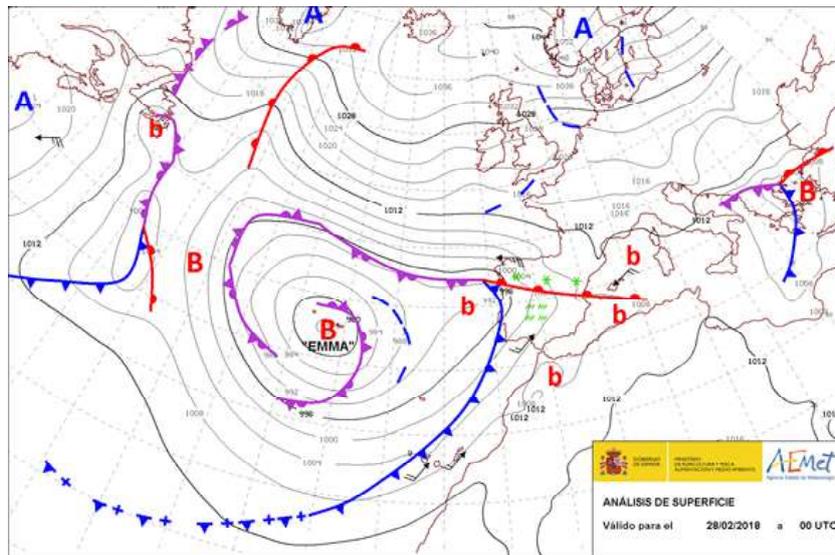


Figura 17. Análisis de los frentes en superficie y la presión a nivel del mar a las 00 UTC del 28 de febrero de 2018. Se puede apreciar la entrada del frente cálido asociado a la precipitación engelante. Antes del paso del frente se produjeron nevadas generalizadas en cotas bajas, mientras que tras el paso del frente la cota de nieve subió rápidamente y las precipitaciones fueron en forma de lluvia en cotas medias. Durante esta transición hubo un corto intervalo de lluvia engelante, debido a que en niveles medios de la troposfera estaba ya entrando la masa de aire cálida, pero en superficie aguantaban temperaturas inferiores a 0 °C debido a la presencia de una fuerte inversión térmica.

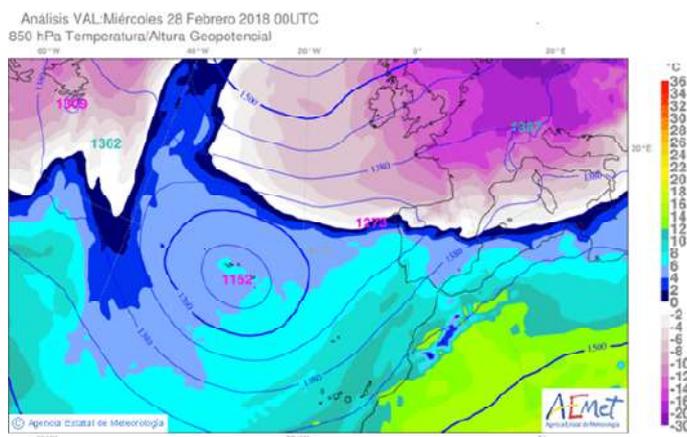


Figura 18. Pronóstico de temperatura y geopotencial a 850 hPa para las 00 UTC del 28 de febrero de 2018 durante un episodio de lluvia engelante asociado a capa cálida. La masa de aire continental polar, fría y seca, afecta a la mitad norte peninsular; por el suroeste se aproxima la masa de aire marítima subtropical, más cálida y húmeda.

Un requisito imprescindible para que se registre precipitación engelante es que la temperatura en superficie sea inferior a 0 °C. En este aspecto, hay que tener en cuenta que la temperatura en el suelo puede ser inferior a la temperatura del aire a 2 m, especialmente durante noches despejadas con viento en calma.

Aunque pudiera parecer que el pronóstico del modelo HARMONIE-AROME, al ser de mayor resolución, sería siempre más preciso que el del ECMWF, esto no siempre es así. Hay que tener cuidado ya que el modelo HARMONIE-AROME suele sobrestimar las temperaturas mínimas durante noches despejadas con viento flojo o en calma. Esto podría llevar a errores en el pronóstico del tipo de precipitación si entrase un frente cálido a última hora de la madrugada o primera hora de la mañana. Sin embargo, la relativamente baja resolución del modelo ECMWF puede llevar a grandes errores en el pronóstico de la temperatura en zonas de orografía compleja. Por estos motivos, es conveniente consultar las temperaturas pronosticadas por el postproceso de temperaturas desarrollado por el Área de Técnicas y Aplicaciones de Predicción (ATAP), que posiblemente sea la herramienta más fiable en el pronóstico de temperaturas de entre las que se disponen en AEMET. Aunque el modelo del ECMWF puede pecar también de la sobrestimación de las temperaturas mínimas, el postproceso de temperaturas del ATAP lo suele subsanar razonablemente bien ya que corrige los errores observados en días previos. Sin embargo, hay que prestar especial atención en el caso de cambio de masa de aire. En estos casos, las temperaturas pueden ser muy bajas en zonas de valle y mesetas favorables a la formación de inversiones térmicas (figura 19). Una vez conocemos hasta qué valores se espera que bajen las temperaturas, puede ser útil seguir la evolución horaria esperada por el modelo HARMONIE-AROME. Esto resulta de gran utilidad para estimar el intervalo horario en el que se espera riesgo de precipitación engelante.

En los episodios de precipitación engelante con capa cálida no hay que fiarse de la altura a la que se encuentre la isocero en la atmósfera libre ya que, debido a inversión térmica asociada al frente cálido, puede producirse precipitación engelante a altitudes inferiores a la isocero.

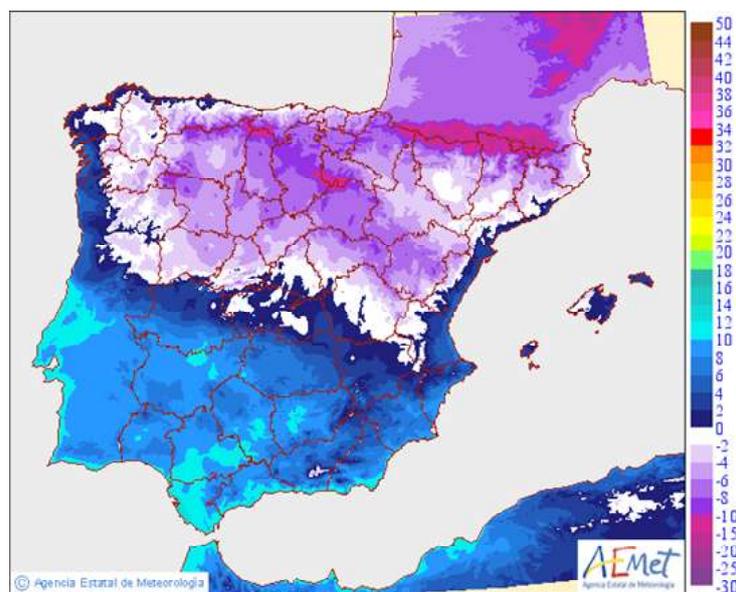


Figura 19. Temperatura mínima pronosticada por el postproceso de AEMET para el 28 de febrero de 2018. De forma previa a la entrada del frente cálido que causó lluvia engelante en la meseta Norte, las temperaturas mínimas esperadas eran muy bajas debido a la masa de aire continental polar y al enfriamiento radiativo nocturno.

Una variable muy importante a la hora de evaluar el riesgo de precipitación engelante es el viento en superficie. El modelo HARMONIE-AROME pronostica razonablemente bien esta variable, por lo que es la herramienta adecuada para estimar el viento en la región que nos interesa. El modelo ECMWF también pronostica generalmente con precisión el viento, aunque debido a su menor resolución suele ser menos preciso en regiones con orografía compleja.

En los casos asociados al mecanismo de desarrollo con capa cálida, el riesgo de precipitación engelante será mayor mientras persista el viento en superficie asociado a la advección de aire frío (generalmente de componente norte), que favorece que las temperaturas sigan por debajo de 0 °C (figura 20). Con la rolada del viento en superficie asociada al frente cálido suele ascender rápidamente la temperatura, disminuyendo drásticamente el riesgo de precipitación engelante.

