

ESTUDIO PRELIMINAR DE LAS INVERSIONES TÉRMICAS EN EL SURESTE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA: EL CASO DE LOS CAMPOS DE HERNÁN PEREA

Preliminary study of inversion temperature in the southeast Iberian Peninsular: the case of Hernán Perea Plateau

David Espín Sánchez^{1*}, Víctor Ruiz Álvarez¹, Javier Martí Talavera¹, Ramón García Marín¹

¹ Departamento de Geografía, Facultad de Letras, Universidad de Murcia, Campus de la Merced. Calle Santo Cristo s/n 30001, Murcia-Spain.

Identificador ORCID de los autores y e-mail:

David Espín Sánchez: <http://orcid.org/0000-0003-4807-5450>. e-mail: david.espin1@um.es

Víctor Ruiz Álvarez: <http://orcid.org/0000-0002-6630-4571>. e-mail: victor.ruiz1@um.es

Javier Martí Talavera: <http://orcid.org/0000-0002-1624-2843>. e-mail: javier.marti@um.es

Ramón García Marín: <http://orcid.org/0000-0003-3268-5182>. E-mail: ramongm@um.es

*Autor corresponsal

Recibido: 18-01-2018. **Aceptado:** 20-02-2018. **Fecha de publicación on-line:** 29/05/2018

Citation / Cómo citar este artículo: Espín Sánchez, D., Ruiz Álvarez, V., Martí Talavera, J., García Marín, R. (2018). Estudio preliminar de las inversiones térmicas en el sureste de la Península Ibérica: el caso de los campos de Hernán Perea. *Pirineos*, 173, e036. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2018.173003>

RESUMEN: Las altiplanicies de la Sierra de Segura (Jaén), en el interior sureste de la Península Ibérica, se caracterizan por presentar temperaturas mínimas extraordinariamente bajas durante el invierno, con más de 140 heladas al año. Las intensas inversiones térmicas presentes en los campos de dolinas de Hernán Perea (Monterilla y Santiago-Pontones) pueden generar temperaturas inferiores a los -20°C. Las diferencias entre temperaturas mínimas superficiales y la existente en altitud, en el geopotencial correspondiente, llegan a valores absolutos de -22,0°C. A través del análisis de datos de una red propia de *datalogger* instalados en la zona, la utilización del modelo meteorológico de alta resolución HARMONIE-AROME e imágenes del satélite MODIS (producto MYD11A1), se establece una aproximación cartográfica a las temperaturas mínimas invernales del área de estudio. Por otra parte, se identifican los principales polos de frío en diferentes rangos altitudinales. Finalmente, se concluye con el análisis de dos tipos de piscinas de aire frío (*cold air pools*, CAPs), características en el área de estudio, que destacan por presentar importantes caídas de temperatura en un escaso gradiente altitudinal.

PALABRAS CLAVE: Inversión térmica; geopotencial; heladas; datalogger; Sierra de Segura, España

ABSTRACT: The southeast interior of the Iberian Peninsula, and specifically the plateaus of the Sierra de Segura (Jaén), are characterized by extremely low minimum temperatures during the winter, with more than 140 frosts a year. The intense temperature inversions that characterize the sink fields of Hernán Perea (Monterilla sinkholes field, Santiago-Pontones) generate minimum temperatures around -20°C. The differences between minimum surface temperatures (*datalogger*) and the existing one in the geopotential of each of the *dataloggers*, reach absolute values of -22.0°C, forming intense temperature inversions. Through the analysis of data from a *datalogger's* own network, the use of the high resolution meteorological model (HARMONIE-AROME) and images of the MODIS satellite,

through the product MYD11A1, establishes a cartographic approximation to the minimum winter temperatures of the area of study, where, in addition, the main cold poles in different altitudinal ranges are identified. Finally, we conclude with the analysis of two types of cold air pools (cold air pools, CAPs), characteristics in the study area with significant temperature drops in a low altitudinal gradient.

KEYWORDS: Thermal inversion; geopotential; frost; datalogger; Sierra de Segura; Spain.

