



Con la contribución del instrumento financiero LIFE de la Comunidad Europea. www.agroasesor.es

MAPAS DE RIESGO: HELADAS Y HORAS FRÍO EN LA ESPAÑA PENINSULAR (PERIODO 2002-2012)



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE



Agencia Estatal de Meteorología



Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera
CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL

fMB

Fundació MAS BADIA
Entitat Experimental Agrària

Autores:

Lourdes Martínez Núñez
José Vicente Moreno García
Andrés Chazarra Bernabé
Teresa Gallego Abaroa
M^a Esperanza Avello Miranda
Rosier Botey Fullat

ÁREA DE CLIMATOLOGÍA Y APLICACIONES OPERATIVAS. AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA



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 de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2015

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

NIPO: 281-15-002-1

Depósito Legal: M-28547-2015

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

C/ Leonardo Prieto Castro, 8

28040 Madrid

<http://www.aemet.es/>



@Aemet_Esp



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

RESUMEN

El presente estudio forma parte de los trabajos que AEMET está realizando como socio tecnológico en el proyecto LIFE sigAGROasesor. El objetivo general del proyecto es desarrollar y poner a punto una Plataforma Web de servicios on-line que sirva como Herramienta de Ayuda a la toma de Decisiones (HAD) para el sector agrícola. Este proyecto europeo está liderado y coordinado por INTIA (Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructuras Agroalimentarias), y en él intervienen también como socios ITAP, NEIKER, IFAPA y Fundación Mas Badía. Una de las herramientas que incluye la Plataforma es la “Had Variedades”, que integra el conocimiento existente en redes nacionales para la recomendación de variedades. La disponibilidad de información climatológica que permita conocer con detalle el comportamiento de la variable temperatura es fundamental para poder dar asesoramiento en cuanto a la selección de cultivos y variedades para una determinada zona.

A partir de la información existente sobre temperaturas diarias en el Banco Nacional de Datos Climatológicos de AEMET en el período 2002-2012, se han elaborado inicialmente capas ráster (5 km × 5 km) de temperaturas máximas y mínimas diarias para todo el territorio de la España peninsular, utilizando el krigeado universal con la altitud y la distancia a la costa como variables externas. Posteriormente para el estudio del comportamiento de las heladas se ha elaborado información en capas ráster y mapas de fechas de primera y última helada, así como número medio de días de helada anual. Igualmente y dada la importancia de disponer del número de horas en el que en un determinado período las temperaturas están por debajo de un determinado umbral, se presentan también mapas de número de horas frío por debajo de 7 °C, de 0 °C y de -2 °C, en diferentes períodos, utilizando la fórmula de Crossa-Raynaud.

ABSTRACT

This study consists of a series of tasks carried out by AEMET as a technological partner of LIFE sigAGROasesor project. The overall goal of the project is to develop and refine an on-line services platform of Decision Support Tools (DST) for extensive agriculture. The LIFE sigAGROasesor project is coordinated by INTIA S.A. (Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructuras Agroalimentarias) and involving the following partners: ITAP, NEIKER, IFAPA and Más Badía. One of the Platform tools is “DST for VARIETIES” which integrates knowledge available through national networks to recommend crop varieties. The climatic information availability required to understand in detail the temperature behaviour is a fundamental variable in order to supply crop advisory services and recommend different crop varieties for a particular area.

Initially, several raster layers (5 km x 5 km) of maximum and minimum temperatures were elaborated for Peninsular Spain from the temperature daily data stored at the National Bank of Climatological Data (AEMET) for the 2002-2012 period. In order to accomplish this task a Kriging with External Drift (KED), with altitude and distance from the coast as external variables, was used. Additionally, frost behaviour was studied. The information was elaborated in raster layers with first and last frost maps as well as frost period maps (average number day). Finally, given the importance role that the number of hours plays for a specific period of time in which temperatures are below a certain threshold on extensive crops, several maps were elaborated for different periods by making use of the Crossa-Raynaud formula with different thresholds temperatures (below 7 °C, 0 °C and -2 °C).

ÍNDICE

ÍNDICE FIGURAS	9
1. INTRODUCCIÓN	11
2. METODOLOGÍA	12
2.1. Capas ráster de temperatura máxima y mínima diaria	12
2.2. Mapas de heladas	14
2.3. Mapas de horas frío	14
3. MAPAS DE HELADAS	18
4. HORAS FRÍO	30
4.1. Temperatura umbral 7 °C	32
4.2. Temperatura umbral 0 °C	37
4.3. Temperatura umbral -2 °C	41
5. CONCLUSIONES	45
6. BIBLIOGRAFÍA	47

ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1.	LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES TERMOPLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS	13
FIGURA 2.	FÓRMULA CROSSA-RAYNAUD PARA EL CÁLCULO DE HORAS FRÍO (1955)	15
FIGURA 3.	NÚMERO MEDIO DE DÍAS DE HELADA POR AÑO	22
FIGURA 4.	PROBABILIDAD DE QUE SUCEDA UNA HELADA EN UN AÑO	23
FIGURA 5.	FECHA DE LA PRIMERA HELADA ANUAL (O MÁS TEMPRANA) EN LOS DIEZ AÑOS AGRÍCOLAS CONSIDERADOS	24
FIGURA 6.	FECHA DE LA PRIMERA HELADA ANUAL COMO VALOR DE LA MEDIANA EN LOS DIEZ AÑOS AGRÍCOLAS CONSIDERADOS	25
FIGURA 7.	FECHA DE LA PRIMERA HELADA ANUAL COMO VALOR MEDIO EN LOS DIEZ AÑOS AGRÍCOLAS CONSIDERADOS	26
FIGURA 8.	FECHA DE LA ÚLTIMA HELADA ANUAL (O MÁS TARDÍA) EN LOS DIEZ AÑOS AGRÍCOLAS CONSIDERADOS	27
FIGURA 9.	FECHA DE LA ÚLTIMA HELADA COMO VALOR DE LA MEDIANA EN LOS DIEZ AÑOS AGRÍCOLAS CONSIDERADOS	28
FIGURA 10.	FECHA DE LA ÚLTIMA HELADA COMO VALOR MEDIO EN LOS DIEZ AÑOS AGRÍCOLAS CONSIDERADOS.....	29
FIGURA 11.	NÚMERO MEDIO HORAS FRÍO EN UN AÑO. PARA EL CÁLCULO DE HORAS FRÍO SE HA TENIDO EN CUENTA UNA TEMPERATURA UMBRAL DE 7 °C	33
FIGURA 12.	DESVIACIÓN TÍPICA OBTENIDA PARA EL CÁLCULO DEL NÚMERO MEDIO DE HORAS FRÍO EN UN AÑO (TEMPERATURA UMBRAL 7 °C).....	34
FIGURA 13.	NÚMERO MEDIO HORAS FRÍO OBTENIDAS EN LOS MESES DE SEPTIEMBRE (A), OCTUBRE (B), NOVIEMBRE (C) Y DICIEMBRE (D). PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HORAS FRÍO SE HA TENIDO EN CUENTA UNA TEMPERATURA UMBRAL DE 7 °C	35
FIGURA 14.	NÚMERO MEDIO HORAS FRÍO OBTENIDAS EN LOS MESES DE ENERO (A), FEBRERO (B) MARZO(C) Y ABRIL (D). PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HORAS FRÍO SE HA TENIDO EN CUENTA UNA TEMPERATURA UMBRAL DE 7 °C	36

FIGURA 15.	NÚMERO MEDIO HORAS FRÍO OBTENIDAS EN LOS MESES DE MAYO (A) Y JUNIO (B). PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HORAS FRÍO SE HA TENIDO EN CUENTA UNA TEMPERATURA UMBRAL DE 7 °C	37
FIGURA 16.	NÚMERO MEDIO HORAS FRÍO EN UN AÑO. PARA EL CÁLCULO DE HORAS FRÍO SE HA TENIDO EN CUENTA UNA TEMPERATURA UMBRAL DE 0 °C	38
FIGURA 17.	DESVIACIÓN TÍPICA OBTENIDA PARA EL CÁLCULO DE NÚMERO MEDIO DE HORAS FRÍO EN UN AÑO (TEMPERATURA UMBRAL DE 0 °C)	39
FIGURA 18.	NÚMERO MEDIO HORAS FRÍO OBTENIDAS EN LOS MESES DE NOVIEMBRE (A), DICIEMBRE (B), ENERO (C) Y FEBRERO (D). PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HORAS FRÍO SE HA TENIDO EN CUENTA UNA TEMPERATURA UMBRAL DE 0 °C	40
FIGURA 19.	NÚMERO MEDIO HORAS FRÍO OBTENIDAS EN LOS MESES DE MARZO (A) Y ABRIL (B). PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HORAS FRÍO SE HA TENIDO EN CUENTA UNA TEMPERATURA UMBRAL DE 0 °C	41
FIGURA 20.	NÚMERO MEDIO HORAS FRÍO EN UN AÑO. PARA EL CÁLCULO DE HORAS FRÍO SE HA TENIDO EN CUENTA UNA TEMPERATURA UMBRAL DE -2 °C	42
FIGURA 21.	DESVIACIÓN TÍPICA OBTENIDA PARA LA CUANTIFICACIÓN DEL NÚMERO MEDIO DE HORAS FRÍO EN UN AÑO (TEMPERATURA UMBRAL DE -2 °C)	43
FIGURA 22.	NÚMERO MEDIO HORAS FRÍO OBTENIDAS EN LOS MESES DE NOVIEMBRE (A), DICIEMBRE (B), ENERO (C) Y FEBRERO (D). PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HORAS FRÍO SE HA TENIDO EN CUENTA UNA TEMPERATURA UMBRAL DE -2 °C	44
FIGURA 23.	NÚMERO MEDIO HORAS FRÍO OBTENIDAS EN LOS MESES DE MARZO (A) Y ABRIL (B). PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HORAS FRÍO SE HA TENIDO EN CUENTA UNA TEMPERATURA UMBRAL DE -2 °C	45

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio forma parte de los trabajos que AEMET está realizando como socio tecnológico en el proyecto “sigAGROasesor”. El proyecto LIFE sigAGROasesor es un proyecto español de carácter público, innovador y pionero, que está financiado por la Unión Europea con una duración prevista de 3 años (desde septiembre de 2012 a diciembre de 2015). Su objetivo general es desarrollar y poner a punto una Plataforma Web de servicios on-line que sirva como Herramienta de Ayuda a la toma de Decisiones (HAD) para el sector agrícola. Su carácter innovador viene dado por el desarrollo de un sistema de conocimiento compartido y de asesoramiento avanzado dirigido a agricultores, con acceso a través de internet y con una geolocalización precisa de los datos en sus propias parcelas.

El proyecto está liderado y coordinado por INTIA (Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructuras Agroalimentarias), y en él intervienen también como socios ITAP, NEIKER, IFAPA y Fundación Mas Badía. Todos ellos son entidades públicas expertas pertenecientes a distintas administraciones regionales que cuentan con el apoyo de una amplia red de expertos a nivel nacional (más información en www.agroasesor.com).

Una de las herramientas que incluye la Plataforma es la “Had Variedades”, que integra el conocimiento existente en redes nacionales para la recomendación de variedades. La disponibilidad de información climatológica que permita conocer con detalle el comportamiento de la variable temperatura es fundamental para poder dar asesoramiento en cuanto a la selección de cultivos y variedades para una determinada zona.

La temperatura es uno de los factores físicos de carácter climático que más afecta al desarrollo y crecimiento de las plantas (Morison & Lawlor, 1999; Ruml & Vulic, 2005), pudiendo manifestarse estos efectos sobre un proceso parcial fisiológico o sobre la planta completa (Went, 1953; Ellwood y col. 2013). Esta influencia se manifiesta en dos aspectos, uno positivo dado que las plantas necesitan mantenerse dentro de ciertos umbrales térmicos que permitan su buen desarrollo; y otro negativo, dado que fuera de estos umbrales, las plantas tienen problemas para desarrollarse, pudiendo incluso llegar a producirse daños fisiológicos y morfológicos irreversibles. Se puede decir por lo tanto, que las necesidades térmicas no son constantes y que varían según diferentes factores como el tipo de tejido vegetal, el

estado fenológico, la especie y la variedad (Elías & Castellvi, 1996)

En términos generales se conoce como “óptimo fisiológico” el rango de temperaturas que no afectan negativamente a la planta y en el cual el crecimiento y el desarrollo vegetal es máximo. Por otro lado, se han establecido los conceptos de “umbrales críticos” o “temperaturas extremas” para definir aquellas temperaturas que se sitúan a ambos lados del “óptimo fisiológico”, por debajo (estrés por frío) o por encima (estrés por calor) y que pueden comprometer el desarrollo y supervivencia de las plantas (Bahuguna & Jagadish, 2015).

Went (1953) describió que la mayoría de los procesos fisiológicos en las plantas pueden transcurrir con normalidad en un rango de temperaturas desde 0 °C a 40 °C, por este motivo en este trabajo se consideró interesante centrarnos en

2. METODOLOGÍA

2.1. Capas ráster de temperatura máxima y mínima diaria

En la elaboración del presente estudio se han utilizado los datos de temperatura disponibles en el Banco Nacional de Datos Climatológicos de AEMET, para el período 2002-

un factor limitante como son las heladas, especialmente para los cultivos de siembra primaveral (maíz, girasol y algunas plantas hortícolas).

Técnicamente, la palabra “helada” se refiere a la formación de cristales de hielo sobre las superficies, tanto por congelación del rocío como por un cambio de fase de vapor de agua a hielo (Mota, 1981; Cunha, 1982); no obstante, la palabra se ha utilizado ampliamente para describir un evento meteorológico cuando los cultivos y otras plantas experimentan daño por congelación (Snyder & De Melo-Abreu, 2010).

Además de las heladas, en agrometeorología también resulta de gran interés conocer el número de horas frío al que se exponen los diferentes cultivos con el fin de estudiar la implantación de nuevas variedades que se adapten mejor a las condiciones ambientales locales.

2012 que abarca 10 años agrícolas. El objeto del presente estudio es obtener información derivada de los datos de temperatura, en capas ráster con una resolución de al me-

nos 5 km x 5 km para el territorio de la España peninsular, de manera que dicha información se pueda integrar en la Plataforma sigAGROasesor.

Tanto para el estudio de heladas como para la cuantificación de horas frío considerando diferentes temperaturas umbrales, es necesario disponer de una densidad suficiente de estaciones meteorológicas que registren temperaturas en el período estudiado, lo que ha llevado a considerar prácticamente todas las estaciones de la red termométrica de AEMET (Fig. 1). Más concretamente, para la cuantificación de horas frío es necesario que las estaciones registren las temperaturas diezminutales u horarias, pero solo las llamadas “Estaciones automáticas o completas” realizan un registro continuo de la temperatura ambiental. No obstante, la mayor parte de las estaciones meteorológicas termopluviométricas de la red de AEMET sí que registran temperaturas máximas y mínimas diarias, por lo que es posible utilizar un método indirecto para estimar las horas frío utilizando ambas temperaturas, lo cual permite realizar la cuantificación en la mayoría de los puntos del territorio peninsular y obtener la resolución deseada.

El método que se ha utilizado para interpolar la temperatura máxima y mínima diaria es el krigeado universal con la altitud y la distancia a la costa como variables externas (kriging

with external drift, KED). Este método permite estimar la relación de las temperaturas diarias con las variables externas en el propio krigeado, de manera que permite aplicar una correlación positiva, nula o negativa con la altitud de forma simultánea en diferentes regiones dentro de la zona de estudio (Chazarra, 2014).

Para tener en cuenta el efecto de la continentalidad en las temperaturas máximas y mínimas además de la altitud se incluyó la distancia a la costa como segunda variable externa, mejorando por lo tanto la representación del campo de temperaturas en zonas cercanas al mar.

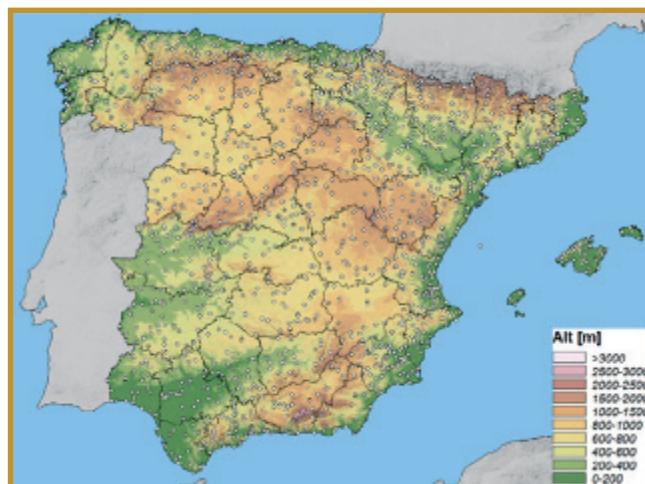


Figura 1. Localización de las estaciones termopluviométricas utilizadas.

2.2. Mapas de heladas

Para el estudio de heladas se han utilizado las capas ráster de temperatura mínima diaria obtenidas según se indica en el apartado anterior. El período considerado ha sido desde el 1 de septiembre de 2002 hasta el 31 de agosto de 2012.