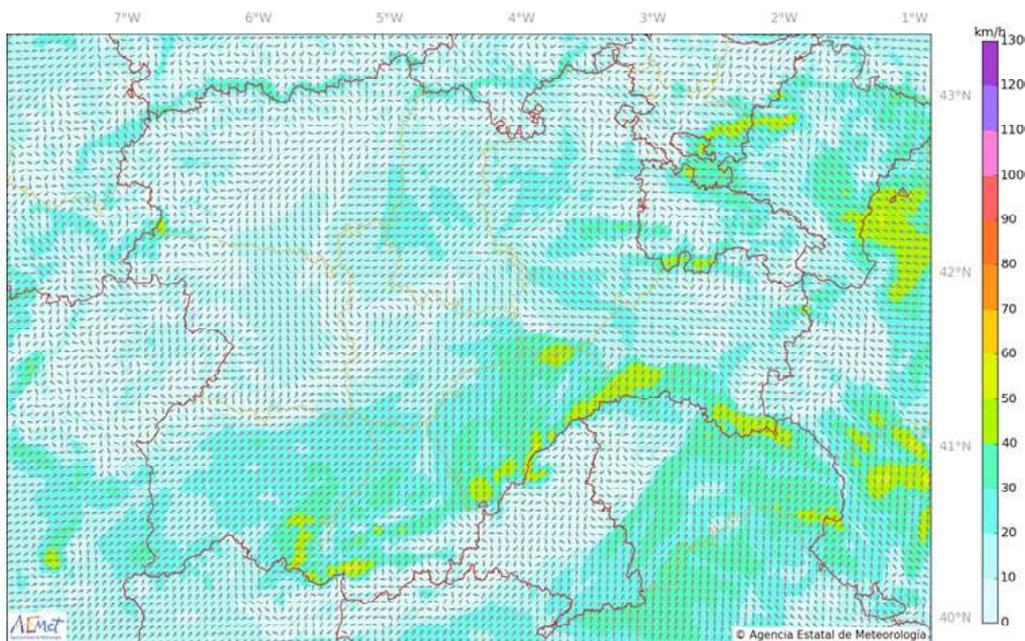


Figura 20. Viento a 10 m pronosticado por el modelo HARMONIE-AROME para las 06 UTC del 28 de febrero de 2018. Se aprecia el viento de NE asociado con la advección fría en el norte de Castilla y León, mientras que el viento de SW asociado al frente cálido penetra por el sur de la comunidad. El mayor riesgo de precipitación engelante se localiza cerca de la zona de convergencia, donde todavía persiste la advección fría.

Una de las herramientas más útiles para el diagnóstico del riesgo de precipitación engelante son los sondeos pronosticados por los modelos ECMWF y HARMONIE-AROME. Como ventaja de los obtenidos a partir del HARMONIE-AROME es que suelen ser más fieles a la realidad en regiones con orografía compleja.

Los sondeos típicos de situaciones de precipitación engelante con capa cálida se caracterizan por temperatura en superficie inferior a 0 °C, debido a una fuerte inversión térmica en niveles bajos de la troposfera. Por encima de la capa de inversión térmica destaca la presencia de una capa cálida con temperaturas superiores a 0 °C, generalmente en torno a 850 hPa. La humedad relativa es elevada en niveles medios y bajos (curvas de temperatura, temperatura de rocío y temperatura de bulbo húmedo prácticamente solapadas). Esto nos puede indicar hasta qué altura

puede llegar la nubosidad, pudiendo hacer una estimación de la temperatura de la cima de la nubosidad. Cuando esta temperatura es inferior a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ la eficiencia de la nucleación es alta, por lo que es probable que la nube se encuentre en fase sólida, al menos en su región superior. Los copos de nieve caen cuando adquieren un tamaño suficiente, fundiéndose al atravesar la capa cálida. De esta forma, llegan como gotas de lluvia a la superficie, al no disponer de tiempo suficiente para volver a congelarse al entrar en la capa de inversión térmica. Al contactar con la superficie que se encuentra por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ se produce la congelación, dando lugar a una capa de hielo liso.

La evolución típica de los sondeos durante estas situaciones es la siguiente: en primer lugar, todo el perfil se encuentra a temperaturas inferiores a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 21), de forma que la precipitación esperada en superficie será en forma de nieve; posteriormente, la entrada del frente cálido provoca la formación de una capa cálida con temperaturas superiores a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 22), que provoca la fusión de los hidrometeoros en fase sólida que caen de regiones superiores de la nube, favoreciendo la caída de precipitación engelante en superficie, donde persisten las temperaturas inferiores a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si la capa de inversión cercana a la superficie es suficientemente profunda (más de 50 hPa de espesor) y las temperaturas en superficie muy bajas (varios grados inferiores a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), las gotas de lluvia pueden congelarse total o parcialmente dando lugar a precipitación en forma de gránulos de hielo (*ice pellets*). Por otro lado, si la capa cálida es poco profunda, la precipitación esperada en superficie puede ser en forma de nieve húmeda o aguanieve; finalmente, la temperatura en superficie asciende por encima de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 23), de forma que la precipitación esperada en superficie será en forma de lluvia.

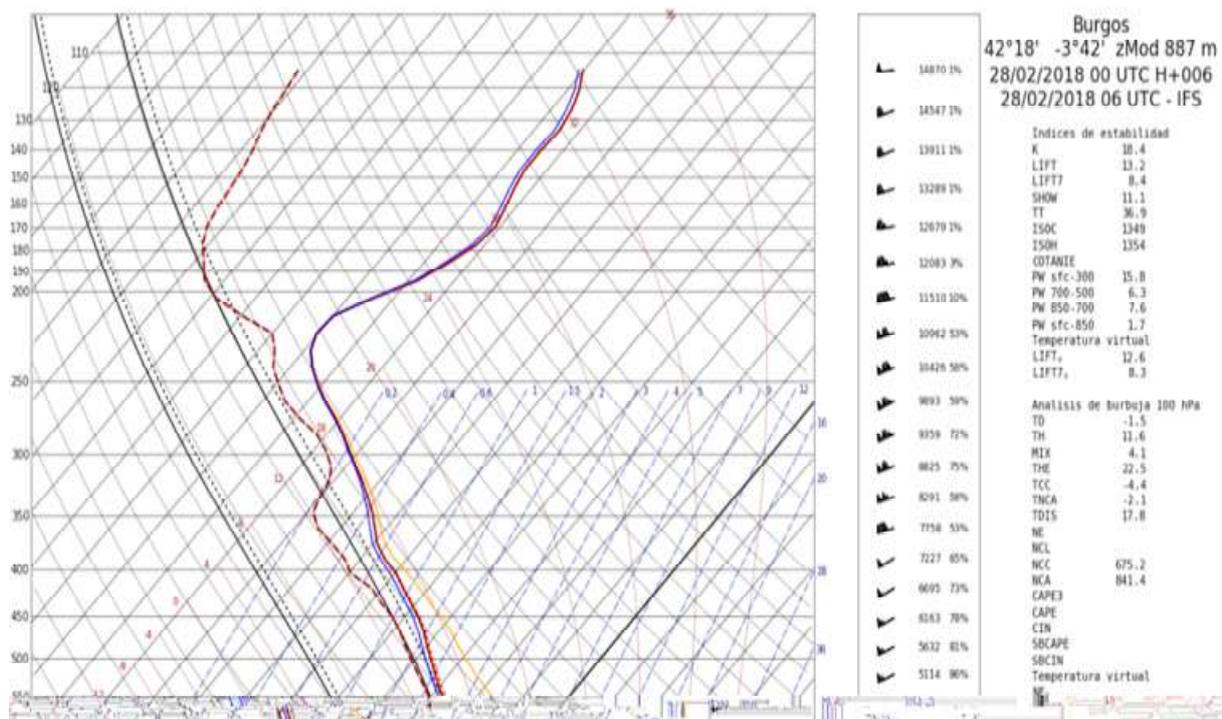


Figura 21. Sondeo pronosticado por el modelo del ECMWF para Burgos a las 06 UTC del 28 de febrero de 2018. Todo el perfil se encuentra a temperaturas inferiores a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, y como la cima de la nubosidad esperada estaría a temperaturas inferiores a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, la precipitación esperada en superficie sería en forma de nieve.