1. Introducción

Durante las últimas décadas se han desarrollado numerosas investigaciones sobre la acumulación de aire frío nocturno en zonas deprimidas, especialmente las referidas a madrugadas de estabilidad atmosférica. Aquellas que se generan en espacios montañosos, fundamentalmente ligadas a cubetas y campos de dolinas del oeste de EE.UU. y Alpes, han sido las más frecuentes e interesantes en sus resultados (Whiteman, 1986; Whiteman *et al.*, 1997, 2001, 2004a, 2008).

Las piscinas de aire frío (*cold air pools*, CAPs) se definen como la acumulación de aire frío en una depresión del terreno, asociado a tiempo estable (altas presiones, vientos flojos y cielos despejados). Suelen producirse durante la noche, rompiéndose el estrato de inversión térmica durante las primeras horas de la mañana (Whiteman *et al.*, 2008). De ahí la justificación para el uso exclusivamente de las temperaturas mínimas como variable de análisis en la investigación.

Los estudios llevados a cabo en las Montañas Rocosas por Whiteman *et al.* (2004a), y en los Alpes austriacos por Clements *et al.* (2003), analizan la acumulación de aire frío en dolinas, insertas en la citada topografía kárstica. Los autores concluyen que la dolina es la geoforma que registra las temperaturas más bajas en latitudes medias, llegando a récords de -56 y -53°C en Estados Unidos y Centroeuropa respectivamente. Mientras, Lareau *et al.* (2013) y Eisenbach *et al.* (2003) realizan una clasificación de hasta ocho patrones de CAPs en virtud de la evolución sinóptica y la rotura del estrato de inversión térmica durante la madrugada.

Sauberer & Dirmhirn (1954, 1956) establecen temperaturas, tanto en superficie como en niveles superiores, muy variables en las estructuras geomorfológicas exokársticas de Austria (Gstettner-Alm). Los flujos en el interior de las dolinas son débiles, cuya prevalencia de vientos sinópticos no llega a los embolsamientos de aire frío de los fondos de las citadas estructuras.

La tesis doctoral de Litschauer (1962) aclaró muchas respuestas sobre el clima de las cuencas intramontanas en Austria, en particular la del Gstettner-Alm, donde los fenómenos de inversión térmica centraron buena parte de su investigación. La primera de las campañas realizadas por Litschauer se llevó a cabo con la cubierta de nieve durante el invierno, con diferencias térmicas muy elevadas en dolinas de 70 m de desnivel. Se registraron diferencias de entre 5 y 10°C con superficie nivosa a otras no nivosas, con una clara reducción de los vientos de ladera y del calentamiento superficial (Dorninger *et al.*, 2011). Las doli-

nas del sur de Lunz (región de Gstettner-Alm) y del Gruenloch en Austria han sido ampliamente estudiadas recientemente por diversos investigadores (Eisenbach *et al.*, 2003; Whiteman *et al.*, 2004b; Pospichal *et al.*, 2003). El estudio del clima de la zona durante las últimas décadas se ha llevado a cabo mediante la utilización de sondeos termodinámicos y observación directa (*datalogger*). En los citados estudios se compara el funcionamiento de inversiones térmicas en dolinas de diferentes tamaños y formas. Recientemente, en éste mismo ámbito se establecen diferencias de hasta 18°C entre el reborde superficial y el fondo de la dolina (Steinacker *et al.*, 2007).

El *Sky view factor* o porción de cielo visible fue desarrollado por Litschauer (1962) para determinar la influencia de la topografía en el descenso de las temperaturas en el fondo de las dolinas. Concluyó que valores próximos a 1 garantizan temperaturas mínimas más bajas, con un promedio en sus investigaciones de 0,88 en las dolinas de los Alpes austriacos. Posteriormente, este método ha sido desarrollado y utilizado en numerosas investigaciones (Whiteman *et al.*, 2004a).

En España destacan los recientes estudios de CAPs en la Cerdeña (Pirineos), en especial mediante el uso de una red de *datalogger* para el cálculo de horas de helada, clave en la planificación agrícola (Jiménez *et al.*, 2015; Miró *et al.*, 2017; Pagès *et al.*, 2017). Además, el uso de las horas de frío (HF) ha sido utilizado especialmente en los estudios agroclimáticos, desde que fuesen establecidas por Richardson *et al.* (1974).