Se ha considerado que una “helada” es la ocurrencia de una temperatura del aire de 0 °C o inferior, medida a una altura entre 1,25 y 2,0 m por encima del nivel del suelo, dentro de una garita meteorológica (Snyder & De Melo-Abreu, 2010).

Se han obtenido los mapas que en este documento se presentan, así como las correspondientes capas ráster, que se citan a continuación:

- Número medio de días de helada por año.
- Probabilidad de que haya helada en un año.

2.3. Mapas de horas frío

Para cuantificar el número de horas frío lo más conveniente es utilizar el “método directo”, que consiste en determinar

- Fecha de la primera helada anual (o más temprana), en los diez años agrícolas considerados.
- Fecha de la última helada anual (o más tardía), en los diez años agrícolas considerados.
- Fecha de la primera helada anual como valor medio, en los diez años agrícolas considerados.
- Fecha de la primera helada anual como valor de la mediana, en los diez años agrícolas considerados (el 50% de primeras heladas se han producido en fechas anteriores y el 50% en fechas posteriores).
- Fecha de la última helada como valor medio, en los diez años agrícolas considerados.
- Fecha de la última helada anual como valor de la mediana, en los diez años agrícolas considerados (el 50% de últimas heladas se han producido en fechas anteriores y el 50% en fechas posteriores).

las horas que transcurren cada día por debajo de una temperatura umbral elegida, para lo cual es necesario disponer

de las bandas del termógrafo o bien disponer de un aparato que registre la temperatura de forma continua al menos cada hora o en intervalos inferiores a una hora, y por medio de un programa computar el tiempo por debajo del umbral (Elías & Castellvi, 1996; García-Merayo y col., 2015).

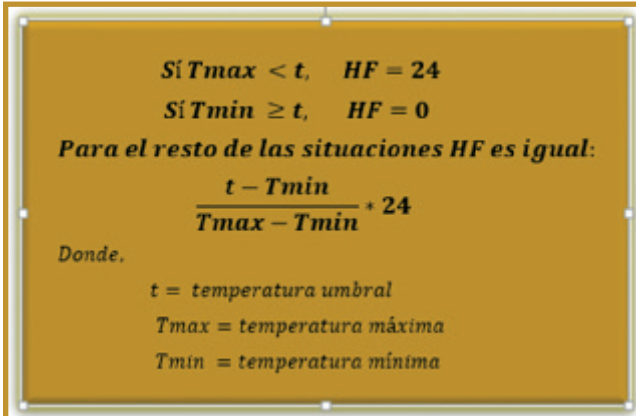
No obstante, tal como se ha comentado anteriormente, nuestro objetivo es utilizar la mayor densidad de estaciones meteorológicas posibles para poder llegar a obtener capas ráster de horas frío de suficiente resolución, en malla de 5 km x 5 km, para todo el territorio de la España peninsular. En muchas estaciones de la red termométrica de AEMET no se dispone de termógrafos o de tales aparatos, por lo que se ha utilizado un método indirecto que permite cuantificar de forma aproximada el número de horas frío.

Por todo lo comentado anteriormente, en la elaboración de los mapas de horas frío se ha utilizado la fórmula de Crossa-Raynaud (Fig. 2). Para ello, fue necesario obtener los datos de temperaturas máximas y mínimas diarias de la base de datos de AEMET correspondientes al período 2002-2012.

Entre todas las fórmulas y modelos propuestos, esta fórmula es ampliamente utilizada en la literatura científica

(ej. Alkoshab, 1989; Garrido & Martínez, 1989; Finetto, 1995, 1997; Lacasta y col., 2004; García y col., 2009; García y col., 2011; Elloumi y col., 2013), aconsejada por la OMM y se ajusta razonablemente bien en latitudes medias y en la zona mediterránea templado-cálida (Gil-Albert, 1989; García-Merayo y col., 2015). Dicha fórmula establece una relación entre el número de horas frío por debajo de una temperatura umbral y las temperaturas extremas diarias.

Si bien, hay que tener en cuenta que la fórmula de Crossa-Raynaud parte de la consideración de que las temperaturas máximas diarias consecutivas del invierno varían muy poco y pueden tomarse por iguales y, además de que estas temperaturas máximas se producen a la misma hora, a medio-



$$\text{Si } T_{\max} < t, \quad HF = 24$$
$$\text{Si } T_{\min} \geq t, \quad HF = 0$$

Para el resto de las situaciones HF es igual:

$$\frac{t - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \cdot 24$$

Donde,

t = temperatura umbral
 T_{\max} = temperatura máxima
 T_{\min} = temperatura mínima

Figura 2. Fórmula Crossa-Raynaud para el cálculo de horas frío (1955).

día (Gil-Albert, 1989); de esta manera las temperaturas a lo largo de un día formarían aproximadamente una onda sinusoidal entre los valores máximo y mínimo. Lógicamente, el valor obtenido a partir de la fórmula será más o menos acertado según que el registro de temperaturas se ajuste más o menos a la curva ideal. Además, hay que tener en cuenta que los datos que se proporcionan a partir de estas fórmulas pueden verse afectados en especial por dos tipos de errores que surgen de las hipótesis de partida. Por un lado, se asume que lo que se obtiene en un determinado punto (el del observatorio) es representativo (igual o muy parecido) de toda la zona; y por otro lado existe un error derivado del ajuste de la curva térmica real a la ideal de la fórmula; ajuste que, en general, varía entre unas zonas y otras (Garrido & Martínez, 1989; García-Merayo y col., 2015).

Dadas las diferencias climatológicas en el territorio peninsular se ha considerado necesario realizar una comparación en la cuantificación de horas frío utilizando ambos métodos: el método directo (datos horarios) y el método indirecto (fórmula de Crossa-Raynaud) en diferentes estaciones meteorológicas seleccionadas por su calidad en los datos (tabla 1). Al igual que en el caso de los mapas de

número de horas frío se partió de los datos de temperaturas horarias, máximas y mínimas diarias disponibles en el Banco Nacional de Datos Climatológicos de AEMET en el período 2002-2012. Para cada año y en todo el territorio considerado las horas frío se han cuantificado desde el 1 octubre hasta el 30 septiembre. En la tabla 1 se muestra la media y desviación típica obtenidas al realizar la suma de las horas frío obtenidas en cada uno de los años estudiados en el período 2002-2012. Se han utilizado tres temperaturas umbrales, determinando de esta manera:

- Número de horas por debajo de 7 °C, temperatura umbral considerada como un valor fijo en la determinación de horas frío (Gil-Albert, 1989).
- Temperaturas por debajo de 0 °C, por ser una temperatura próxima a las heladas.
- Temperaturas por debajo de -2 °C, dado que se considera que a partir de esta temperatura comienzan a producirse daños en el maíz y en otros cultivos de primavera si no han alcanzado su madurez (Nafria y col., 2013).

En general, se observa con el método indirecto una subestimación en las horas frío, que mejora al mismo tiempo que aumentamos la temperatura umbral (tabla 1).

Tabla 1. Número medio y desviación típica obtenidos en la cuantificación de horas frío utilizando el método directo (datos horarios) y el método indirecto (fórmula de Crossa-Raynaud) en diferentes estaciones meteorológicas de AEMET utilizando tres temperaturas umbrales 7 °C, 0 °C y -2 °C en el periodo estudiado (2002-12).

	Temperatura umbral 7 °C		Temperatura umbral 0 °C		Temperatura umbral -2 °C	
	MÉTODO DIRECTO	MÉTODO INDIRECTO	MÉTODO DIRECTO	MÉTODO INDIRECTO	MÉTODO DIRECTO	MÉTODO INDIRECTO
Hondarribia/Guipuzkoa (1014)	933 ± 210	925 ±201	52 ± 29	46 ± 29	11 ± 12	10 ± 11
Igueldo/San Sebastián (1024E)	1056 ± 274	1068 ±267	61 ± 44	62 ± 48	13 ± 20	13 ± 17
Bilbao/aeropuerto (1082)	894 ± 182	848 ±173	28 ± 19	17 ± 13	4 ± 5	3 ± 3
Musel/Gijón (1208H)	425 ± 131	427 ±143	0	0	0	0
Avilés/Asturias (1212E)	925 ± 222	834 ±211	6 ± 6	4 ± 3	0	0
Lugo/Rozas (1505)	2030 ± 263	1911 ±239	333 ± 88	216 ± 60	122 ± 58	78 ± 32
León/Virgen del Camino (1549)	2150 ± 289	1987 ±262	416 ± 176	294 ±123	180 ± 76	112 ± 44
Ourense (1690A)	1390 ± 254	1140 ±185	187 ± 68	92 ±32	58 ± 21	25 ± 8
Segovia (2465)	2623 ± 257	2493 ±237	467 ± 172	418 ±158	197 ± 92	187 ± 90
León (2661)	2988 ± 209	2899 ±203	627 ± 205	538 ±180	275 ± 99	244 ± 101
Madrid/Getafe (3200)	1561 ± 189	1521 ±199	133 ± 57	121 ±55	39 ± 28	35 ± 25
Toledo (3260B)	1504 ± 210	1401 ±192	177 ± 86	149 ±66	59 ± 40	50 ± 31
Cáceres (3469A)	1055 ± 247	991 ±189	50 ± 26	45 ±24	11 ± 10	10 ± 7
Ciudad Real (4121)	1564 ± 229	1448 ±214	169 ± 87	128 ±66	51 ± 34	39 ± 26
Badajoz/Talavera la Real (4452)	985 ± 268	841 ±220	81 ± 74	56 ±49	19 ± 22	14 ± 14
Granada/aeropuerto (5530E)	1712 ± 269	1514 ±250	311 ± 163	198 ±115	122 ± 105	74 ± 67
Murcia/Alcantarilla (7228)	565 ± 124	568±135	18 ± 20	16 ±15	2 ± 3	3 ± 4
Alicante (8025)	362 ± 141	300±114	3 ± 4	2 ±3	0	0
Teruel (8368U)	2745 ± 186	2589±210	745 ± 150	591 ±134	417 ± 115	312 ± 98
Castellón-Almazara (8500A)	437 ± 148	346±127	2 ± 4	1 ±2	0	0
Foronda-Txokiza/Araba (9091O)	2408 ± 248	2364±267	360 ± 86	309 ±85	123 ± 54	111 ± 52
Logroño/Agoncillo (9170)	1800 ± 194	1710±210	178 ± 78	161 ±72	60 ± 41	55 ± 37
Pamplona/Noain (9263D)	2074 ± 288	1986±301	292 ± 92	252 ±87	111 ± 45	96 ± 38
Daroca I(9390)	2359 ± 274	2225±254	568 ± 170	412 ±129	294 ± 100	194 ± 77
Zaragoza/aeropuerto (9434)	1463 ± 200	1388±200	153 ± 59	132 ±58	46 ± 42	42 ± 40
Lleida (9771C)	1827 ± 175	1677±169	288 ± 123	241 ±105	108 ± 57	87 ± 49
Tortosa (9981A)	693 ± 145	569±139	15 ± 12	10 ±9	2 ± 4	1 ± 1

Las capas ráster que se presentan en este documento han sido calculadas utilizando la fórmula de Crossa-Raynaud y son las siguientes:

- Número medio de horas frío anual para cada temperatura umbral: 7 °C, 0 °C y -2 °C.

3. MAPAS DE HELADAS

La importancia biológica de una helada se puede estudiar desde varias perspectivas, por ejemplo su efecto en el desarrollo y crecimiento vegetal, en la acción mecánica del suelo o en la agricultura. Sin embargo, también las heladas tienen consecuencias ecológicas, mediadas principalmente a través de sus efectos en las plantas sensibles (o parte de las plantas), que a su vez se transmiten en cascada a través de interacciones planta-animal, insectos parasitoides y patógenos (Inouye, 2000).

La preocupación por los riesgos asociados a las heladas en los cultivos agrícolas ha sido observada desde los comienzos de la agricultura. Ya en el siglo I d.C, hace aproximadamente 2000 años, los romanos consideraban las bajas tem-

- Desviación típica obtenida al cuantificar el número medio de horas frío anual para cada temperatura umbral: 7 °C, 0 °C y -2 °C.
- Número medio de horas frío obtenido en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril para cada una de las tres temperaturas umbral estudiadas; así como los meses de septiembre, octubre, mayo y junio para la temperatura umbral de 7 °C.

peraturas de invierno y el riesgo de heladas primaverales como factores importantes a la hora de seleccionar las especies a cultivar en una región específica e intentaban proteger los cultivos de los daños causados por la congelación (Columela, 1965).

En las plantas el daño directo por la helada se produce cuando se forman cristales de hielo dentro del protoplasma de las células (congelación intracelular) debido a un enfriamiento rápido pudiendo causar la ruptura mecánica de la célula (Levitt, 1980; Rodrigo, 2000). El daño indirecto puede ocurrir cuando se forma hielo dentro de las plantas fuera de las células (congelación extracelular), produciendo un estrés de agua secundario a las células adyacentes pudiendo

provocar su muerte por deshidratación o plasmólisis (Levitt, 1980; Snyder & De Melo-Abreu, 2010). Por lo tanto, los tejidos vegetales o la totalidad de las plantas se congelarán cuando no puedan evitar la nucleación y no puedan evitar el crecimiento del hielo (Pearce, 2001).

La tipología del daño producido por congelación varía considerablemente en función del tejido vegetal afectado o del estado fenológico. Así por ejemplo, las yemas, hojas nuevas y otros tejidos jóvenes de plantas leñosas son más susceptibles que los tejidos maduros (ej. tallos, hojas maduras), y aunque las hojas maduras pueden ser más susceptibles que las jóvenes en dicotiledóneas herbáceas, los órganos reproductivos de todas las plantas son normalmente más sensibles a las heladas (Sakai y col., 1981; Gil-Albert, 1989).

Al mismo tiempo, las especies o las variedades de cultivos muestran distintos daños por heladas a la misma temperatura y en el mismo estadio fenológico, dependiendo de las condiciones meteorológicas previas (Snyder & De Melo-Abreu, 2010). Esto es debido a que las plantas se adaptan a las temperaturas frías antes de una helada, proceso que se denomina “endurecimiento”. Durante este proceso, probablemente, se produce una disminución de la concentra-

ción de bacterias activas en la nucleación del hielo (INA), al mismo tiempo que pueden ocurrir modificaciones fisiológicas y celulares, como la acumulación de hidratos de carbono, aumento de la presión osmótica, disminución del nivel celular del agua, engrosamiento de las membranas celulares y disminución de la actividad meristemática (Gil-Albert, 1989; Snyder & De Melo-Abreu, 2010).

Por otro lado, las heridas ocasionadas en la planta por el hielo pueden facilitar la infección por agentes patógenos en las raíces, peciolos, yemas o flores (Coscollá, 1980; Hawthorth & Spier, 1992) que a su vez, pueden también facilitar la infección por otros organismos (Paul, 1993).

Las heladas además de causar un gran estrés medioambiental en los cultivos, pueden producir grandes daños económicos (Pearce, 2001) ya que pueden destruir las yemas y las flores, impidiendo que se transformen en frutos o en el caso de una helada tardía en primavera, puede dañar los frutos en formación y provocar malformaciones en los mismos (Rodrigo, 2000).

Por otro lado, a una escala geográfica las heladas pueden limitar la distribución de las plantas y cultivos (Pearce, 2001) y a una escala estacional puede limitar su crecimen-

to y reproducción (Inouye, 2000). Es por ello que en este trabajo se han elaborado una serie de mapas, con el fin de apoyar la toma de decisiones para determinar los momentos más propicios para la siembra y recolección de diferentes cultivos en función del riesgo de heladas y ayudar a seleccionar las especies y variedades más adecuadas, de tal manera, que aprovechen al máximo el período libre de heladas y maximicen su crecimiento vegetativo.

El mapa de número medio de días de helada anual muestra que las zonas más próximas a la costa y con menor altitud respecto al nivel del mar son las que presentan un menor número medio de días de helada en un año (Fig. 3). En contraste, las zonas del interior peninsular y más concretamente las zonas de alta montaña son las que presentan un mayor número medio de días de helada (Fig. 3). Estos datos concuerdan con los descritos anteriormente en el "Atlas climático ibérico" (AEMET & Instituto Meteorología de Portugal, 2011) donde se citan las provincias de León, Palencia, Lleida, Ávila, Soria, Guadalajara y Teruel, así como el área de los Pirineos, por ser las regiones que presentan un número superior de 100 días con temperaturas inferior o igual a 0 °C. Por otro lado, en el mapa de probabilidad de heladas (Fig. 4) se observa que la probabilidad de que suceda una helada en un año se reduce al mismo tiempo que au-

menta la proximidad a la costa y en relación a una menor latitud. Así, la probabilidad de helada en las zonas costeras del norte peninsular es mucho mayor que la probabilidad de helada en las zonas costeras del sur peninsular (Fig. 4).

Si bien, es necesario profundizar más y conocer las fechas, aún sólo aproximadas, en las que pueda producirse una helada con el fin de poder predecir la incidencia de la helada en los cultivos (Bouchet, 1966), que dependerá de, como se describió anteriormente entre muchos factores, del estado fenológico en el que se encuentre la especie o variedad.