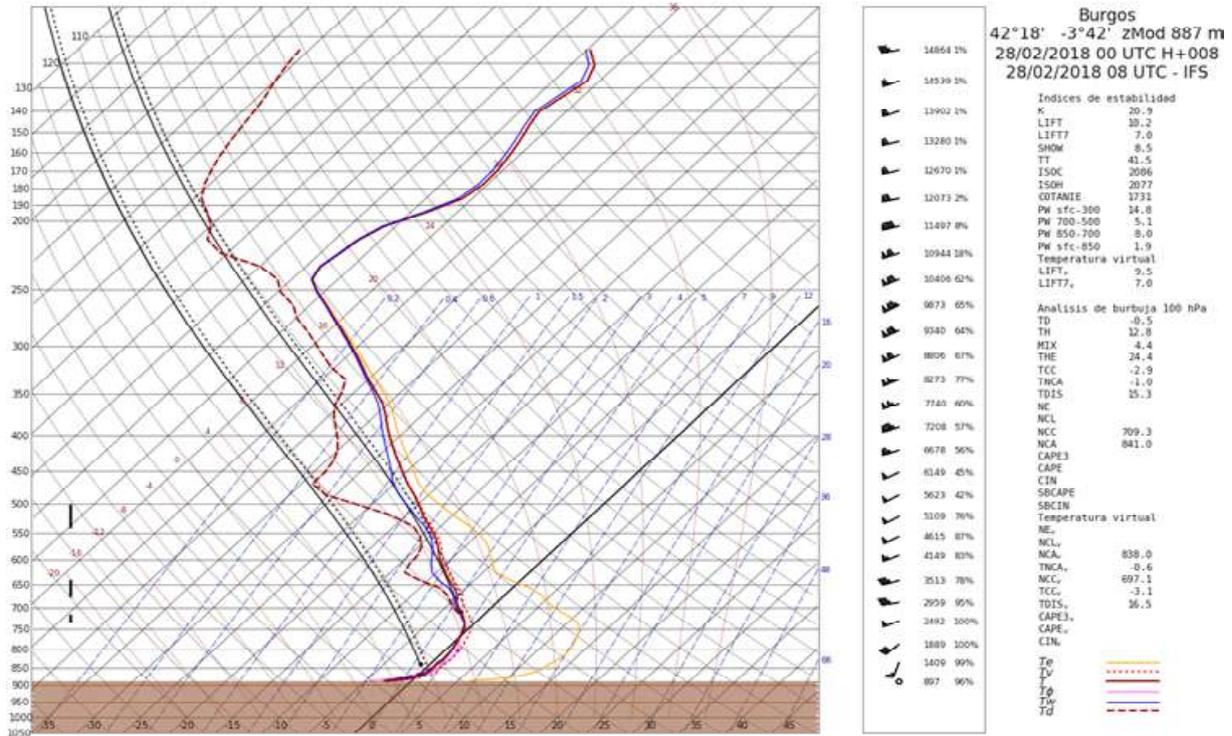


Figura 22. Sondeo pronosticado por el modelo del ECMWF para Burgos a las 08 UTC del 28 de febrero de 2018. Los hidrometeoros en fase sólida se funden al atravesar la capa cálida, dando lugar a precipitación engelante al estar la superficie a temperaturas inferiores a 0 °C.

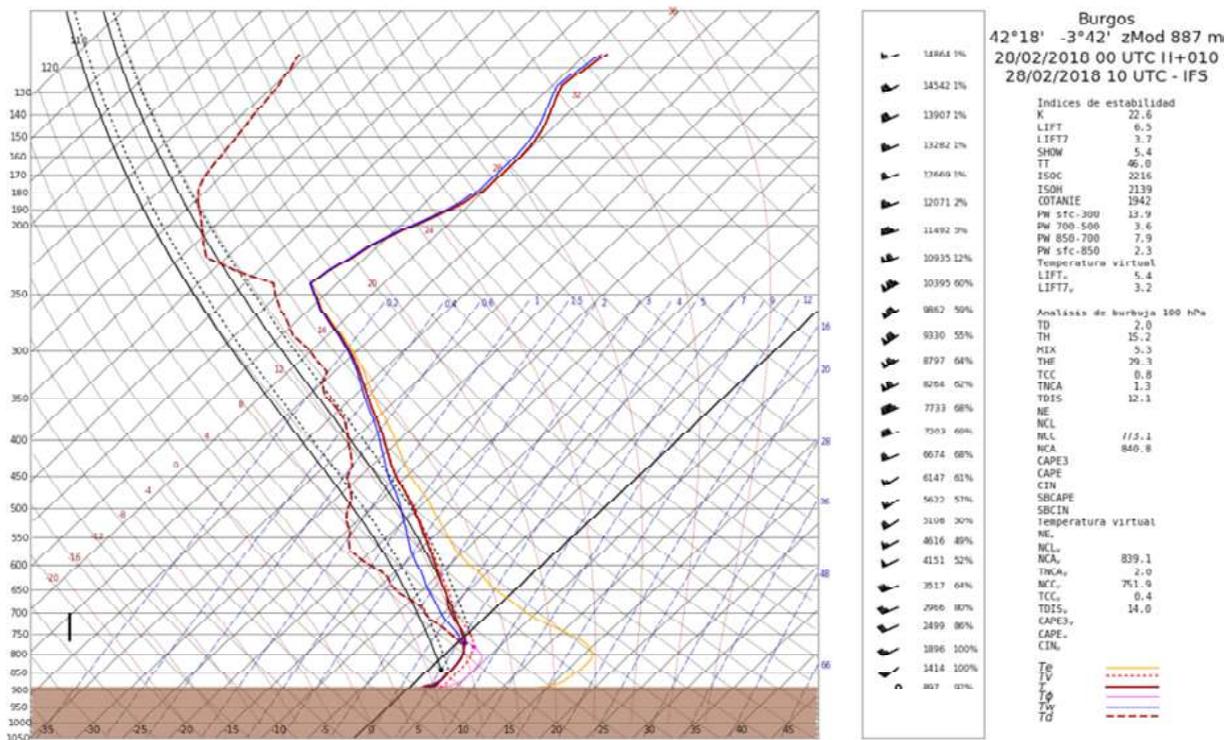


Figura 23. Sondeo pronosticado por el modelo HARMONIE-AROME para Burgos a las 10 UTC del 28 de febrero de 2018. La temperatura en superficie ha subido bruscamente y ya es superior a 0 °C, por lo que las precipitaciones esperadas son en forma de lluvia.

Respecto a la precipitación esperada, en este escenario los modelos suelen mostrar una banda extensa de precipitación débil o moderada asociada al frente cálido (figura 24). Para concretar las regiones que puedan verse afectadas por precipitación engelante puede resultar de gran ayuda consultar los productos de tipo de precipitación que se van a detallar a continuación, aunque hay que tener en cuenta que su precisión es limitada. En primer lugar conviene consultar los productos de tipo de precipitación esperada por el modelo del ECMWF (GASCÓN *et al.*, 2018), tanto en formato mapa (figura 25) como los meteogramas (figura 26). En este tipo de episodios se suele apreciar una transición del tipo de precipitación, empezando por nieve y, tras un intervalo de lluvia engelante, pasar a lluvia. El modelo del ECMWF es capaz de pronosticar razonablemente bien los episodios de precipitación engelante asociados a capa cálida, es decir, aquellos asociados a la entrada de un frente cálido tras una advección de aire frío. Del mismo modo, el modelo HARMONIE-AROME dispone de un producto que estima el tipo de precipitación esperado en superficie. Esta herramienta es capaz de discriminar entre ocho tipos distintos de precipitación: llovizna, lluvia, aguanieve, nieve, llovizna engelante, lluvia engelante, nieve granulada y granizo. Este producto pronostica razonablemente bien los episodios de precipitación engelante asociados a la presencia de una capa cálida. En este tipo de situaciones, el producto es capaz de pronosticar la transición de tipo de precipitación esperada: empezando por nieve, pasando por lluvia engelante y, finalmente, lluvia (figura 27).