El estudio pretende analizar los procesos de inversión térmica y las características de las heladas en la Sierra de Segura, desprovistas de series meteorológicas de organismos oficiales en la actualidad. Sólo se encuentran disponibles los observatorios de Santiago de la Espada y Pontones (Jaén) de la red de AEMET, pero ningún sensor en el interior de los Campos de Hernán Perea. Para ello, con la instalación de una red de *datalogger*, y la utilización de diversas herramientas (modelo mesoescalar y satélite), se realiza una primera aproximación al estudio de las temperaturas mínimas del periodo frío (noviembre, 2016-mayo, 2017) mediante la estadística climática de los registros obtenidos por los *datalogger*. La cuantificación de la intensidad de inversión térmica pretende, además, ofrecer una visión más ajustada de los fríos inviernos con los que se caracterizan las cabeceras de las cuencas de los ríos Segura y Guadalquivir. Con el fin de profundizar en el futuro en el estudio de los polos fríos de esta zona del SE peninsular, se establece una serie de ubicaciones de los puntos más fríos del área de estudio, según diferentes rangos altitudinales.

2. Área de estudio

El área de estudio seleccionada se corresponde con el interior sureste de la Península Ibérica, nodo interprovincial de las Comunidades Autónomas de la Región de Murcia, Andalucía (provincias de Jaén, Granada y Almería) y Castilla la Mancha (provincia de Albacete). Abarca una superficie total de 4.720 km², situados entre las cabeceras de las demarcaciones hidrográficas del Segura (2.970 km²) y del Guadalquivir (1.750 km²) (Figura 1). Está enmarcada dentro de las Cordilleras Béticas (zona limítrofe entre los dominios prebético y subbético), presentando una gran variedad orográfica, con variaciones altitudinales desde 2.400 metros en el extremo noroccidental (Pico de la Sagra) a 250 metros en las vegas del río Segura (Calasparra), en el extremo nororiental del área analizada (Tabla 1). Desde un punto de vista climático, las precipitaciones oscilan entre 350 y 1.300 mm, y las temperaturas medias anuales entre 9 y 16°C (Atlas Climático Digital de la Península Ibérica, 2006). Posee una clara influencia atlántica y de cierto abrigo respecto al Mediterráneo (Castillo Requena, 1988), especialmente el sector más occidental del área de estudio.

En la investigación se pone especial interés en el análisis del comportamiento de las temperaturas mínimas invernales en los Campos de Hernán Perea, localizados en el extremo noroccidental del área de estudio. Se trata de una altiplanicie kárstica situada en la Sierra de Segura, al este de la provincia de Jaén, y enmarcada casi en su totalidad en el término municipal de Santiago de la Espada, y en parte en el de Cazorra. Constituye la plataforma calcárea más extensa de la Península Ibérica (144 km²), con una altitud media de 1.697 m. La forma de cubeta, los numerosos campos de dolinas, y su aislamiento con calares que lo cierran a 2.100 m de altitud, caracteriza a este espacio por presentar intensas inversiones térmicas (IT) con génesis de fuertes heladas. Los valores mínimos de temperatura inferiores a -15°C durante el periodo invernal, unidos a la gran disponibilidad de agua en el área de estudio, activan fuertes procesos de gelificación. Todo ello, determina un tipo de área morfoclimática de tipo oceánico-mediterráneo de verano suave (Csb de Köppen) (Cunha *et al.*, 2011). Si bien, en estudios recientes, se lleva a cabo una revisión climática más exhaustiva, definiéndolo como un clima de alta montaña mediterráneo frío subhúmedo de cimas prebéticas. Constituye, por tan-