En los mapas de primera helada (Figs. 5, 6 y 7) y última helada (Figs. 8, 9 y 10) se puede comprobar que la altitud respecto al nivel del mar y la latitud son los principales condicionantes. Varios autores (ej. Elías Castillo & Ruiz Beltrán, 1973, 1977; Ribas y col., 1988) han descrito la existencia de una "estación de crecimiento" para los cultivos definida como el intervalo de tiempo transcurrido entre la última y la primera helada en el cual se pueden producir daños en el cultivo y por lo tanto pueden limitar el período de crecimiento. Para determinar esta "estación de crecimiento media" en una zona es necesario conocer las fechas de la primera y última helada. En términos generales para

el período seleccionado al considerar valores calculados con la mediana (Figs. 6 y 9) en lugar de con la media (Figs. 7 y 10) se observa un período de heladas mayor en varias zonas. En términos estacionales se identifica que en primavera en el área de los Pirineos y en algunas provincias, como las citadas anteriormente, todavía se registran heladas mientras que en verano son casi inexistentes (Figs. 8, 9 y 10).

Si bien estos mapas incluyen elementos de interés general, para tomar decisiones desde un punto de vista agronómico también es necesario conocer la sensibilidad de los cultivos y/o variedades a las heladas.

Levitt (1980) estableció cuatro categorías de sensibilidad a la congelación: (1) frágiles (aquellas que no han desarrollado la evitación de la congelación intracelular, por ejemplo las plantas tropicales); (2) ligeramente resistentes (son sensibles al enfriamiento hasta los $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, sería el caso de los árboles frutales subtropicales, árboles caducifolios, y cultivos hortícolas); (3) moderadamente resistentes (aquellas que pueden acumular suficientes solutos para resistir el daño por heladas hasta temperaturas tan bajas como $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, principalmente evitando el daño por deshidratación); y (4) muy resistentes (aquellas capaces de evitar la congelación intracelular así como evitar el daño debido a la desecación de las células).



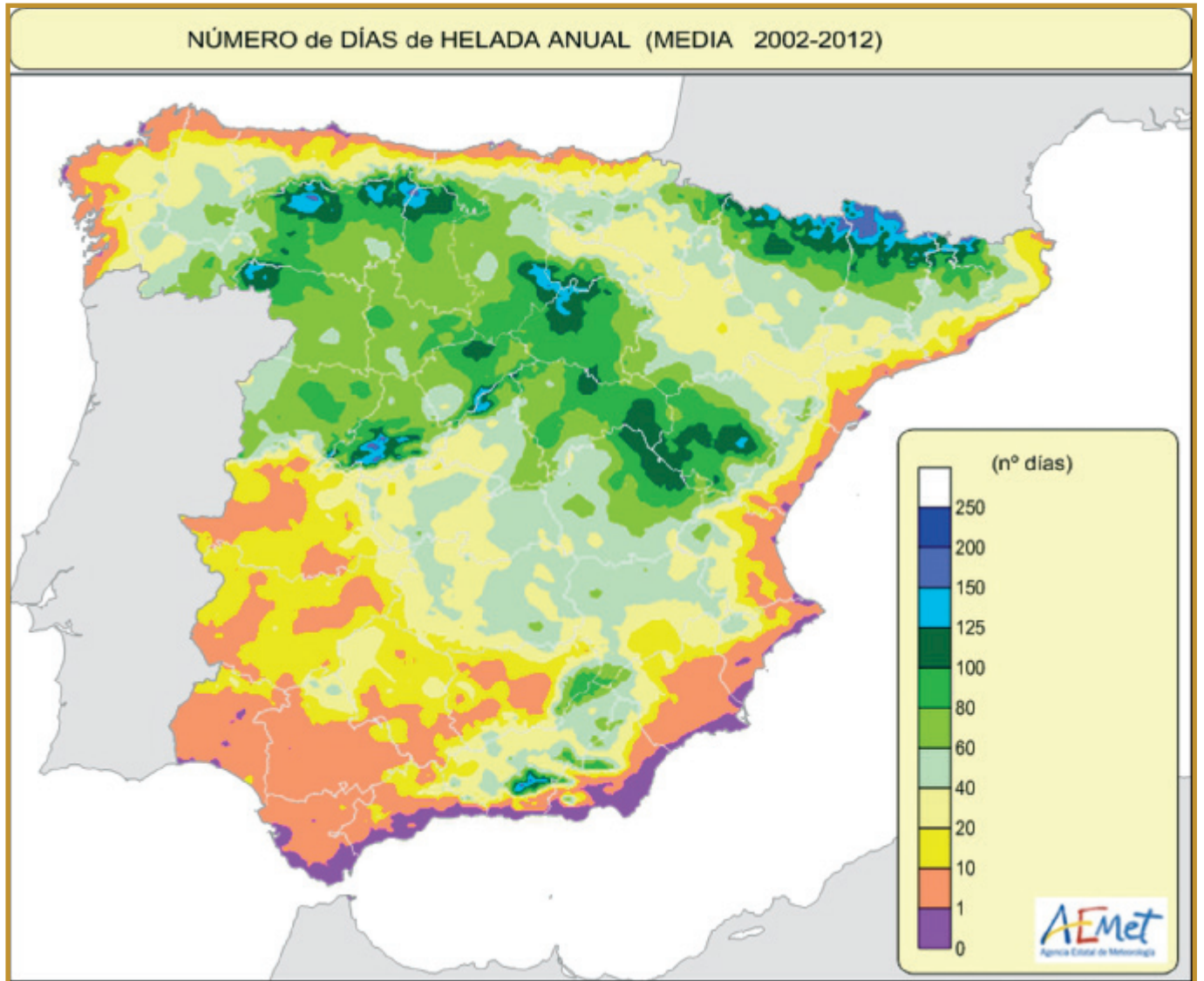


Figura 3. Número medio de días de helada por año.

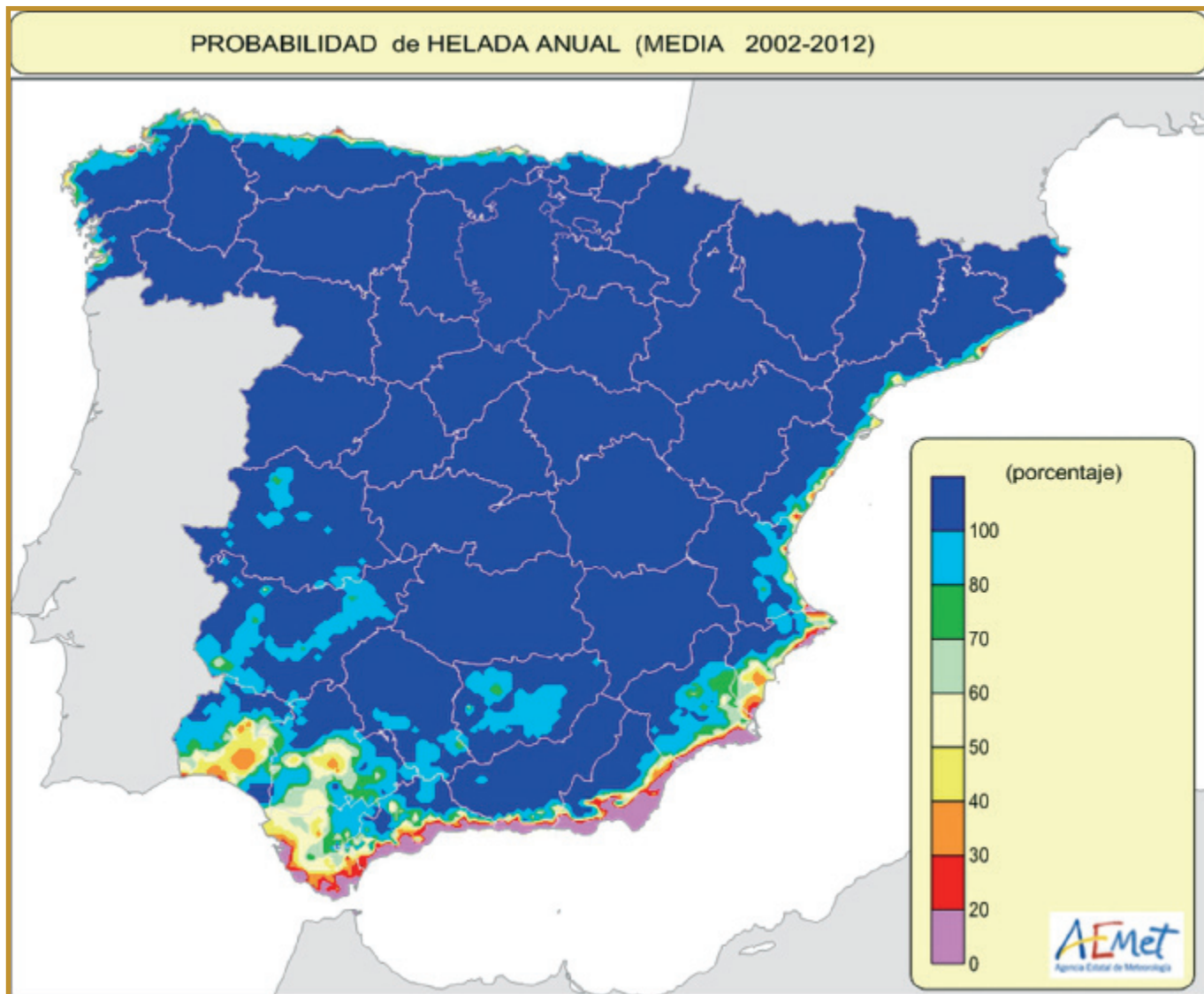


Figura 4. Probabilidad de que suceda una helada en un año.

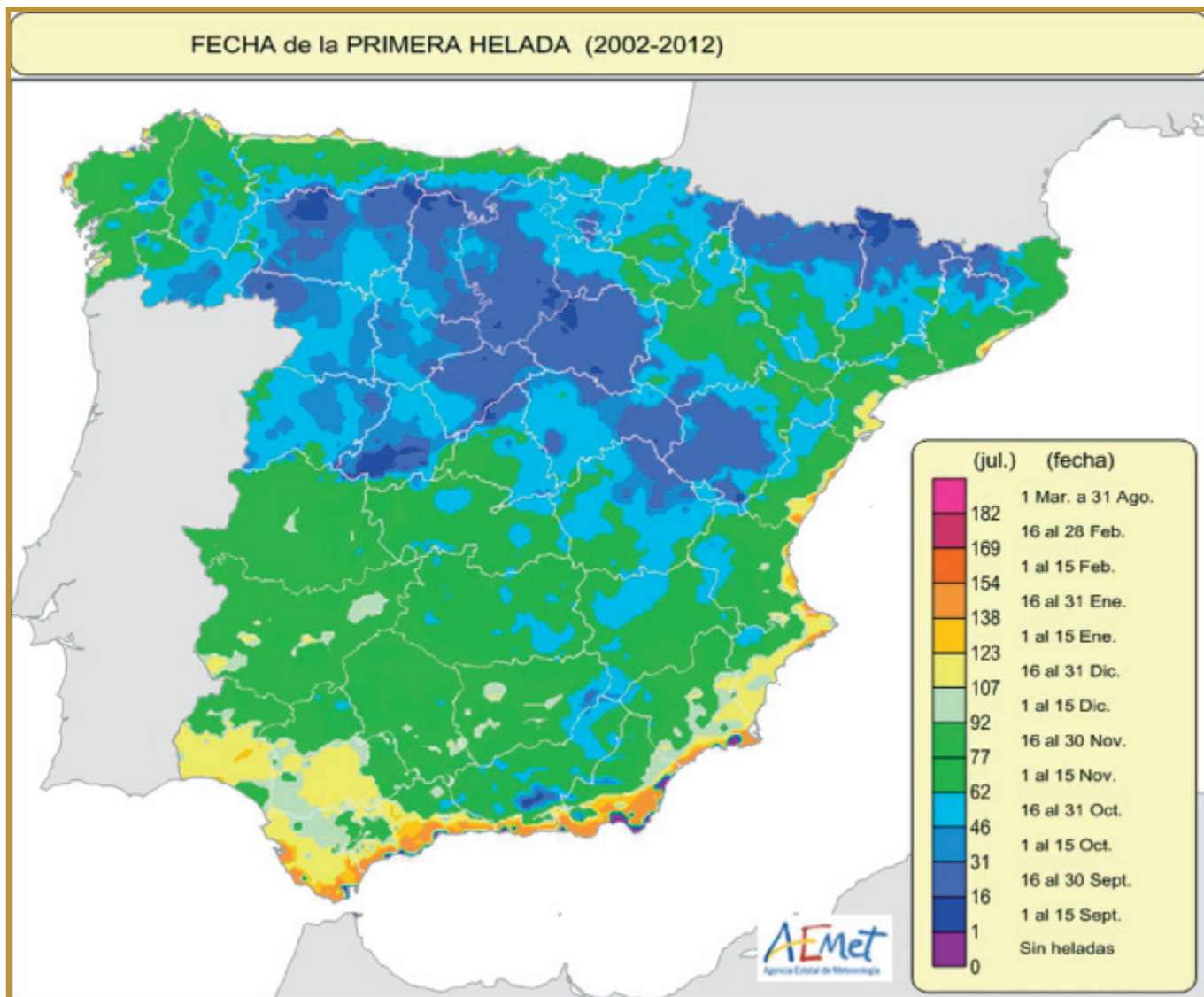


Figura 5. Fecha de la primera helada anual (o más temprana) en los diez años agrícolas considerados.

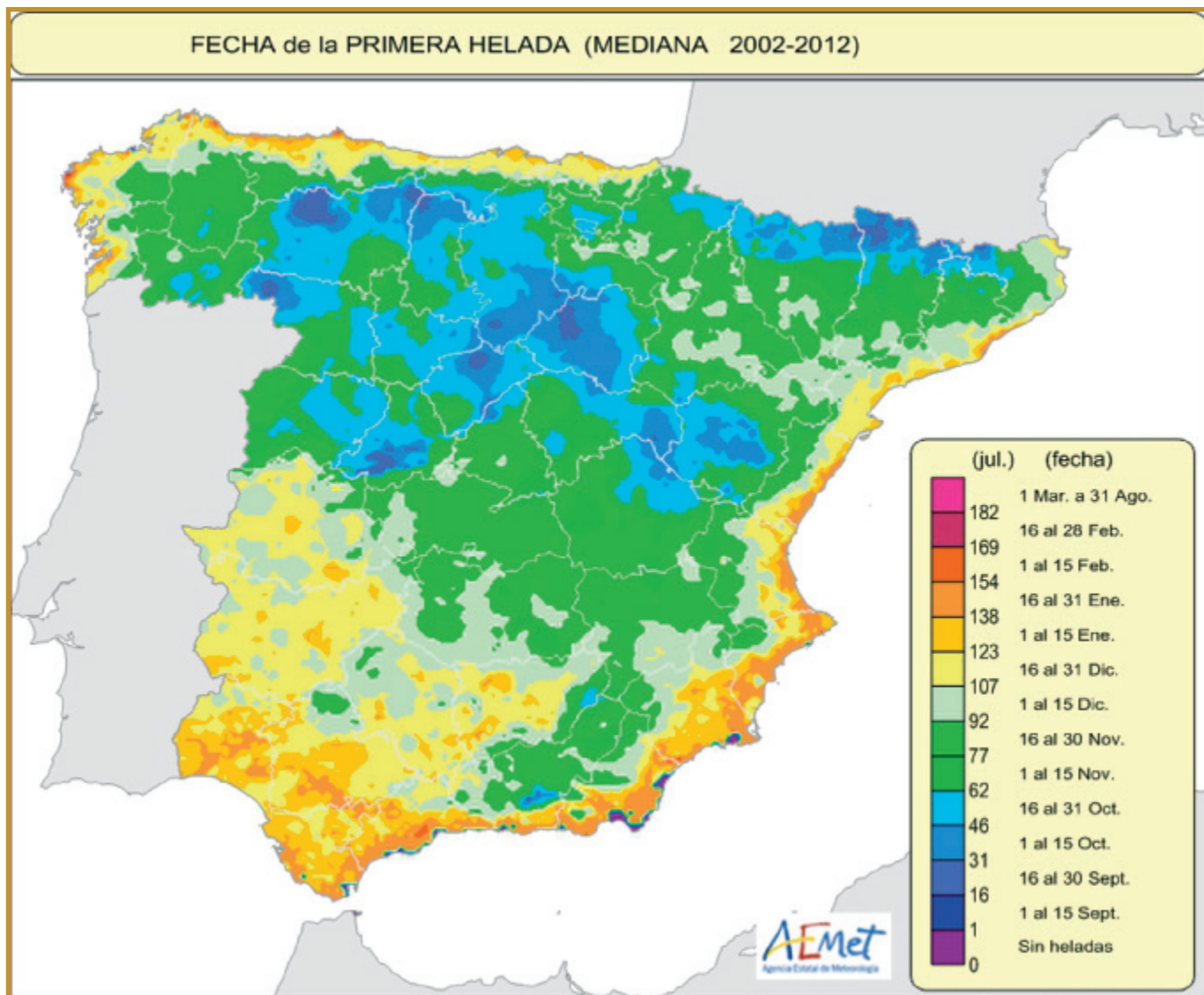


Figura 6. Fecha de la primera helada anual como valor de la mediana en los diez años agrícolas considerados.