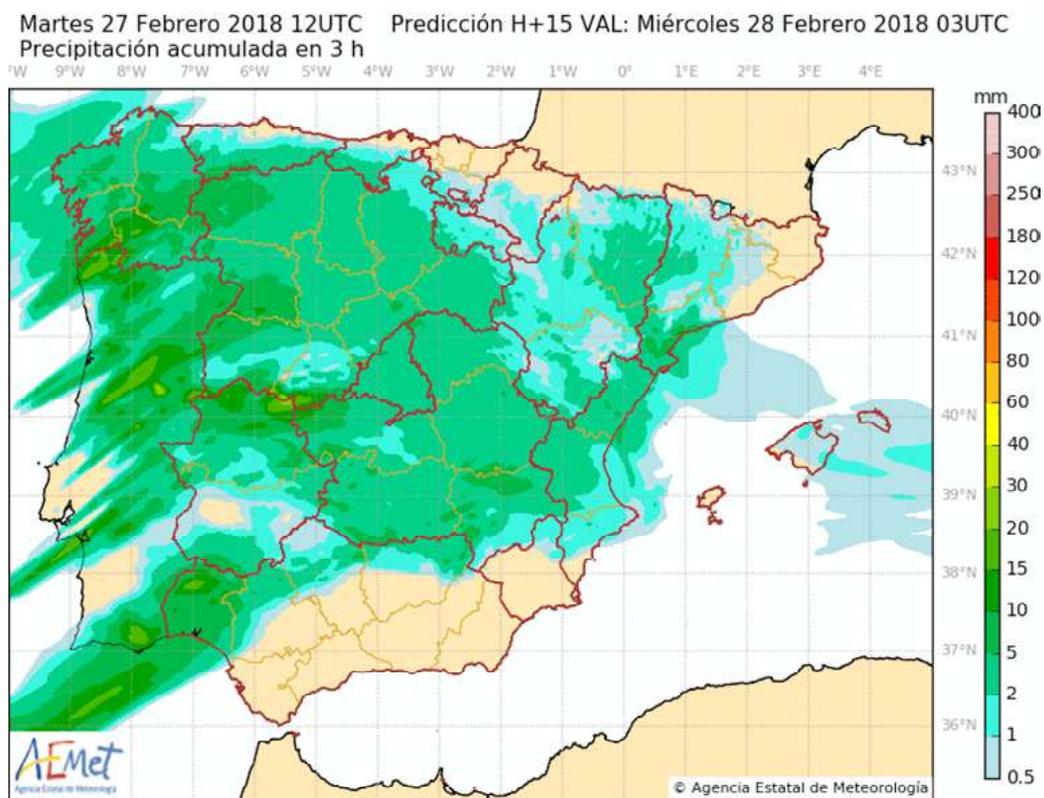


Figura 24. Precipitación acumulada en 3 h pronosticada por el modelo HARMONIE-AROME para las 03 UTC del 28 de febrero de 2018. Se aprecia una extensa banda de precipitaciones débiles a moderadas asociadas al frente cálido, con chubascos más intensos en el oeste de la Península coincidiendo con la entrada del frente frío.

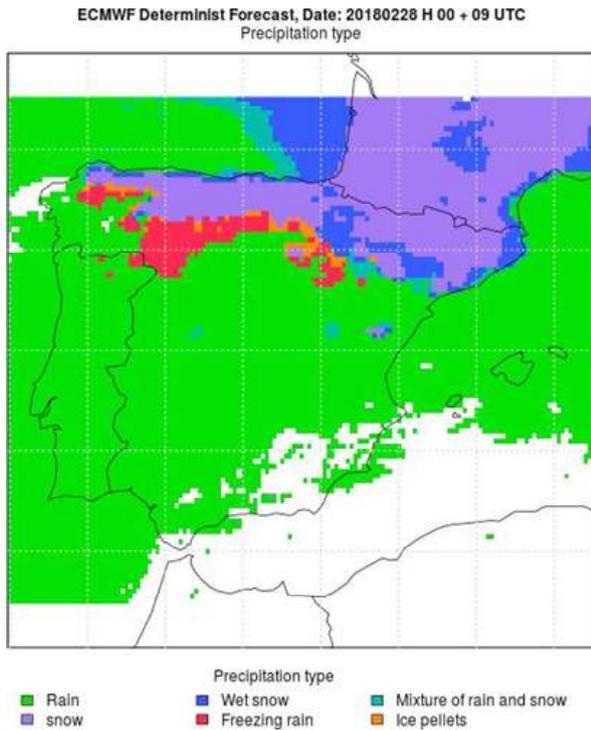


Figura 25. Mapa del tipo de precipitación pronosticado por el modelo ECMWF para las 09 UTC del 28 de febrero de 2018. Verde: lluvia / azul: nieve húmeda / verde agua: aguanieve / morado: nieve / rojo: precipitación engelante / naranja: gránulos de hielo.

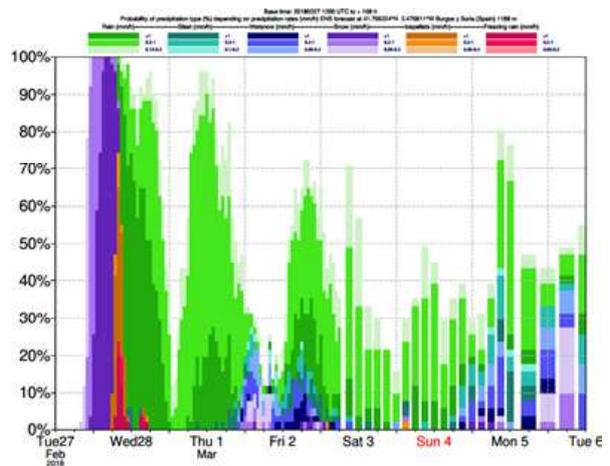
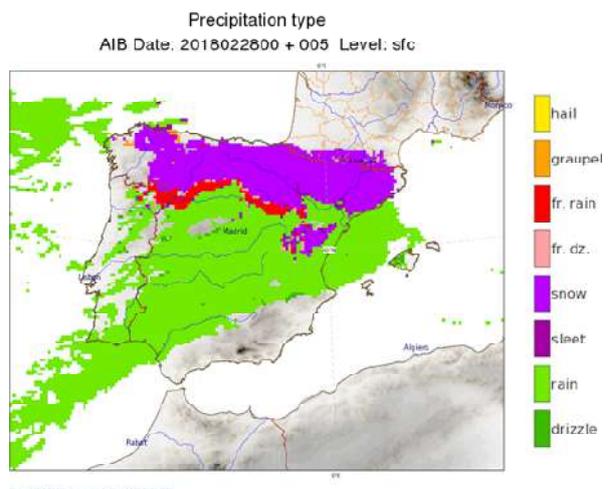


Figura 26. Metograma del tipo de precipitación esperado por el modelo ECMWF en Soria durante el episodio de lluvia engelante con capa cálida del 28 de febrero de 2018. Verde: lluvia / verde agua: aguanieve / azul: nieve húmeda / morado: nieve / naranja: gránulos de hielo / rojo: precipitación engelante.

Figura 27. Tipo de precipitación esperado por el modelo HARMONIE-AROME durante el episodio de lluvia engelante con capa cálida del 28 de febrero de 2018. Amarillo: granizo / naranja: graupel / rojo: lluvia engelante / rosa: llovizna engelante / morado: nieve / granate oscuro: aguanieve / verde claro: lluvia / verde oscuro: llovizna.



Respecto a la vigilancia en tiempo real, los productos de satélite que proporcionan información sobre la microfísica de la cima de la nubosidad no son de gran utilidad en los casos con presencia de capa cálida, ya que van a identificar que la cima de la nubosidad está en fase sólida pero no nos dan información sobre si se está produciendo la fusión en niveles inferiores (figura 28). Para la vigilancia en tiempo real de la fase del tope nuboso se puede utilizar la composición de colores RGB *day natural colors*, aunque como dicho producto solo está disponible durante las horas diurnas es más recomendable usar el producto “*Cloud Top Phase* del SAF de *nowcasting*”. Respecto a los productos de radares (figura 29), si se detectan reflectividades más elevadas que las típicas de precipitaciones en forma de nieve (generalmente inferiores a 30 dBZ), puede indicar que se está produciendo la fusión de los hidrometeoros en su caída al atravesar la capa cálida, con el consiguiente riesgo de precipitación engelante si en superficie persisten las temperaturas inferiores a 0 °C.

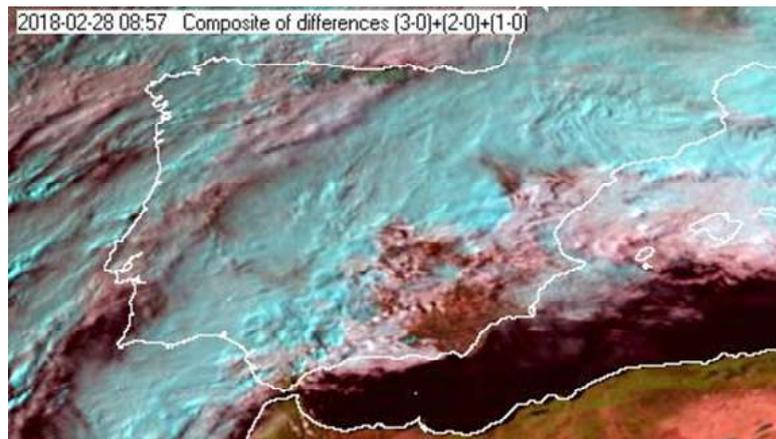


Figura 28. Imagen del producto RGB day natural colors del METEOSAT para las 08:57 UTC del 28 de febrero de 2018. En blanco se muestran las nubes en fase líquida, mientras que en cian se colorean las nubes cuya cima está en fase sólida, así como la nieve en superficie.