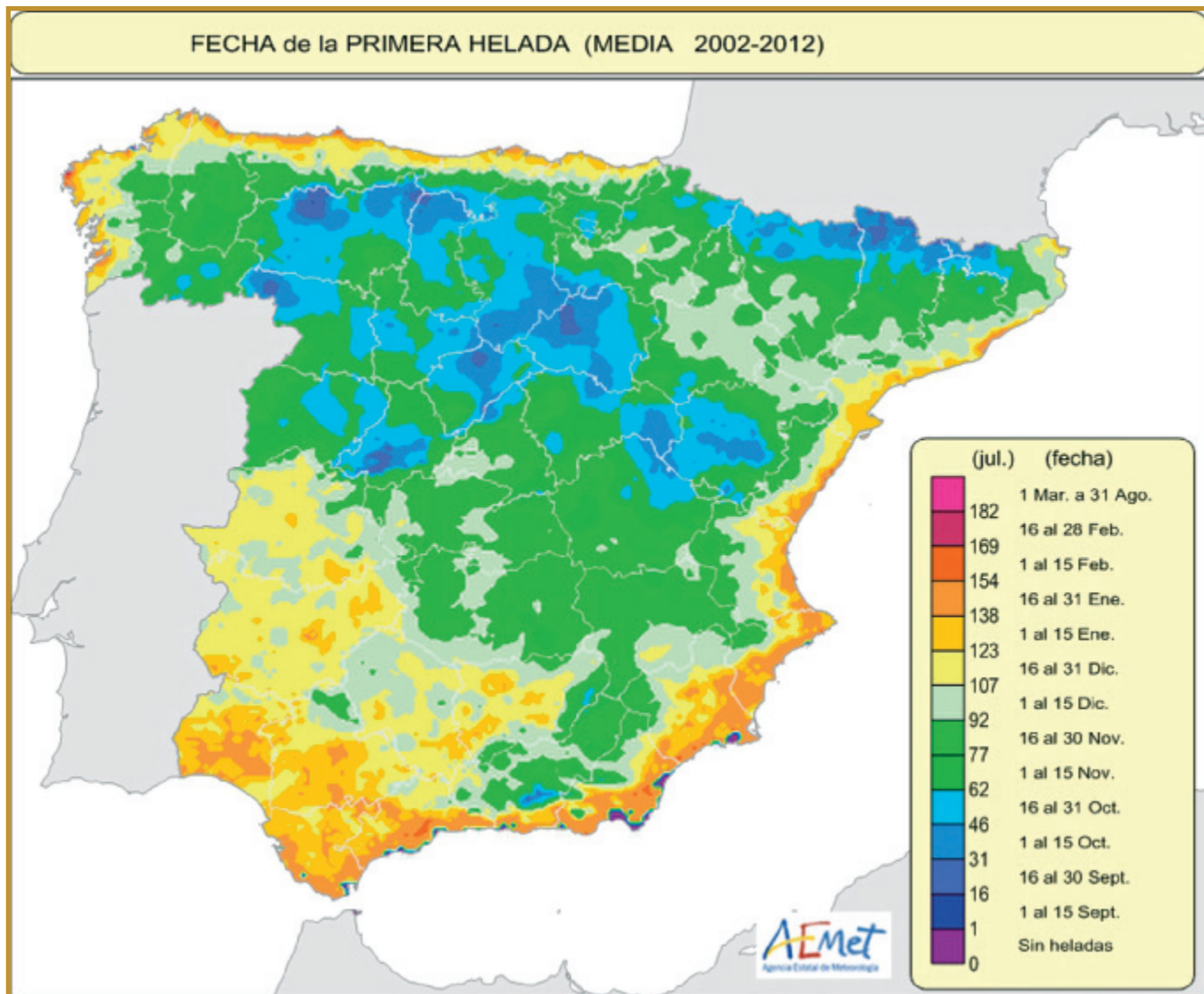


Figura 7. Fecha de la primera helada anual como valor medio en los diez años agrícolas considerados.

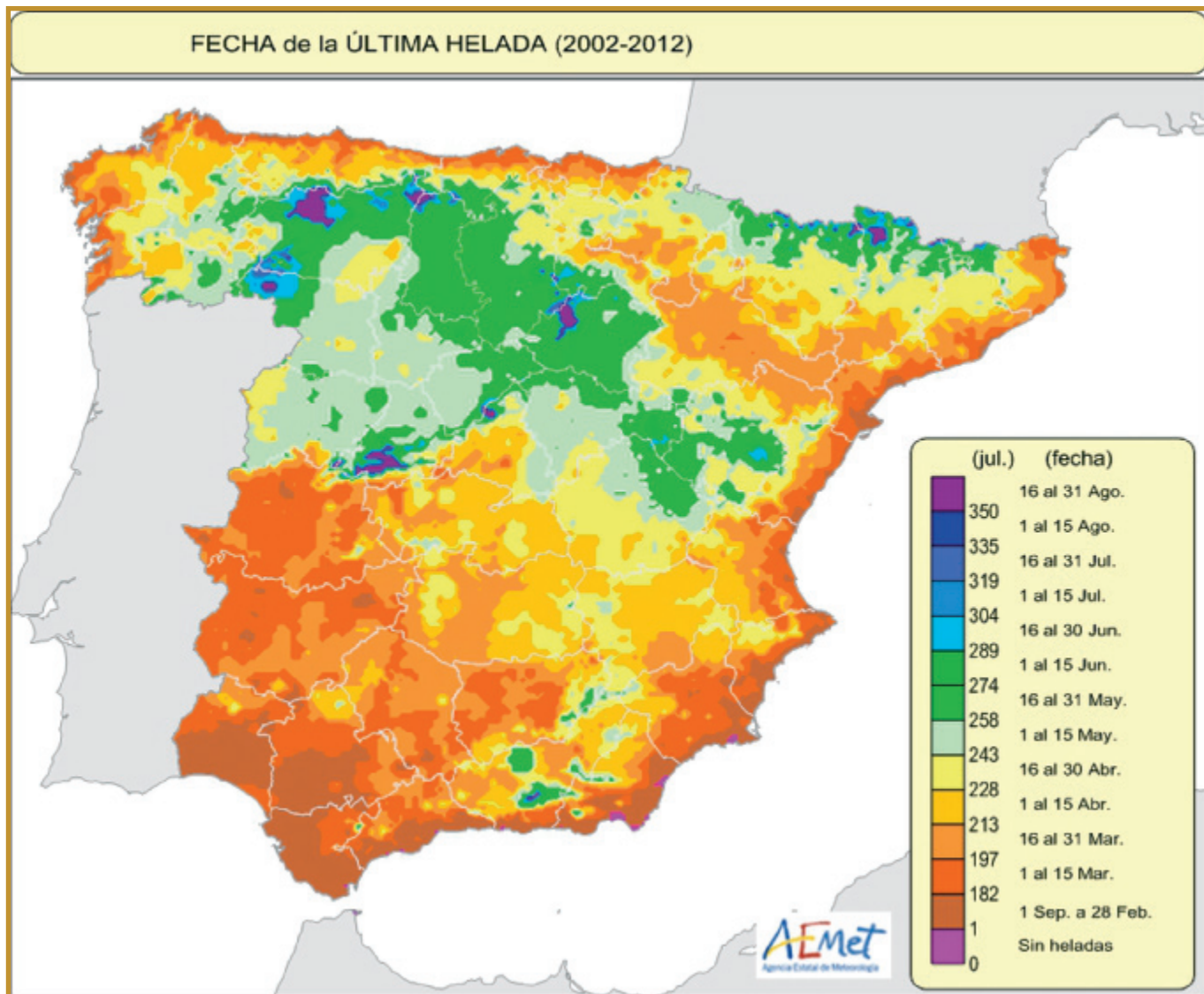


Figura 8. Fecha de la última helada anual (o más tardía) en los diez años agrícolas considerados.

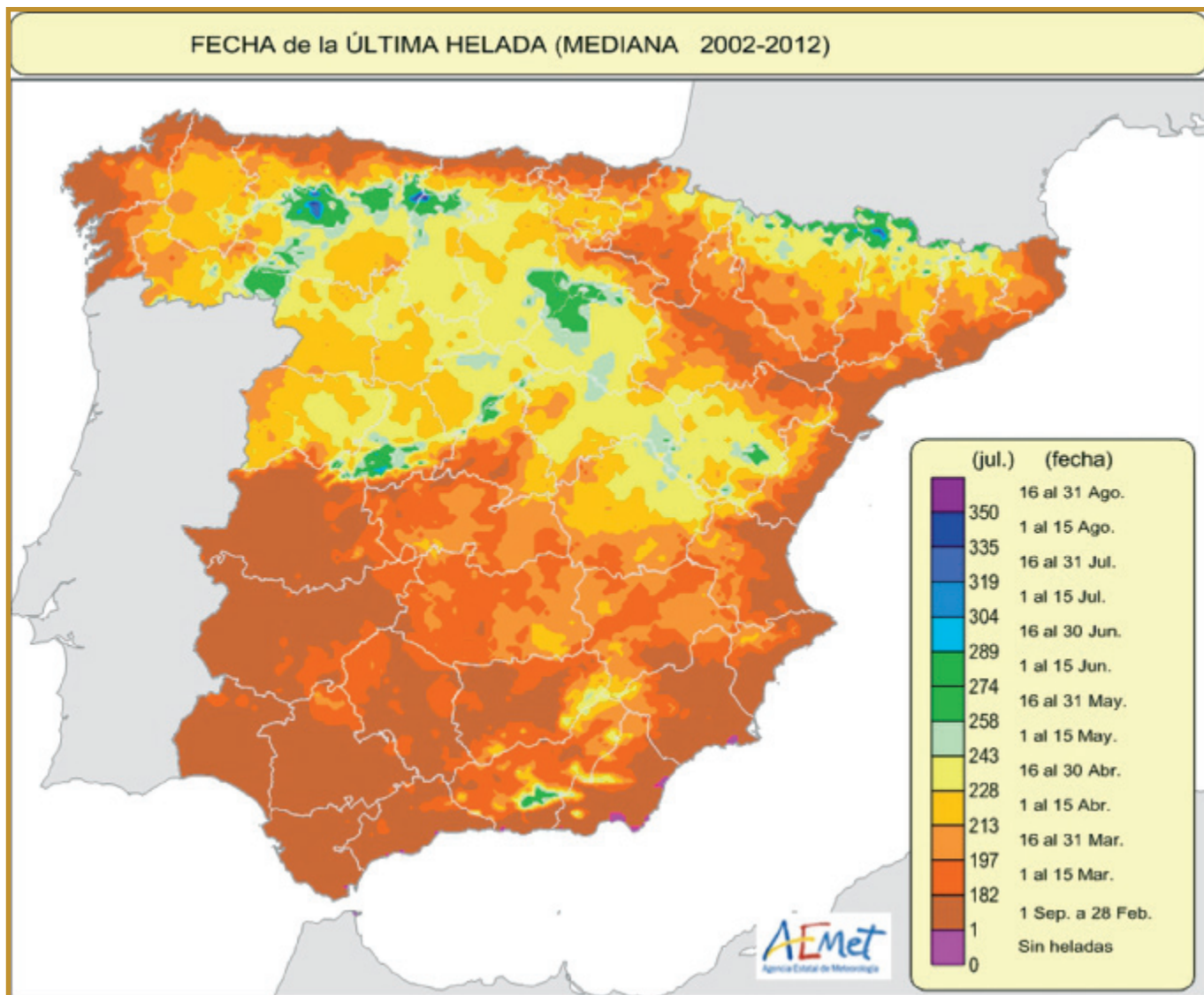


Figura 9. Fecha de la última helada como valor de la mediana en los diez años agrícolas considerados.

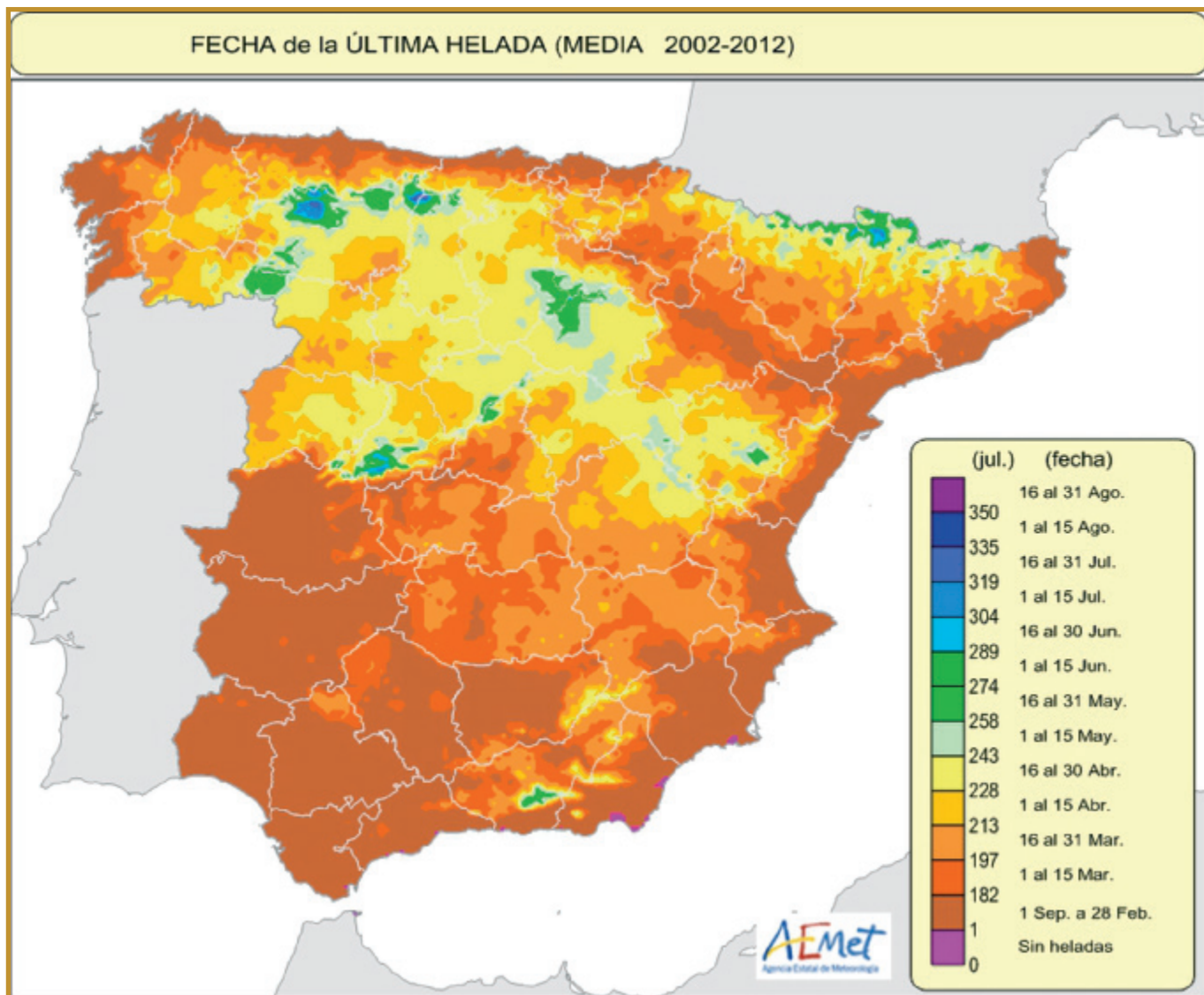


Figura. 10 Fecha de la última helada como valor medio en los diez años agrícolas considerados.

4. HORAS FRÍO

El conocimiento del número de horas en el que, en un determinado período de tiempo, las temperaturas están por debajo o por encima de determinados umbrales es muy útil no sólo en el sector agrícola sino también en otros muchos sectores como en la construcción y el energético, donde por ejemplo permite conocer las necesidades de calefacción o refrigeración en los edificios.

Es a partir de los trabajos de Coville (1920) cuando se comenzó a señalar la acción favorable de las bajas temperaturas durante el período de descanso de algunos árboles y arbustos. Si se tienen en cuenta los efectos que sobre los vegetales provocan las bajas temperaturas, se ha observado que ciertas especies arbóreas, bulbos, rizomas o tubérculos necesitan pasar un período mayor o menor de tiempo durante el cual las temperaturas deben bajar de un cierto umbral, estas necesidades son diferentes para cada tipo de planta y se manifiestan, sobre todo, en dos fenómenos: uno es la llamada “vernalización” que es el proceso necesario en muchas especies para florecer normalmente y el otro es el de la parada de crecimiento vegetativo o de reposo invernal, que se produce en la mayoría de los vegetales de nuestra región (Cabello y col., 1987; Martí, 1994). Se podría decir por lo tanto, que las bajas temperaturas son un factor

climático decisivo en el desarrollo de la planta al tener una influencia en la brotación, inducción de la floración y cuajado de frutos (Tersoglio y col. 2006). De manera que, se ha comprobado que las yemas de las plantas que están en un estado de dormición profunda (endodormición) no salen del mismo hasta tanto no hayan recibido suficiente cantidad de frío invernal (Tabuenca, 1965; Tersoglio y col., 2006).