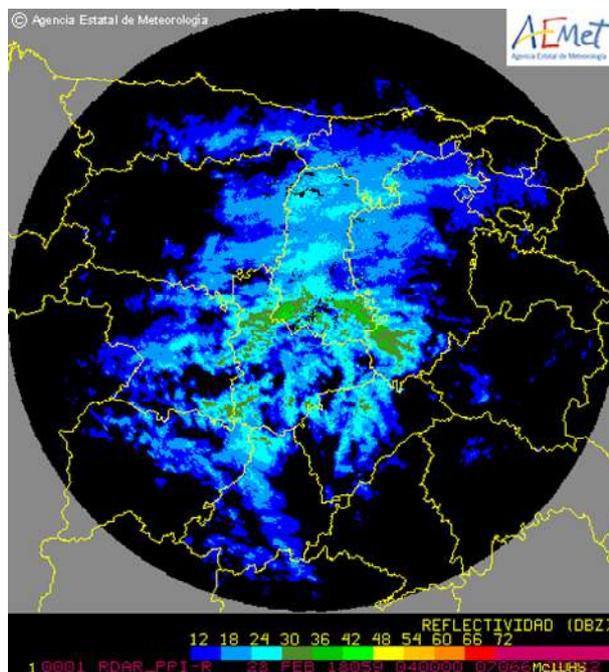


Figura 29. Reflectividad del radar de Palencia (producto Plan Position Indicator, PPI) a las 04 UTC del 28 de febrero de 2018, durante un episodio de precipitación engelante en la meseta Norte asociado a capa cálida.

4.2. Pronóstico de precipitación engelante durante episodios sin capa cálida

Los episodios de precipitación engelante sin presencia de capa cálida que afectan a nuestras latitudes suelen estar asociados a advecciones de aire frío procedentes de las masas de aire continental polar, marítima ártica o marítima polar. La entrada de estas masas de aire puede provocar llovizna engelante, generalmente restringida a barlovento de sistemas montañosos, en altitudes por encima del nivel al que se encuentre la isocero en la atmósfera libre. La precipitación engelante en este escenario generalmente se produce durante la advección fría tras el paso de un frente frío (figuras 30 y 31), aunque la presencia de un sistema frontal no es un requisito imprescindible para que se produzca precipitación engelante mediante el mecanismo de desarrollo sin capa cálida.

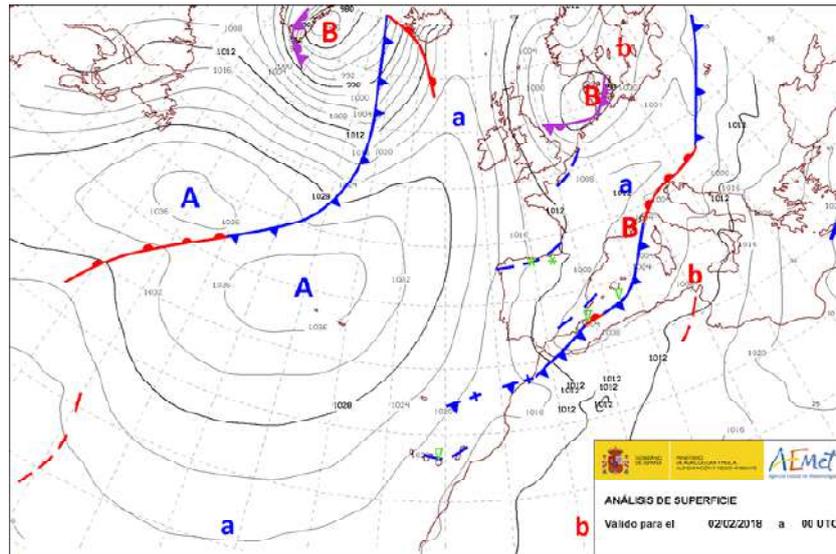


Figura 30. Análisis de los frentes en superficie y la presión a nivel del mar a las 00 UTC del 2 de febrero de 2018. Tras el paso del frente frío, la advección de la masa de aire marítima ártica dio lugar a llovizna engelante en la vertiente norte de la sierra de Guadarrama.

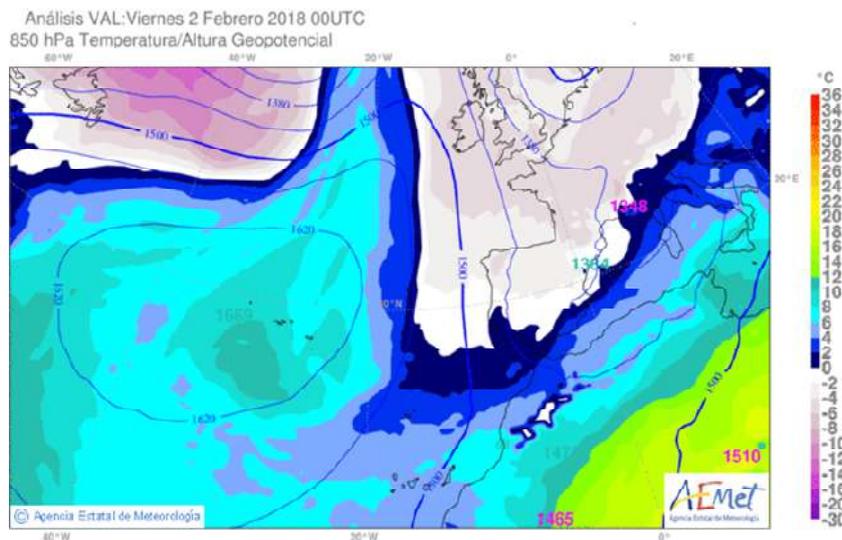


Figura 31. Temperatura y geopotencial a 850 hPa pronosticado por el modelo ECMWF para las 00 UTC del 2 de febrero de 2018 durante un episodio de llovizna engelante en la vertiente norte de la sierra de Guadarrama sin presencia de capa cálida. Advección fría asociada a la masa de aire marítima ártica.

Como es obvio, en los episodios de precipitación engelante sin presencia de capa cálida también es necesario que la temperatura en superficie sea inferior a 0 °C. En este caso, las inversiones térmicas no juegan un papel destacado, y la altura de la isocero sí es útil para determinar por encima de qué altitud se espera riesgo de precipitación engelante. Los mapas de temperatura pronosticada suelen indicar un gradiente altitudinal, con temperaturas más bajas en cotas altas (figura 32), aunque durante la noche también pueden producirse temperaturas muy bajas en zonas de valle y mesetas por enfriamiento radiativo.

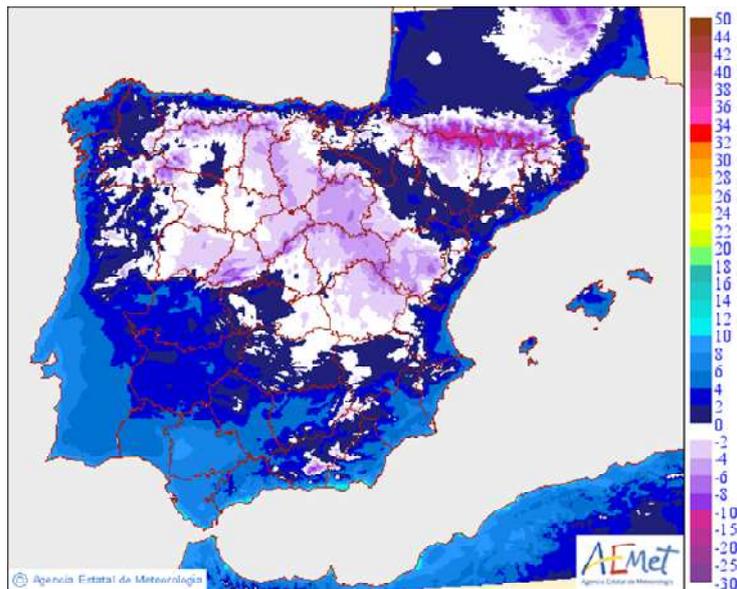


Figura 32. Temperatura mínima pronosticada por el postproceso de AEMET para el 2 de febrero de 2018. Las temperaturas eran negativas en la sierra de Guadarrama, de forma que la llovizna que se registró fue engelante.

En los casos de precipitación engelante sin presencia de capa cálida hay que prestar atención a vientos perpendiculares a sistemas montañosos (figura 33), ya que favorecen la formación de nubosidad baja de carácter orográfico a barlovento. Cuando la cima de la nubosidad orográfica se sitúa a temperaturas superiores a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, la eficiencia de los procesos de nucleación es baja.