A pesar de su complejidad (otros factores también influyen como la oscilación térmica a lo largo del día, la radiación solar, la iluminación, la humedad del suelo y del aire, el tipo de suelo) a efectos prácticos el proceso fisiológico del reposo invernal suele relacionarse principalmente con la temperatura del aire (Lacasta y col. 2004; Guo y col., 2015). Así, se establecen determinados “requerimientos de frío” para cada especie o variedad (ej. Couvillon, 1995; Elías & Castellvi, 1996; Luedeling y col., 2011) que han sido cuantificados clásicamente por el número de horas que se han registrado durante el reposo invernal por debajo de una temperatura umbral, siendo denominadas como “horas frío” (Crossa-Raynaud, 1955; Garrido & Martínez, 1989, Martí, 1994; Baldocchi & Wong, 2008; García-Merayo y col., 2015). Aunque, se ha cuestionado la utilidad del concepto

de horas frío y se ha propuesto la utilización de variables más sofisticadas como las unidades frío (chill units, CU) (Ricardson y col., 1974) y el concepto de modelo dinámico (Fishman y col., 1987a, 1987b), actualmente el conocimiento de horas frío sigue utilizándose como una herramienta de éxito (García-Merayo y col., 2015).

Según lo descrito hasta ahora es lógico suponer que debido a la influencia de la temperatura cada variedad tendrá una zona geográfica adecuada para su cultivo, ya que la existencia de una deficiencia en la acumulación de horas frío provocará una serie de desórdenes fisiológicos que podrían afectar negativamente a la producción final (Gariglio y col., 2006). Estos desórdenes fisiológicos serán más o menos importantes según el déficit de frío que haya sufrido la planta, aunque otros factores como las heladas invernales, insolación... también pueden aumentar o disminuir los daños propios atribuibles a este déficit de frío (Melgarejo, 1996). Además, varios autores (Rosenweig & Hillel, 1998; Gutierrez y col. 2006) han descrito que las plagas e infestaciones de insectos son más propensas de ocurrir si la exposición de frío durante el invierno es insuficiente.

Si bien, hay que tener en cuenta que cada una de las fases en que se divide el ciclo vegetativo de los cultivos requiere unas condiciones de temperatura óptimas en las cuales las plantas

se desarrollan con mayor rapidez, siendo necesario que se den unas temperaturas determinadas para que la planta pase a la siguiente fase de su ciclo vegetativo (Martí, 1994). Esto implica que la existencia de horas frío puede acelerar la expansión de las hojas durante el período de foliación (Chmielewski y col., 2004), pero efectos muy diferentes se observan en otros períodos como es el de floración y polinización provocando un retraso, siendo desfavorables en ambos períodos.

En la literatura científica se han llevado a cabo muchos estudios para determinar el requerimiento de frío, observándose en general valores que se sitúan entre 500 y 1000 horas de frío (Urbano, 1995), siendo un hecho evidenciado que la cantidad de horas frío depende de cada especie y variedad (Knight, 1801; Samish, 1954; Saure, 1985; Luedeling y col. 2011). Más recientemente se ha sugerido que una misma variedad podría tener diferentes requerimientos de frío en función de la zona climática en la que se desarrolla el cultivo (Luedeling & Brown, 2011). De manera que, los intentos para establecer las necesidades de frío en las diferentes especies y variedades se han visto dificultadas por las diferencias climáticas existentes en diferentes años agrícolas, factores como la mayor o menor exposición solar, frecuencia de nieblas o de cielos nubosos o cubiertos, influyen al modificar las temperaturas de las yemas y quedar

éstas expuestas a un mayor o menor número de horas frío (Cabello y col., 1987; Elías & Castellvi, 1996). Por último, también hay que considerar que se han utilizado diferentes procedimientos para medir o calcular el número de horas frío (ej. Chandler, 1942; Crossa-Raynaud, 1955; Richardson y col., 1974; Fishman y col., 1987a, 1987b; Erez y col., 1990) con diferentes temperaturas umbrales, considerándose temperaturas fisiológicamente estimuladoras las inferiores a 7 °C (Urbano, 1995; Elías & Castellvi, 1996).

4.1. Temperatura umbral 7 °C

En la Figura 11 se ha representado el número medio de horas frío en un año y su desviación típica en la Figura 12, para una temperatura umbral de 7 °C. El mayor número medio de horas frío se observa en las submeseta norte, en el sistema ibérico y en los Pirineos llegando a obtenerse entre 2500 y 3000 horas frío. El valor medio de horas frío desciende según nos acercamos al litoral, siendo los valores más bajos en la zona sur donde apenas se llegan a alcanzar 500 horas frío (Fig. 11).

Realizando un estudio más detallado se ha representado el número medio de horas frío mensuales desde septiembre hasta junio (Figs. 13, 14 y 15). Los meses que presentan un mayor número medio de horas frío registrado durante el pe-

De todo lo anterior se desprende la necesidad de conocer la cantidad de horas frío que se registran en la península ibérica, siendo esta información muy valiosa a la hora de determinar si los cultivos presentes están ubicados en una zona adecuada, y si es posible introducir nuevas especies o variedades más convenientes y económicamente más viables. Para ello se han elaborado mapas que muestran el número de horas frío teniendo en cuenta tres temperaturas umbrales: 7 °C, 0 °C y -2 °C.

ríodo estudiado fueron diciembre (Fig. 13d), enero (Fig. 14a) y febrero (Fig. 14b).

Si nos centramos en las zonas más frías de la península, los mapas muestran como el número medio de horas frío comienza a registrarse en el mes de octubre (Fig. 13b) y continúa aumentando hasta el mes de abril (Fig. 14d), donde existen zonas que aún registran 500 horas frío.

Finalmente, los meses de septiembre (Fig. 13a) y junio (Fig. 15b) son los que muestran un menor número medio de horas frío siendo inexistentes en un amplio rango de la zona peninsular.

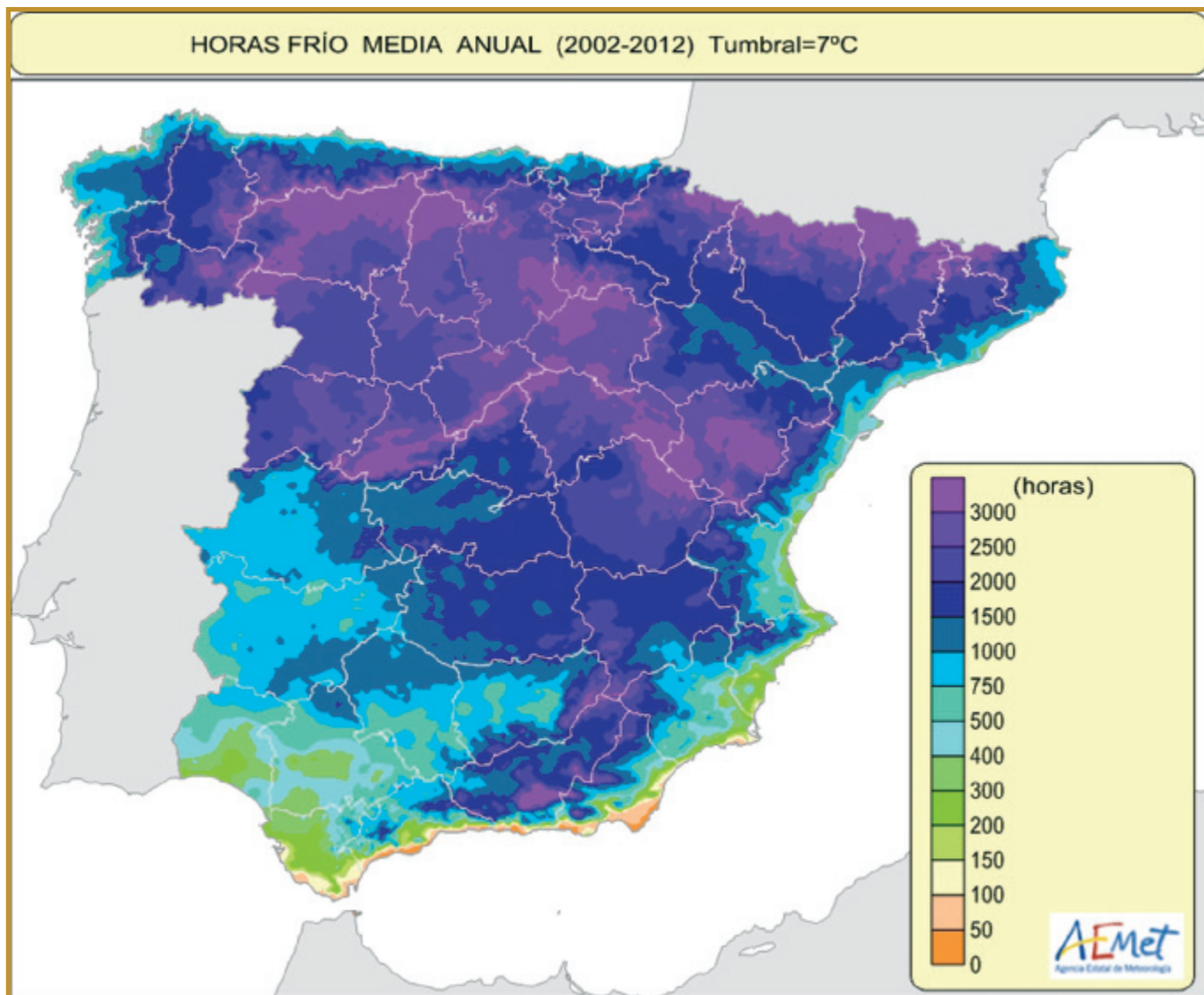


Figura 11. Número medio horas frío en un año. Para el cálculo de horas frío se ha tenido en cuenta una temperatura umbral de 7 °C.

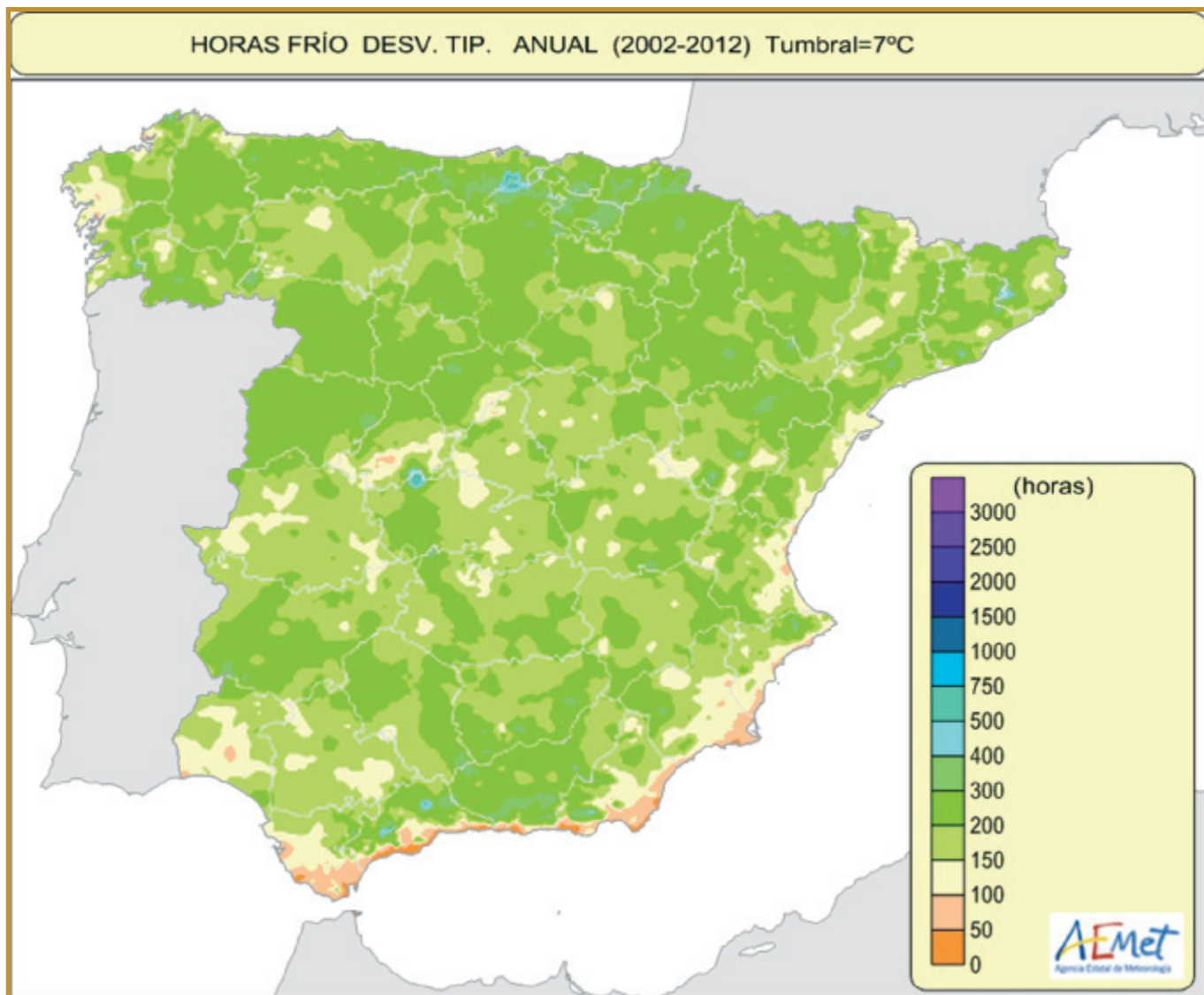


Figura 12. Desviación típica obtenida para el cálculo del número medio de horas frío en un año (temperatura umbral 7 °C)

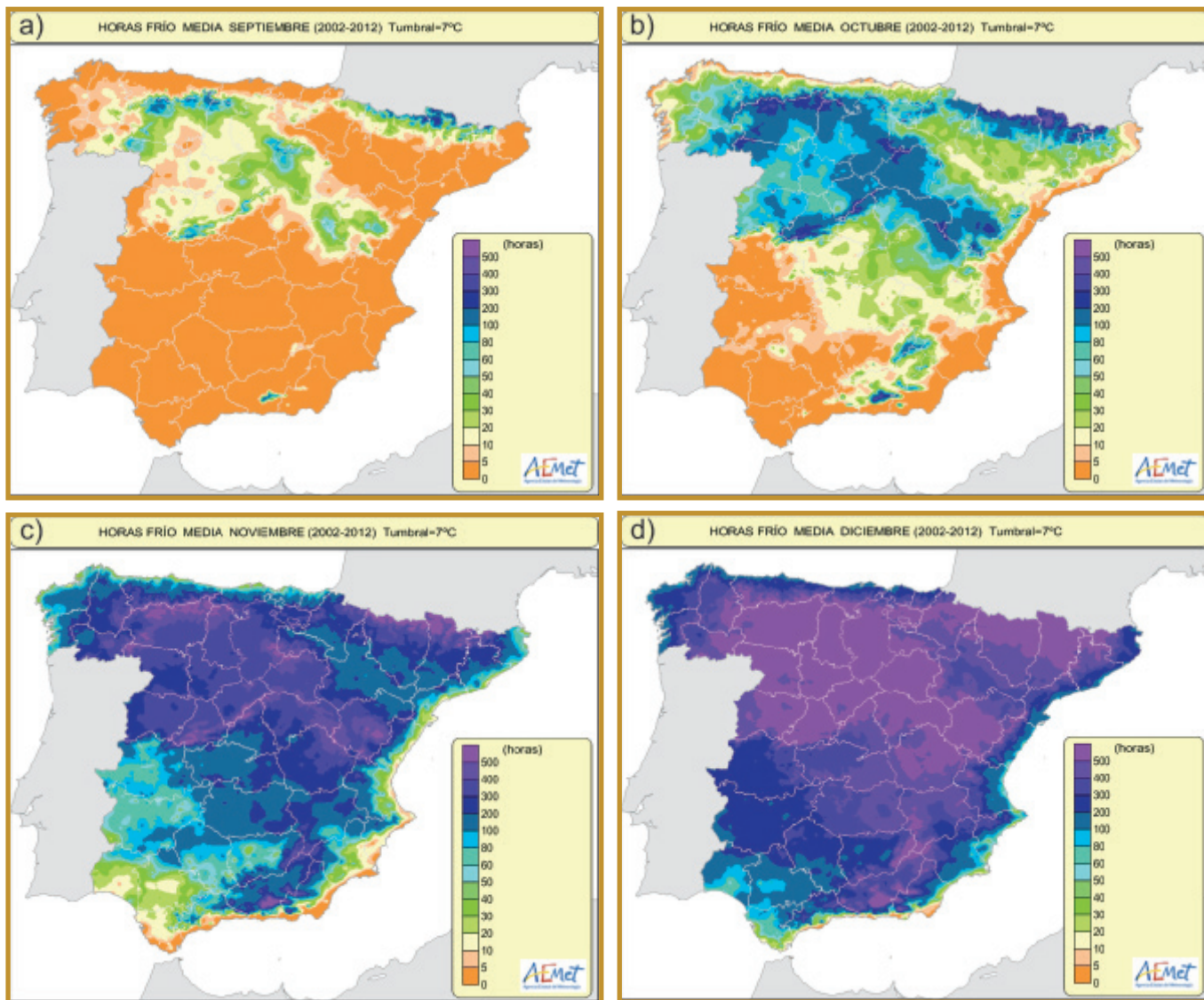


Figura 13. Número medio horas frío obtenidas en los meses de septiembre (a), octubre (b), noviembre (c) y diciembre (d). Para la cuantificación de horas frío se ha tenido en cuenta una temperatura umbral de 7 °C.