HARM40 (0.025°) 20180202 a 12 UTC. H+006. Validez: viernes, 02 de febrero de 2018, a 18 UTC.
Viento a 10 m. Unidades: Kt

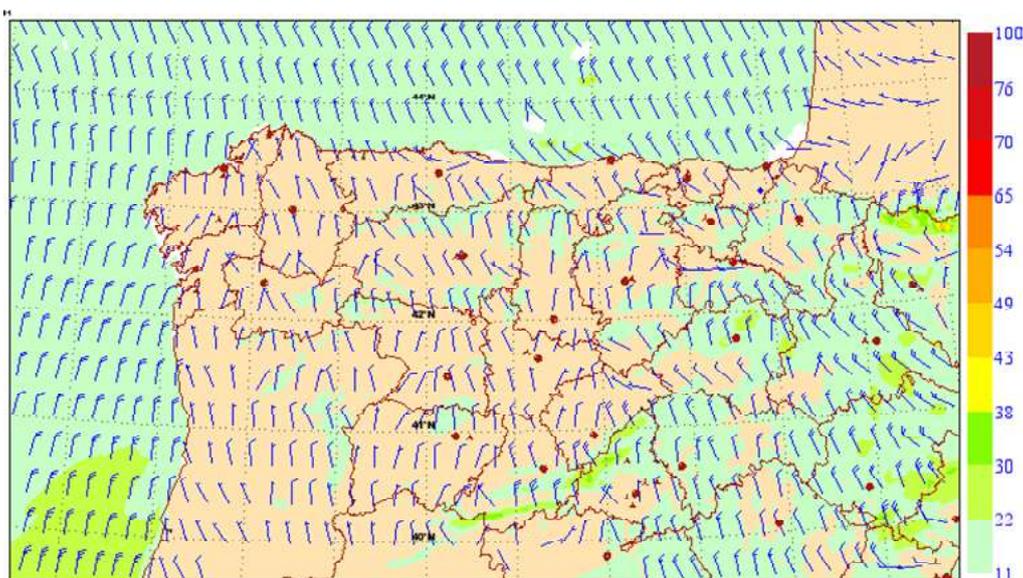


Figura 33. Viento a 10 m pronosticado por el modelo HARMONIE-AROME para las 18 UTC del 2 de febrero de 2018. Este día se produjo llovizna engelante en la vertiente norte de la sierra de Guadarrama causada por la nubosidad orográfica formada a barlovento al haber viento aproximadamente perpendicular a este sistema montañoso.

Esto favorece que la nubosidad se halle predominantemente en fase líquida, pudiendo dar lugar a llovizna engelante, así como englamamiento atmosférico o cencellada cuando la base de la nube se sitúe por debajo de la cima de las montañas.

Los sondeos pronosticados característicos de los episodios de precipitación engelante sin capa cálida presentan todo el perfil vertical con temperaturas inferiores a 0 °C (figura 34). En niveles bajos destaca una capa húmeda poco profunda, que permite que se formen nubes bajas a barlovento de los sistemas montañosos cuando el viento sopla perpendicular a los mismos. Por encima de la capa húmeda hay una capa seca y estable, que impide el desarrollo vertical de la nubosidad. Esto hace que la nubosidad tenga una temperatura superior a -15 °C, dificultando la correcta nucleación de los hidrometeoros y permitiendo que estos permanezcan en fase líquida a pesar de estar a temperaturas inferiores a 0 °C. La eficacia de la precipitación en estas nubes con poco desarrollo es limitada, por lo que suele tratarse de lloviznas.

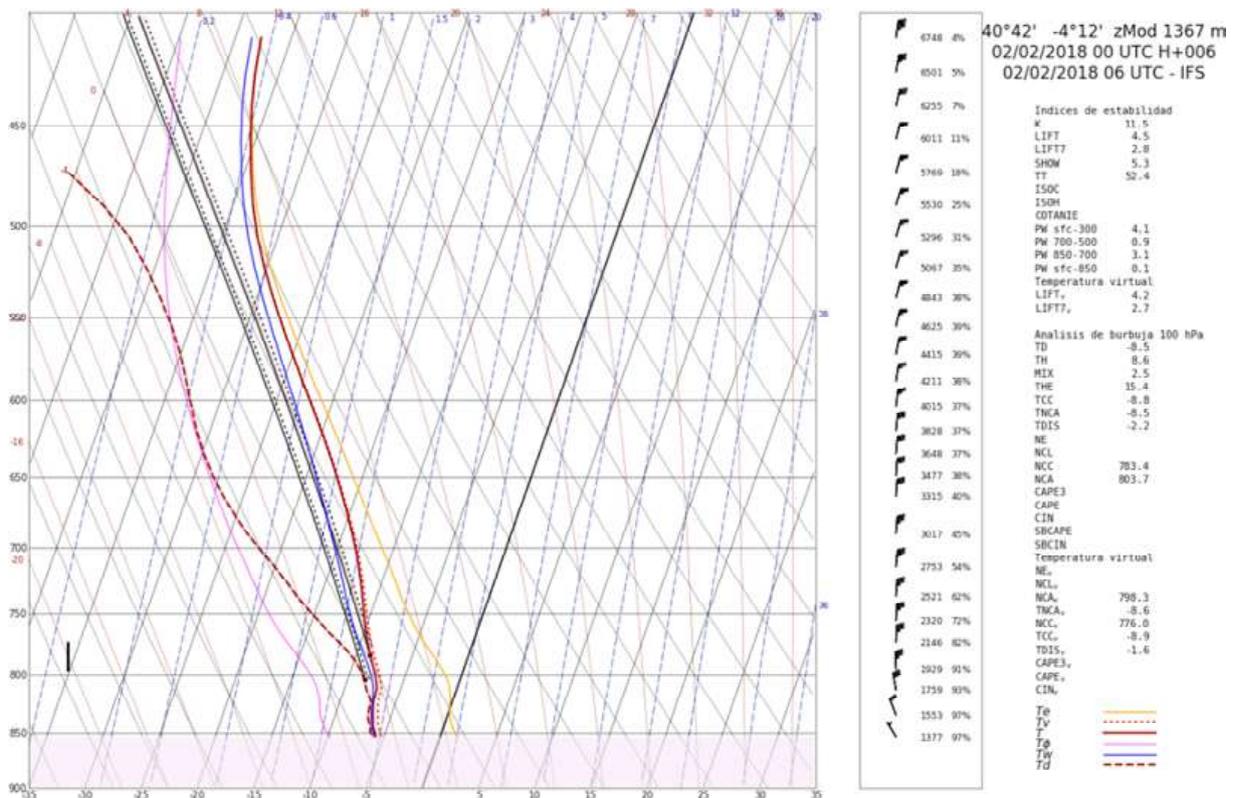


Figura 34. Sondeo pronosticado por el modelo HARMONIE-AROME para San Rafael (Segovia) a las 06 UTC del 2 de febrero de 2018, durante un episodio de llovizna engelante en la vertiente norte de la sierra de Guadarrama. Se puede apreciar que todo el perfil está a temperaturas negativas (es decir, sin presencia de capa cálida) y que la capa saturada se sitúa entre -5 °C y -10 °C, dificultando la nucleación.

La precipitación pronosticada por los modelos numéricos durante episodios de precipitación engelante sin presencia de capa cálida suele ser muy débil, quedando generalmente restringida a barlovento de los sistemas montañosos (figura 35). Por ello, es conveniente utilizar los pronósticos de precipitación acumulada en al menos 3 h, ya que en los de 1 h puede no verse señal al

tratarse de precipitaciones muy débiles. El producto de tipo de precipitación del ECMWF no suele ser muy fiable en los episodios de precipitación engelante sin presencia de capa cálida asociados a nubosidad baja a barlovento de sistemas montañosos. Esto es debido a la baja resolución horizontal del modelo ECMWF, lo que hace que suavice la altitud en regiones de orografía compleja. Por ello, en ocasiones pronostica lluvia cuando finalmente se registra precipitación engelante al subestimar la altura de la localización de interés. En estos casos es conveniente comparar la altitud real con la que estima el modelo (dato que aparece en la parte superior de los meteorogramas), y tener en cuenta la altura estimada a la que se encontrará la isocero. Otros errores cometidos por el producto de tipo de precipitación del ECMWF durante episodios de precipitación engelante sin capa cálida consisten en no detectar lloviznas débiles ligadas a retención orográfica, o pronosticar nieve cuando la temperatura a la que se encuentra la cima de la nubosidad no es suficientemente fría para favorecer la nucleación, registrándose finalmente precipitaciones en fase líquida a pesar de estar todo el perfil a temperaturas inferiores a 0 °C (figuras 36 y 37). El producto de tipo de precipitación del modelo HARMONIE-AROME suele subestimar la llovizna, aunque debido a su mayor resolución espacial suele ser más realista durante episodios de precipitación engelante sin presencia de capa cálida que el modelo del ECMWF. En estos casos, este producto suele mostrar alternancia de píxeles de nieve, lluvia y llovizna engelante, especialmente a barlovento de los sistemas montañosos (figura 38). Por tanto, el predictor deberá aportar valor añadido al pronóstico interpretando si el tipo de precipitación estimado por los modelos es coherente con el diagnóstico hecho con todos los productos descritos anteriormente.