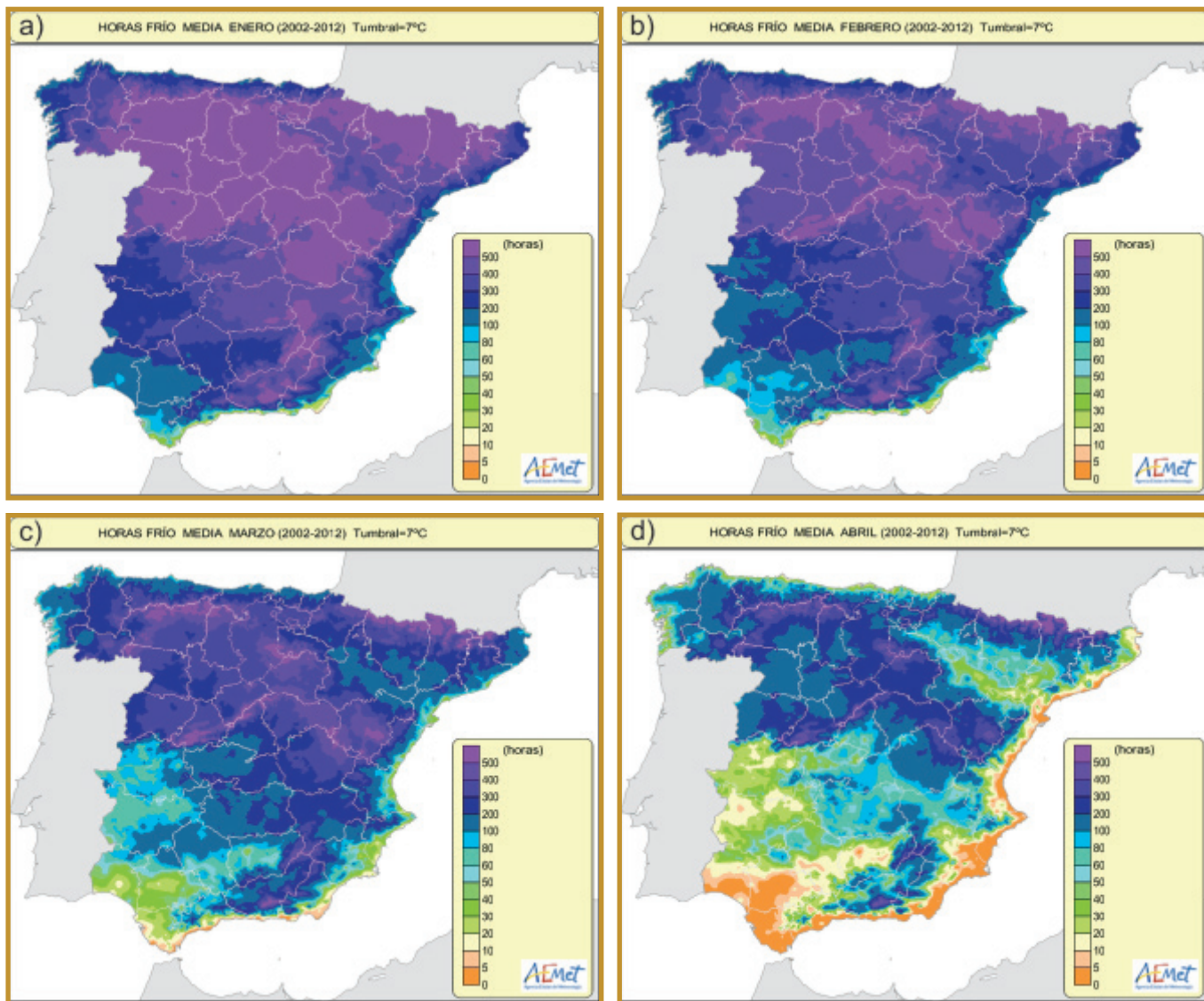


Figura 14. Número medio horas frío obtenidas en los meses de enero (a), febrero (b) marzo(c) y abril (d). Para la cuantificación de horas frío se ha tenido en cuenta una temperatura umbral de 7 °C.

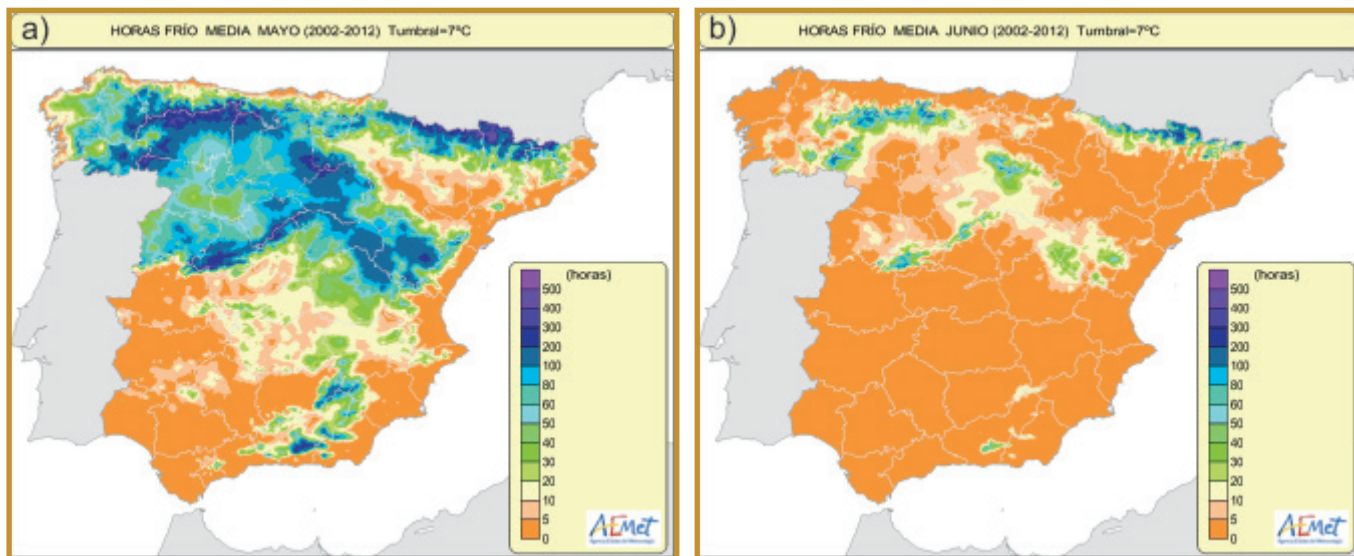


Figura 15. Número medio horas frío obtenidas en los meses de mayo (a) y junio (b). Para la cuantificación de horas frío se ha tenido en cuenta una temperatura umbral de 7 °C.

4.2. Temperatura umbral 0 °C

Cuando se calcula el número de horas frío tomando una temperatura umbral de 0 °C en lugar de 7 °C, como es lógico el número medio de horas frío desciende (Fig. 16), situándose el rango de horas frío entre 750 y 2500 en las zonas peninsulares más frías, y entre 0 y 50 horas en las zonas más próximas al litoral.

Asimismo, se observa que son menos los meses que presentan horas frío (Figs. 18 y 19) y que nuevamente son los meses de diciembre (Fig. 18b), enero (Fig. 18c) y febrero (Fig. 18d) los que presentan un mayor número medio de horas frío acumuladas mensuales. En el mes de abril (Fig. 19b) se aprecian valores de horas frío superiores a 200 tan sólo en zonas altas de los sistemas montañosos.

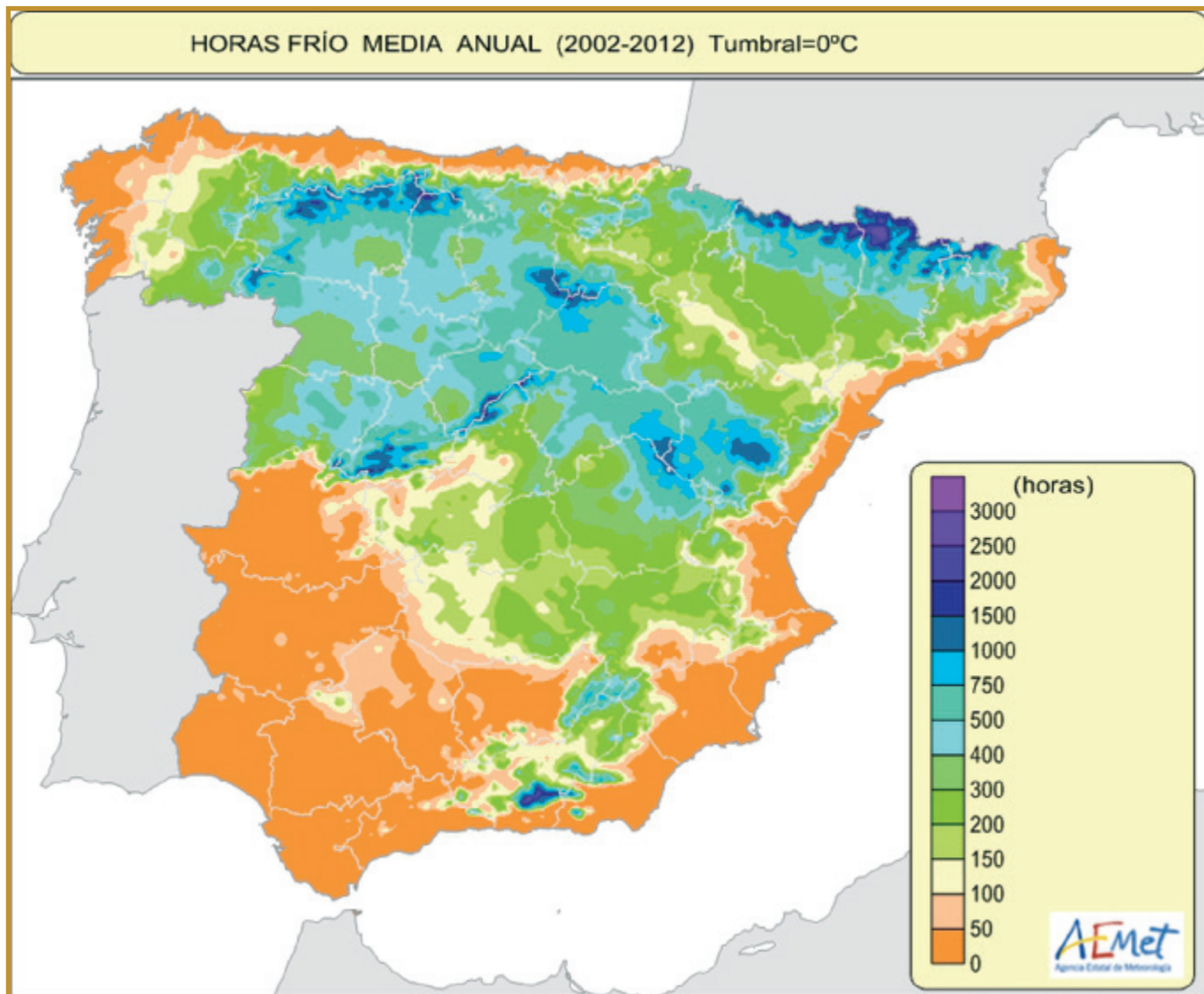


Figura 16. Número medio horas frío en un año. Para el cálculo de horas frío se ha tenido en cuenta una temperatura umbral de 0 °C.

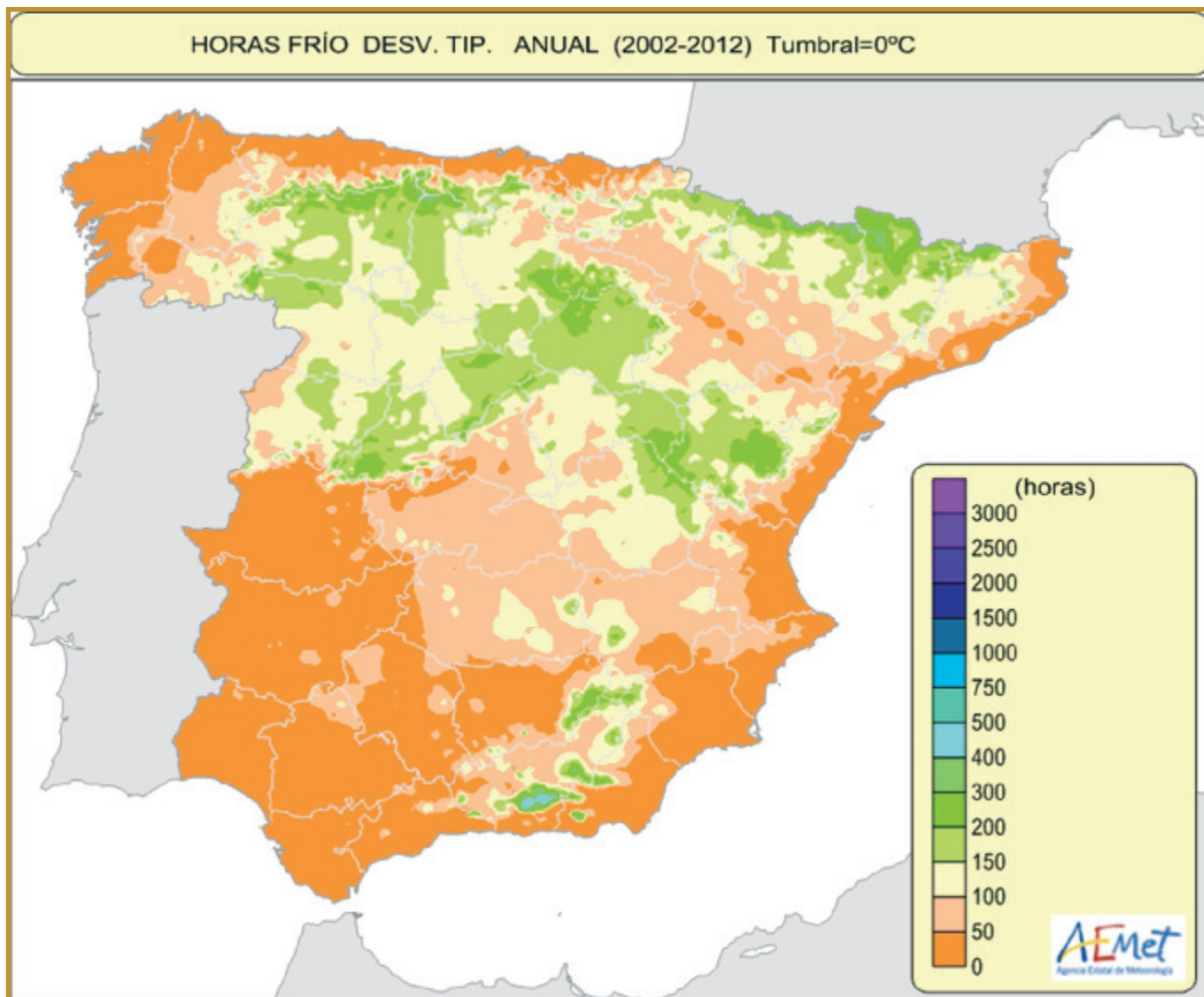


Figura 17. Desviación típica obtenida para el cálculo de número medio de horas frío en un año (temperatura umbral de 0 °C).

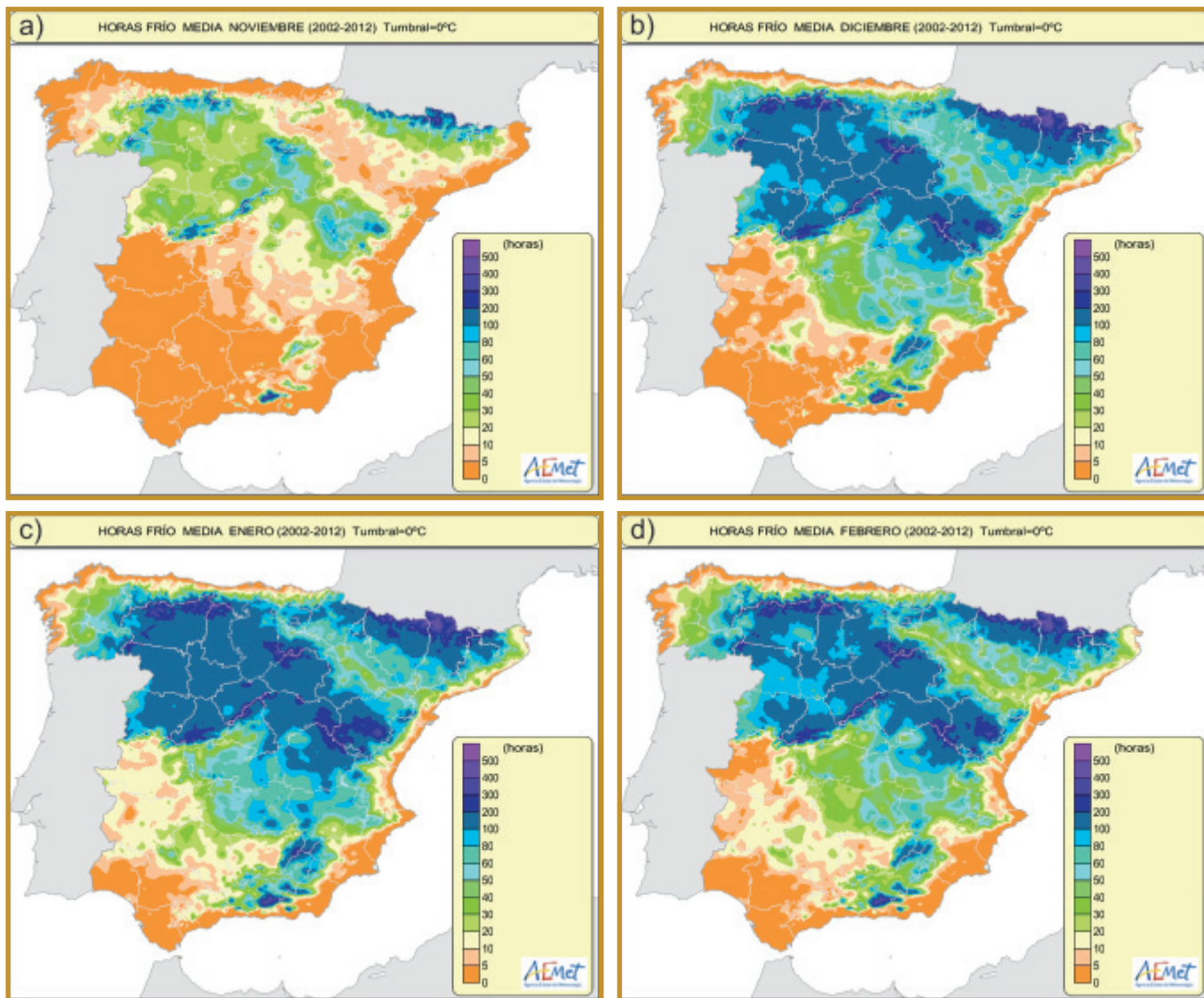


Figura 18. Número medio horas frío obtenidas en los meses de noviembre (a), diciembre (b), enero (c) y febrero (d). Para la cuantificación de horas frío se ha tenido en cuenta una temperatura umbral de 0 °C.

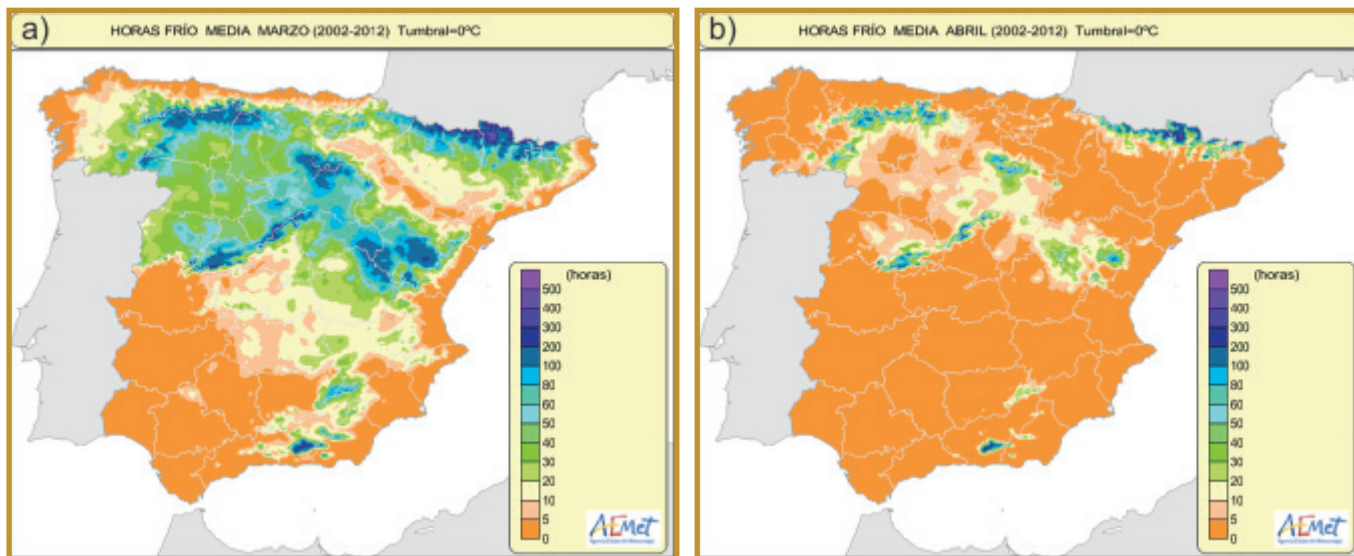


Figura 19. Número medio horas frío obtenidas en los meses de marzo (a) y abril (b). Para la cuantificación de horas frío se ha tenido en cuenta una temperatura umbral de 0 °C.

4.3. Temperatura umbral -2 °C

Esta tendencia continúa cuando se utiliza la temperatura umbral de -2 °C. En la figura 20 se muestra un descenso en el número medio de horas frío registradas anualmente al cuantificar temperaturas menores que -2 °C. Las zonas que presentan un mayor número medio de horas frío por debajo de -2 °C se sitúan en los Pirineos y en Sierra Nevada (Fig. 20) en un rango de 750 y 1500 horas. Al igual que en

los anteriores mapas los meses de diciembre (Fig. 22b), enero (Fig. 22c) y febrero (Fig. 22d) son los que registran un mayor número medio de horas frío. Si bien, en el mes de marzo (Fig. 23a) y abril (Fig. 23b) en los sistemas montañosos se continúa registrando horas frío con valores entre 60 y 400 horas.

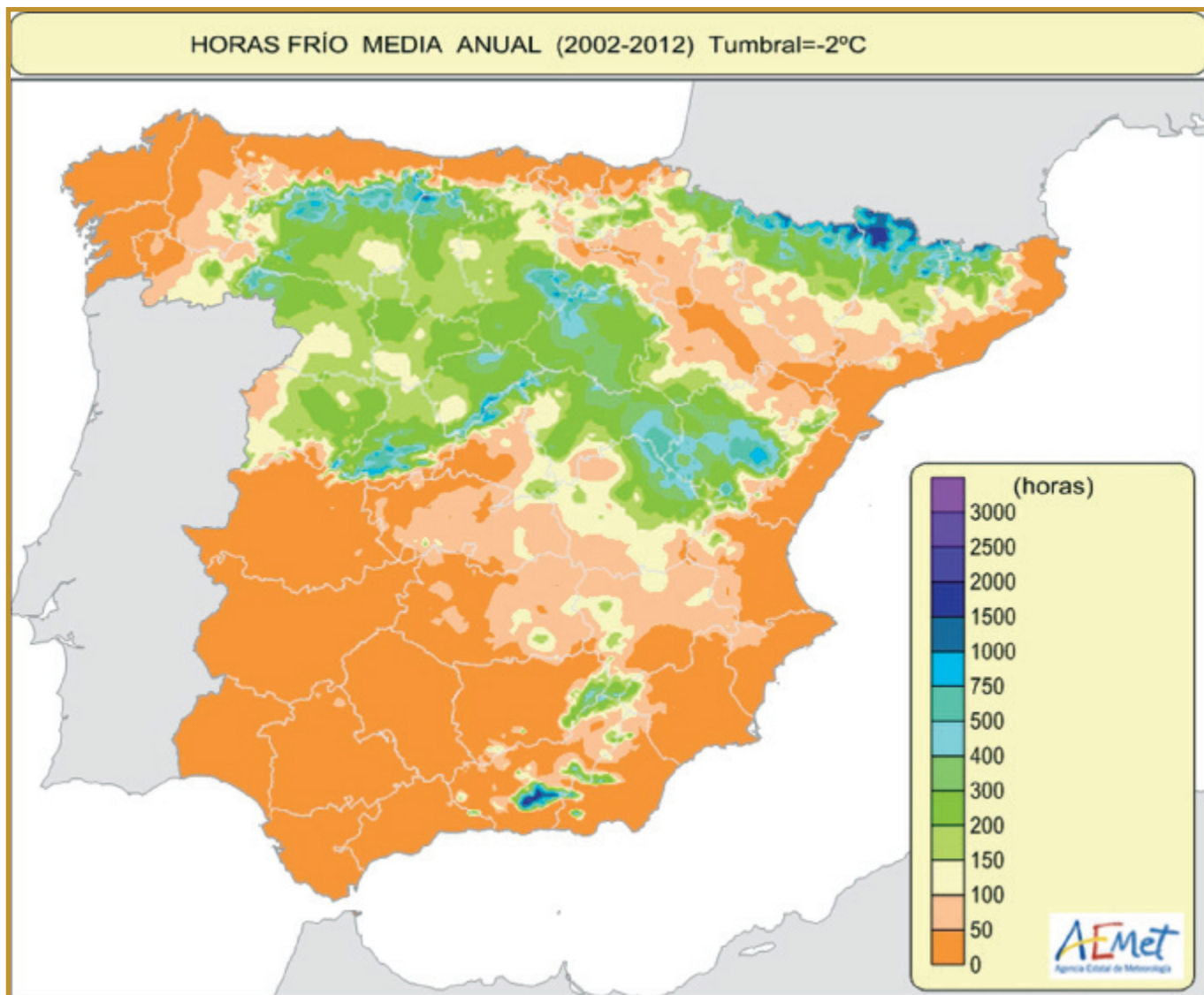


Figura 20. Número medio horas frío en un año. Para el cálculo de horas frío se ha tenido en cuenta una temperatura umbral de -2 °C.

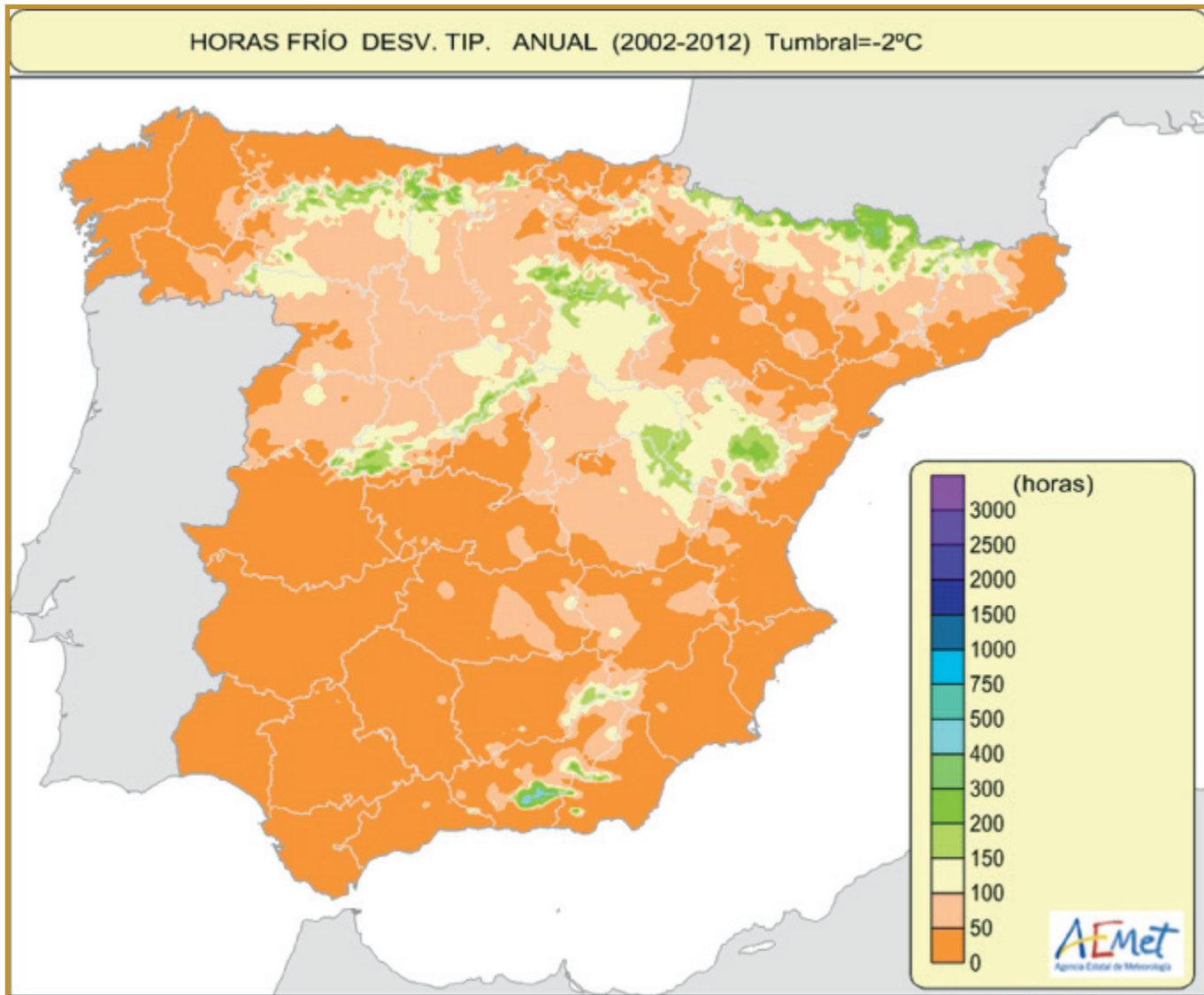


Figura 21. Desviación típica obtenida para la cuantificación del número medio de horas frío en un año (temperatura umbral de -2 °C).

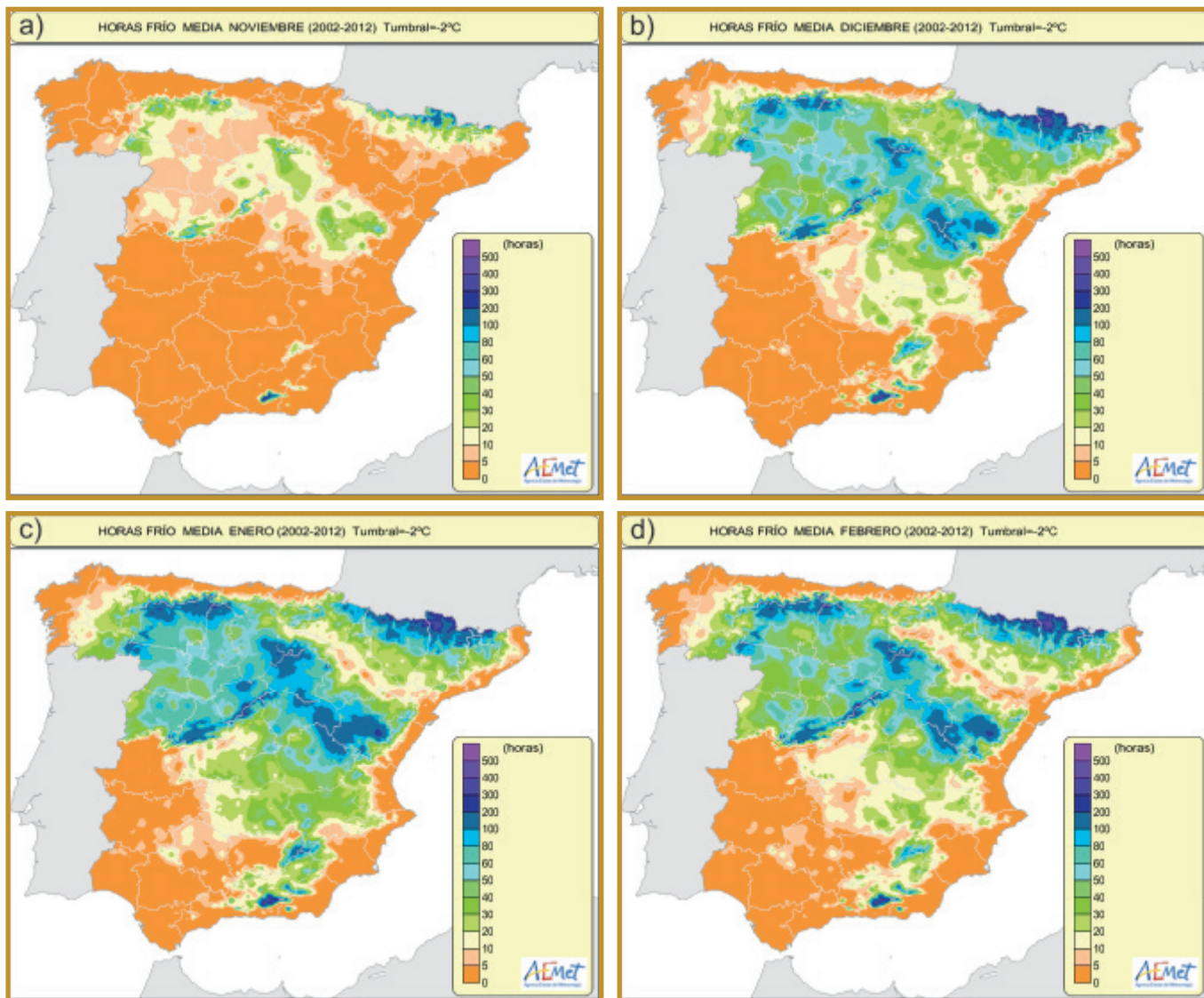


Figura 22. Número medio horas frío obtenidas en los meses de noviembre (a), diciembre (b), enero (c) y febrero (d). Para la cuantificación de horas frío se ha tenido en cuenta una temperatura umbral de -2 °C.