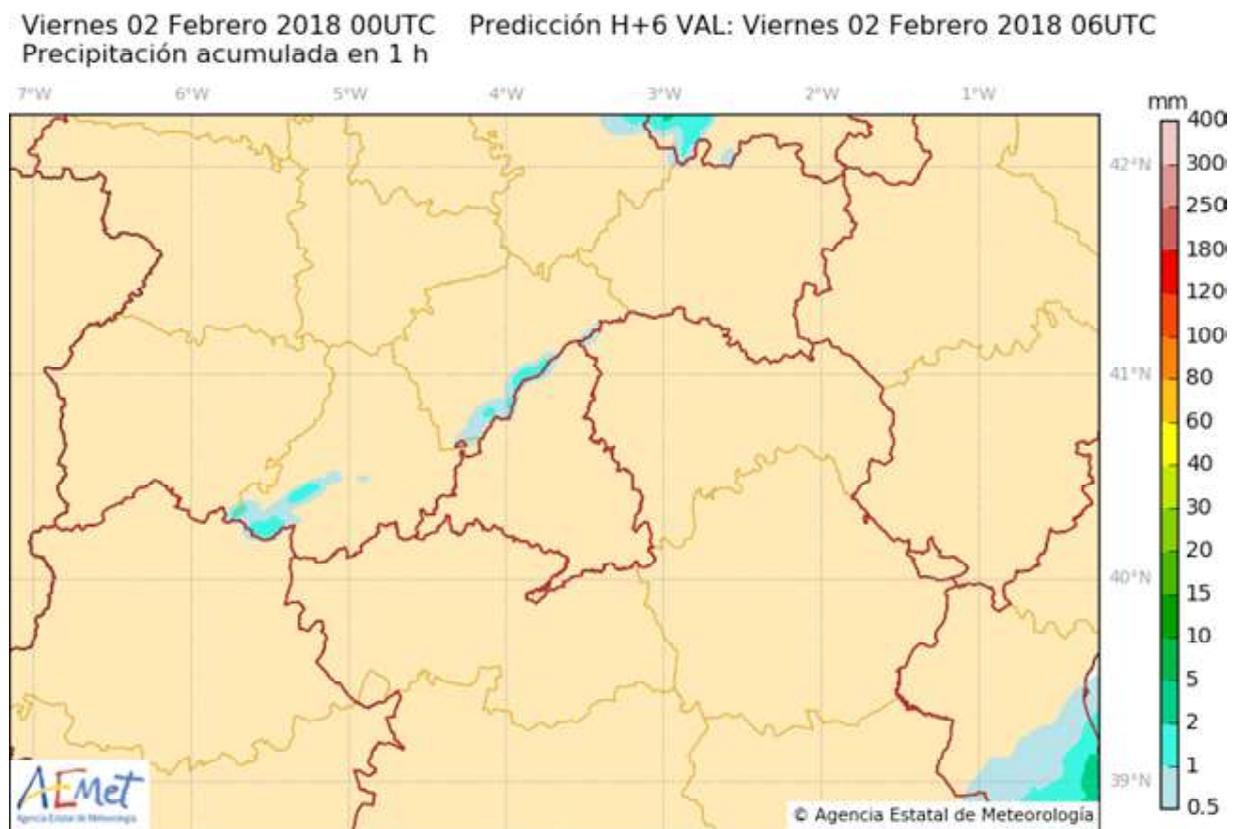


Figura 35. Precipitación acumulada en 1 h por el modelo HARMONIE-AROME para las 06 UTC del 2 de febrero de 2018. El modelo pronosticaba precipitaciones débiles en la vertiente norte de la sierra de Guadarrama, coincidiendo con la observación de llovizna engelante en este área.

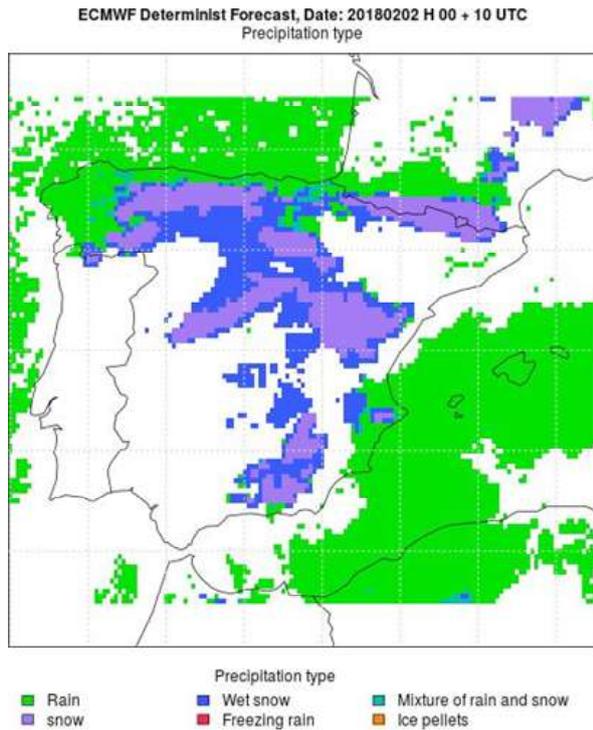


Figura 36. Mapa del tipo de precipitación pronosticado por el modelo ECMWF para las 10 UTC del 2 de febrero de 2018. Verde: lluvia / azul: nieve húmeda / verde agua: aguanieve / morado: nieve / rojo: precipitación engelante / naranja: gránulos de hielo.

Figura 38. Tipo de precipitación esperado por el modelo HARMONIE-AROME durante el episodio de llovizna engelante sin capa cálida del 2 de febrero de 2018. Rojo: granizo / naranja: graupel / amarillo: lluvia engelante / verde claro: llovizna engelante / verde oscuro: nieve / verde agua: aguanieve / azul claro: lluvia / azul oscuro: llovizna.

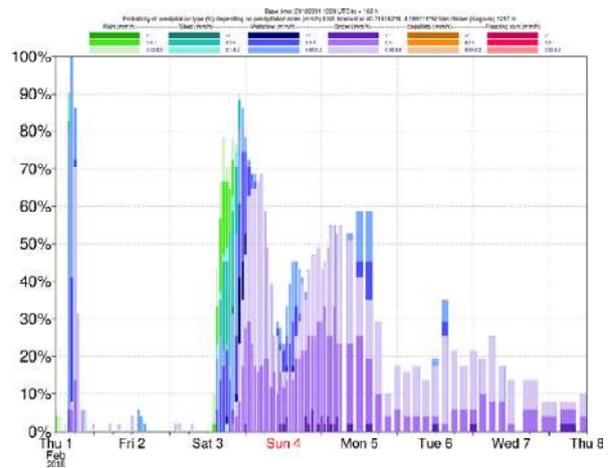
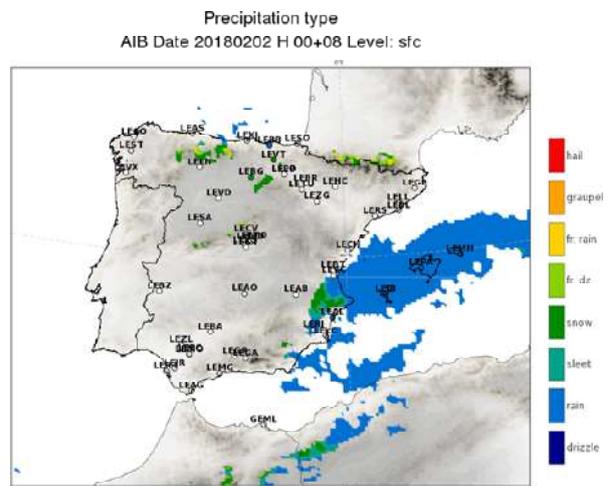


Figura 37. Meteograma del tipo de precipitación esperado por el modelo ECMWF en San Rafael (Segovia) durante el episodio de llovizna engelante sin capa cálida del 2 de febrero de 2018. Verde: lluvia / verde agua: aguanieve / azul: nieve húmeda / morado: nieve / naranja: gránulos de hielo / rojo: precipitación engelante.



En la vigilancia en tiempo real de los episodios de precipitación engelante sin capa cálida habrá que prestar especial atención a los productos satelitales (especialmente los productos que aportan información sobre la microfísica de la cima de la nubosidad), ya que nos advertirán de la presencia de nubes en fase líquida (figura 39) a temperaturas inferiores a 0 °C (por ejemplo, a través del producto de temperatura de la cima de la nubosidad del SAF de *nowcasting*). Lamentablemente, los productos de radar no suelen ser útiles en estos casos, ya que al tratarse de lloviznas débiles causadas por nubes bajas en zonas de montaña, pueden quedar por debajo de la elevación del haz del radar o apantalladas por la orografía y no mostrarse señal a pesar de estarse produciendo llovizna engelante (figura 40).