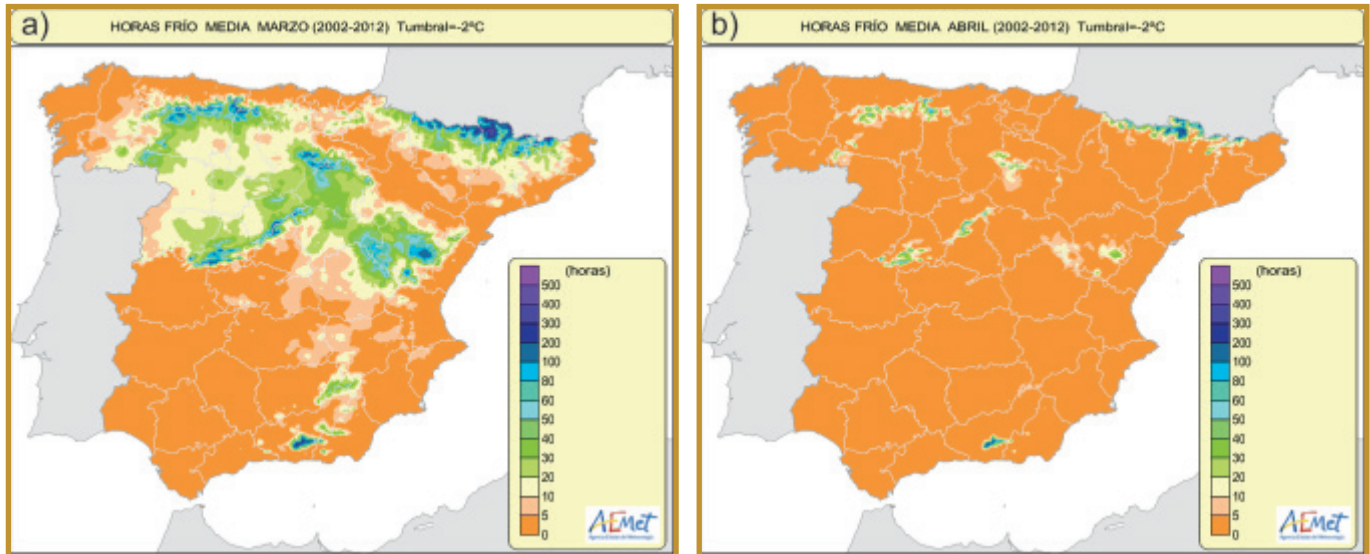


Figura 23. Número medio horas frío obtenidas en los meses de marzo (a) y abril (b). Para la cuantificación de horas frío se ha tenido en cuenta una temperatura umbral de -2°C .

5. CONCLUSIONES

Toda la información elaborada en este estudio, presentada como mapas o capas ráster para todo el territorio de la España peninsular sobre diversos aspectos relacionados con el comportamiento de las temperaturas, parte de la elaboración inicial de capas ráster de temperaturas máximas y mínimas diarias en el período 2002-2012. Dichas capas se han elaborado utilizando un krigeado universal (Universal kriging, UK) con la altitud y la distancia a la costa como variables externas (Chazarra, 2014). Este método presenta

buenos resultados en zonas con densidades medias o altas de datos, pero en regiones con densidades muy bajas de datos o con existencia de datos anómalos puede dar lugar a extrapolaciones claramente exageradas (Chazarra, 2014; Hudson & Wackernagel, 1994). Las zonas con menor densidad de estaciones suelen ser las regiones montañosas, pero también suelen ser las que tienen una menor superficie dedicada a cultivos extensivos lo cual favorece la utilización de estos resultados para aplicaciones agrícolas. No

obstante, la aproximación mejora a medida que disminuye la distancia entre la estación meteorológica y la zona de cultivo, aunque también hay que tener en cuenta el hecho de que el termómetro en las estaciones está instalado en el interior de una garita meteorológica a 1,5 m sobre el nivel del terreno según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2014) y en muchos casos su registro puede no ser representativo de la temperatura real en las capas más inferiores del aire, donde se encuentran los cultivos (Elías & Castivelli, 1996).

En cuanto a la información de heladas, aunque se ha utilizado en esta primera fase un período de 10 años que es suficiente para los objetivos planteados, actualmente se continúa trabajando para elaborar los mismos productos utilizando información meteorológica de un mayor número de años, lo que proporcionará una información de mayor calidad. Por otro lado, aunque en muchas ocasiones se calcula el valor medio de las fechas de primera y última helada (Nafría y col. 2013), en este trabajo se ha preferido calcular también el valor de la mediana. En general para el período seleccionado, utilizar valores calculados con la mediana en lugar de valores medios, para la primera y última helada, proporciona un período de heladas ligeramente mayor en varias zonas.

Respecto a la información del número de horas frío, en el presente estudio se han calculado mediante la fórmula de Crossa-Raynaud también las horas frío por debajo de 0 °C y de -2 °C que son temperaturas umbrales muy inferiores a las normalmente utilizadas para determinar la duración media específica del reposo invernal de una determinada variedad, pero que pueden servir para obtener mapas de riesgo en relación con determinadas enfermedades o daños en cultivos

Finalmente, el estudio en paralelo de la comparación de los métodos directo (a partir de la información de temperaturas horarias) e indirecto (mediante el empleo de la fórmula de Crossa-Raynaud) para la cuantificación de horas frío (tabla 1) demuestra que dicha aproximación en general funciona peor para temperaturas umbrales de 0 °C o de -2 °C, sobre todo en aquellos observatorios con muy pocas horas con temperaturas inferiores a 0 °C, como pueden ser Tortosa o Murcia/Alcantarilla (tabla 1). No obstante, como valor medio el número de horas frío acumulados por debajo de 0 °C y -2 °C mediante el método de Crossa-Raynaud se encuentra próximo al 80% del valor calculado por el método directo, aumentando este valor hasta el 93% cuando se utiliza una temperatura umbral de 7 °C, lo que concuerda con los resultados obtenidos por García-Merayo y col. (2015).

6. BIBLIOGRAFÍA

- AEMET & Instituto meteorología de Portugal. 2011. Atlas climático ibérico. Edita: Agencia Estatal de Meteorología (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino) e Instituto de Meteorología de Portugal. ISBN: 978-84-7837-079-5
- Alkoshab O. 1989. Chilling and nutritional requirements of fruits trees in Yemen. Thesis degree of Doctor of Philosophy. Oregon State University.
- Bahuguna R.N. & Jagadish K.S. 2015. Temperature regulation of plant phenological development. *Environmental and Experimental Botany*, 111: 83-90.
- Baldocchi D. & Wong S. 2008. Accumulated winter chill is decreasing in the fruit growing regions of California. *Climatic Change*, 87: 153-166.
- Bouchet R.J. 1966. Le risqué de gelée. *Phytoma*, 175: 27-31.
- Cabello Cabello M.J., Blanco de Pablos A., Ribas Elcorobarrutia F., Tapia Cid J.M. 1987. Estimación del número de horas-frío por debajo de distintos umbrales, a partir de la temperatura mínima, en la provincia de Salamanca. *Anuario, Centro de Edafología y Biología Aplicada. CSIC. Salamanca. Vol XII: 97-112.*
- Chandler W.H. 1942. *Deciduous orchards*. Philadelphia, USA: Lea & Febiger.
- Chmielewski F-M., Muller A., Bruns E. 2004. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121:69-78
- Chazarra A. 2014. Interpolación espacial de la temperatura mínima diaria mediante krigeado universal. XXXIII Jornadas Científicas de la AME. Oviedo.
- Columela L.J.M. 1965. 1st Century AD. *De re rustica*. English Edition. On Agriculture. Harvard University Press, Cambridge.
- Coscollá R. 1980. Incidencia de los factores climatológicos en la evolución de las plagas y enfermedades de las plantas. *Boletín de sanidad vegetal*, 6: 123-139.
- Couvillon G. 1995. Temperature and stress effects on rest in fruit trees: a review. *Acta Horticulturae*, 395: 11-19.
- Coville F.W. 1920. The influence of cold in stimulating the growth of plants. *Journal Agricultural Research*, XX (2): 151-161.
- Crossa-Raynaud P. 1955. Effects des hivers doux sur le comportement des arbres fruitiers a feuilles caduques. *Annals of Service Botanical Agronomy, Tunisie n.28 p.122.*
- Cunha F.R. 1982. O problema da geada negra no Algarve. *INIA Divulgação No. 12.*
- Elías Castillo F. & Ruiz Beltrán L. 1973. *Clasificación Agroclimática de España*. Publicación del Servicio Meteorológico Nacional: A53.
- Elías Castillo F. & Ruiz Beltrán L. 1977. *Agroclimatología de España*. Cuaderno I.N.I.A N.º 7.

- Elías F. & Castivelli S.F. 1996. Agrometeorología. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Elloumi O., Ghrab M., Kessentini H., Ben Mimoun M. 2013. Chilling accumulation effects on performance of pistachio trees cv. Mateur in dry and warm area climate. *Scientia Horticulturae*, 159: 80-87.
- Ellwood E.R., Temple S.A., Primack R.B., Bradley N.L., Davis C.C. 2013. Record-Breaking Early Flowering in the Eastern United States. *Plos one*, 8: e53788.
- Erez A., Fishman S., Linsley-Noakes G.C., Allan P. 1990. The dynamic model for rest completion in peach buds. *Acta Horticulturae*, 276: 165-174.
- Finetto G.A. 1995. Studies of chilling requirement on six peach cultivars in the PO Valley (1990-1994). *Acta Horticulturae (ISHS)*, 395: 119-126
- Finetto G.A. 1997. An investigation of the chilling requirement of some apple cultivars in the PO Valley, 1992-1996. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 441:49-58
- Fishman S., Erez A., Couvillon G.A. 1987a. The temperature dependence of dormancy breaking in plants: computer simulation of processes studied under controlled temperatures. *Journal of Theoretical Biology*, 126: 309-321.
- Fishman S., Erez A., Couvillon G.A. 1987b. The temperature dependence of dormancy breaking in plants: mathematical analysis of a two step model involving a cooperative transition. *Journal of Theoretical Biology*, 126: 473-483
- García M.S., Leva P.E., Valtorta S.E., Gariglio N., González L. 2009. Disponibilidad de horas de frío para la localidad de Rafaela (Santa Fe, Argentina): modelos de estimación. *Revista de la Facultad de Agronomía UBA*, 29 (3): 1-6.
- García M.S., Leva P.E., Valtorta S.E., Gariglio N.F., Toffoli G. 2011. Estimación de horas de frío para la localidad de Sauce Viejo (Santa Fe, Argentina): diferentes modelos. *Revista FAVE- Ciencias Agrarias*, 10 (1-2): 69-75.
- García-Merayo J.L., Gallego T., Martínez-Núñez L. 2015. Horas frío y horas de calor en zonas climáticas de la España Peninsular (2002-2011). Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente.
- Gariglio N., Dosis V.L., Leva P.E., García M.S., Bouzo C.A. 2006. Acumulación de Horas Frío en la zona centro-oeste de Santa Fe (Argentina) para frutales caducifolios. *Horticultura Argentina*, 25 (58): 26-32.
- Garrido A.R & Martínez C.F. 1989. Cálculo de la temperatura instantánea del aire a partir de la máxima y mínima diaria y el análisis de Fourier. *Aplicaciones en la Cuenca del Segura. Paralelo*, 37 ° (13): 113-125.

- Gil-Albert Velarde F. 1989. Tratado de arboricultura frutal. Vol II La ecología del árbol frutal. 2.^a Edición. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Guo L., Dai J., Wang M., Xu J., Luedeling E. 2015. Responses of spring phenology in temperate zone trees to climate warming: A case study of apricot flowering in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201: 1-7
- Gutierrez A.P., Ponti L., Ellis C.K., d'Oultremont T. 2006. Analysis of climate effects on agricultural systems. CEC-500-2005-188-SF. California Climate Change Center, Sacramento.
- Haworth R. & Spiers A. 1992. Isolation of *Xanthomonas campestris* PV *populi* from stem lesions on *Salix matsudana* X *alba* Aokautere in New Zealand. *European Journal of Forest Pathology*, 22: 247-251.
- Hudson G. & Wackernagel H. 1994. Mapping temperature using kriging with external drift: Theory and an example from Scotland. *International Journal of Climatology*, 14: 77-91.
- Inouye D.W. 2000. The ecological and evolutionary significance of frost in the context of climate change. *Ecology Letters*, 3: 457-463.
- Knight T.A. 1801. Account of some experiments on the ascent of the sap in trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 91: 333-353.
- Lacasta C., Vadillo J.R., Mayo F., Couceiro J.F. 2004. El pistachero II: estudio fenológico y económico. Comunicaciones VI Congreso SEAE. Almería.
- Levitt J. 1980. Responses of plants to environmental stresses. Vol. 1. 2nd ed. New York, Academic Press.
- Luedeling E. & Brown P.H. 2011. A global analysis of the comparability of winter chill models for fruit and nut trees. *International Journal of Biometeorology*, 55: 411-421.
- Luedeling E., Girvetz E.H., Semenov M.A., Brown P.H. 2011. Climate change affects winter chill for temperate fruit and nut trees. *Plos one*, 6 (5): e20155.
- Martí Ezpeleta A. 1994. Disponibilidades térmicas para los cultivos en el fondo de la depresión de Sariñena. *Lucas Mallada*, 6: 171-190.
- Melgarejo P. 1996. El frío invernal, factor limitante para el cultivo frutal. Ed. Madrid Vicente. Madrid.
- Morison J.I.L. & Lawlor D.W. 1999. Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant, cell & Environment*, 22: 259-682.
- Mota FS. 1981. *Meteorología Agrícola*. 5th ed. São Paulo, Brazil: Liv. Nobel.
- Nafria García D.A., Garrido del Pozo N., Álvarez Arias M.V., Cubero Jiménez D., Fernández Sánchez M., Villarino Barrera I., Gutiérrez García A., Abía Llera I. 2013. Atlas agroclimático

- Castilla y León. Ed. Junta de Castilla y León (Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León) & Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (Agencia Estatal de Meteorología). ISBN: 978-84-7837-087-0.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2014. Guía de instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Public. N.º 8. Secretaría de la O.M.M.- Ginebra, Suiza.
- Paul N. 1993. Mycoherbicidas and other biocontrol agents for *Senecio* spp. *Pesticide Science*, 37: 323-329.
- Pearce R.S. 2001. Plant Freezing and Damage. *Annals of botany*, 87: 417-424.
- Ribas Elcorobarrutia F., Blanco de Pablos A., Tapia Cid J.M. 1988. Estudio de los períodos fríos en la zona de Barco de Ávila. Anuario. Centro de Edafología y Biología Aplicada. CSIC Salamanca. Vol XIII: 107-119.
- Richardson E.A., Seeley S.D., Walker D.R. 1974. A model for estimating the completion of rest for Redhaven and Elberta peach trees. *HortScience*, 9: 331-332.
- Rodrigo J. 2000. Spring frosts in deciduous fruit trees-morphological damage and flower hardiness. *Scientia Horticulturae*, 85: 155-173.
- Rosenweig C. & Hillel D. 1998. Climate change and the global harvest. Oxford.
- Ruml M. & Vulić T. 2005. Importance of phenological observations and predictions in agriculture. *Journal of Agricultural Sciences*, 50 (2): 217-225.
- Sakai A., Paton D., Wardle P. 1981. Freezing resistance of trees of the south temperate zone, especially subalpine species of Australasia. *Ecology*, 62: 563-570.
- Samish R.M. 1954. Dormancy in Woody Plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 5: 183-204.
- Saure M.C. 1985. Dormancy release in deciduous fruit trees. *Horticultural Reviews*, 7: 239-300.
- Snyder R.L. & De Melo-Abreu J.P. 2010. Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. Volumen 1. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma.
- Tabuenca M.C. 1965. Influencia del clima en los frutales. CSIC. Estacion Experimental de Aula Dei. Zaragoza.
- Tersoglio E., Naranjo G., Rivero L., Quiroga M. 2006. Requerimiento de frío invernal y de calor en variedades de cerezos. *Información Técnica Económica Agraria*, 102 (3): 251-259.
- Urbano T.P. 1995. Tratado de fitotecnia general. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Went F.W. 1953. The effect of temperature on plant growth. *Annual Review Plant Physiology*, 4: 347-362.



Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera
CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL