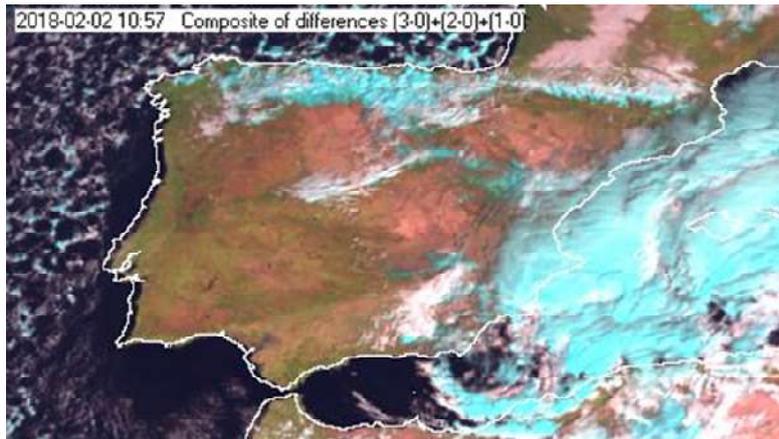


Figura 39. Imagen del producto RGB day natural colors del METEOSAT para las 10:57 UTC del 2 de febrero de 2018. En blanco se muestran las nubes en fase líquida, mientras que en cian se colorean las nubes cuya cima está en fase sólida, así como la nieve en superficie. Se puede apreciar que la nubosidad orográfica retenida a barlovento de la sierra de Guadarrama se encuentra en fase líquida, al representarse en colores blanquecinos.

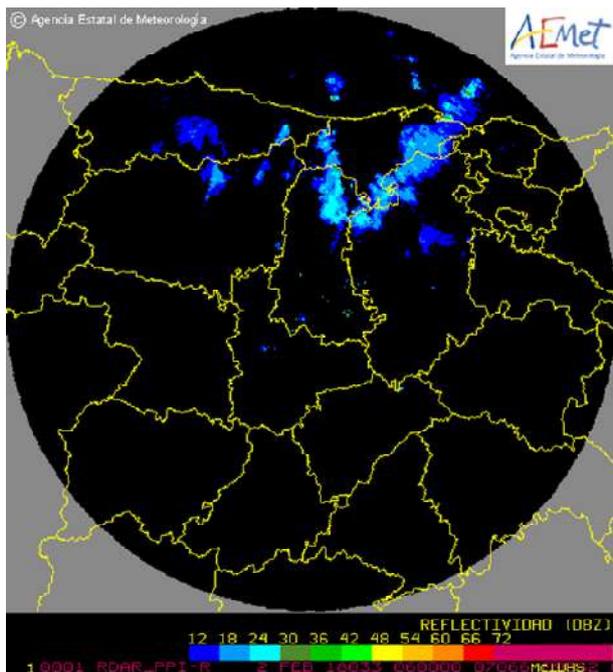


Figura 40. Reflectividad del radar de Palencia (producto Plan Position Indicator, PPI) a las 06 UTC del 2 de febrero de 2018. Ausencia de ecos en la sierra de Guadarrama a pesar de estarse produciendo llovizna engelante.

5. CONCLUSIONES

La precipitación engelante es un fenómeno meteorológico muy poco frecuente, lo que hace muy complicado la recopilación de casos en una base de datos histórica. Además, hay que tener en cuenta que su identificación en los SYNOP depende mucho de la pericia del observador. Por tanto, la familiarización con el fenómeno es un elemento clave para su correcta observación y posterior registro. Lo mismo ocurre en el caso de los METAR, en los que es importante concretar el registro de este fenómeno, e incluso promover campañas de intercomparación entre METAR AUTO con lluvia engelante y los cifrados por humano, para determinar la precisión de cada sistema.

El pronóstico de los episodios de precipitación engelante por parte de los modelos numéricos no es todavía lo suficientemente preciso como para plantear productos automáticos que alerten sobre el riesgo de este fenómeno meteorológico. Sin embargo, a partir de la información proporcionada por las herramientas descritas en el apartado 4 de esta nota técnica, y aplicando los modelos conceptuales característicos de los escenarios con y sin capa cálida, los predictores pueden aportar un valor añadido con el que poder proporcionar información sobre el riesgo de precipitación engelante a una escala espacio-temporal razonable según la incertidumbre inherente a este fenómeno meteorológico.

Utilizar el término de englamiento o precipitación engelante repercutirá en una mejor comunicación. A medida que se utilice la denominación técnica se extenderá su comprensión, similar a otras situaciones meteorológicas, y se generalizará el uso del término, favoreciendo la identificación del fenómeno. Ejemplos recientes de la importante labor de difusión de los medios de comunicación sobre la población general los tenemos en situaciones como ciclogénesis o danas, que son términos que la sociedad ha incorporado a su lenguaje recientemente.

Facilitará, por otra parte, la información de retorno más concreta que se puede obtener tanto desde los usuarios específicos como del público en general (SINOBAS) y medios de comunicación que, haciéndose eco de los efectos provocados en ciertas ocasiones, no aluden de forma específica al fenómeno.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los datos de episodios de precipitación engelante reportados por los observadores del puerto de Navacerrada, en especial a Toño Fernández-Cañadas, que ha registrado en SINOBAS con gran detalle varios casos que fueron de gran utilidad para el desarrollo de esta nota técnica. También agradecen a Estíbaliz Gascón por haber facilitado mapas y meteogramas del tipo de precipitación esperado por el modelo del ECMWF, y a César Rodríguez Ballesteros, Samuel Buisán, M.^a José Martín y David Momblona por sus aportaciones y sugerencias.

7. REFERENCIAS

- BONEKAMP, P. y TIJM, S. (2017). Improvement of microphysical processes in HARMONIE, *ALADIN-HIRLAM Newsletter* n.º 8, pp. 13-20.
- CALL, D. A. (2010). Changes in ice storm impacts over time: 1886-2000. *Wea. Climate Soc.*, 2, pp. 23-35. <https://doi.org/10.1175/2009WCAS1013.1>.
- CALVO, J., MARTIN, D., MORALES, G. y VIANA, S. (2018). HARMONIE-AROME, modelo operativo de escala convectiva de AEMET. Parte I: Modelo de predicción y validación. Mayo 2018. *Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, 1(35). <https://doi.org/10.30859/ameJrCn35p117>.
- CARRIÈRE, J.-M., LAINARD, C., LE BOT, C. y ROBART, F. (2000). A climatological study of surface freezing precipitation in Europe. *Meteor. Appl.*, 7, pp. 229-238. <https://doi.org/10.1017/S1350482700001560>.
- DRAGE, M. A. y THUIS, T. K. (2012). Large-scale measurements and numerical simulations of in-cloud icing around a mountain ridge. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104, pp. 523-531. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.028>.
- FORBES, R., TSONEVSKY, I., HEWSON, T. y LEUTBECHER, M. (2014). Towards predicting high-impact freezing rain events. *ECMWF Newsletter*, No. 141, ECMWF, Reading, United Kingdom, pp. 15-21. <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/17334-towards-predicting-highimpact-freezing-rain-events>.
- GASCÓN, E., HEWSON, T. y HAIDEN, T. (2018). Improving Predictions of Precipitation Type at the Surface: Description and Verification of Two New Products from the ECMWF Ensemble. *Weather and Forecasting*, 33, pp. 89-108. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0114.1>.
- HUFFMAN, G. J. y NORMAN JR., G. A. (1988). The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation. *Monthly Weather Review*, 116(11), pp. 2172-2182.
- KOROLEV, A. V., ISAAC, G. A., COBER, S. G., STRAPP, J. W. y HALLETT, J. (2003). Observation of the microstructure of mixed phase clouds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129, pp. 39-66. <https://doi.org/10.1256/qj.01.204>.
- RAUBER, R. M. y TOKAY, A. (1991). An explanation for the existence of supercooled water at the top of cold clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48(8), pp. 1005-1023.
- RAUBER, R. M., OLTHOFF, L. S., RAMAMURTHY, M. K. y KUNKEL, K. E. (2000). The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events. *Journal of Applied Meteorology*, 39, pp. 1185-1195. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1185:TRIOWR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1185:TRIOWR>2.0.CO;2).
- ROGERS, D. C. (1993). Measurements of natural ice nuclei with a continuous flow diffusion chamber. *Atmospheric Research*, 29(3-4), pp. 209-228.
- STRAPP, J. W., STUART, R. A. e ISAAC, G. A. (1996). A Canadian climatology of freezing precipitation, and a detailed study using data from St. John's, Newfoundland. In *Proceedings FAA International Conference On Aircraft In-flight Icing*, Springfield, Virginia, 6-8 May 1996.