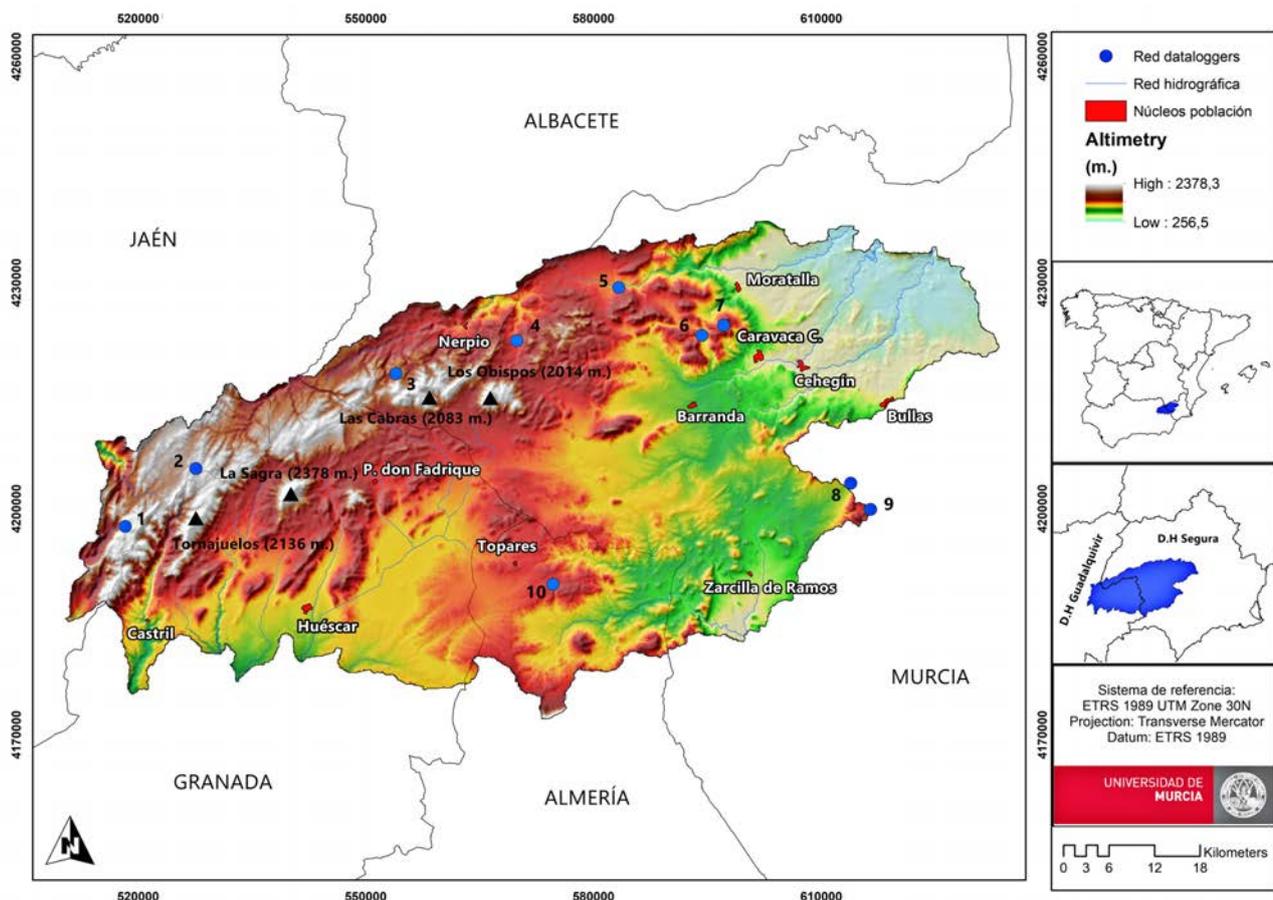


Figura 1: Área de estudio.
Figure 1: Study Area.

Tabla 1: Características de los datalogger del área de estudio.
 Table 1: Dataloggers's characteristics of the study area.

Observatorio	Punto	Altitud (m)	Provincia	Municipio	Orografía/ Tipo de heladas	Sky View Factor
Navalasnó	1	1770	Jaén	Cazorla	Poljé / Inversión térmica (I.T)	0.75
Monterilla	2	1660	Jaén	Santiago-Pontones	Campo de dolinas /I.T	0.91
Cañadas de Nerpio	3	1439	Albacete	Nerpio	Barranco/I.T	0.17
La Rogativa	4	1152	Murcia	Moratalla	Valle/ I.T	0.33
La Risca	5	1047	Murcia	Moratalla	Valle/I.T	0.88
Golláin	6	1021	Murcia	Caravaca de la Cruz	Hoya interior/ I.T	0.65
Nevazo de Arriba	7	1181	Murcia	Caravaca de la Cruz	Hoya interior/ I.T	0.82
Bco. del Cenajo	8	870	Murcia	Cehegín	Barranco/I.T	0.38
La Selva	9	1521	Murcia	Lorca	Cima / Advección	1.00*
Cañadas de Cañepla	10	1057	Almería	María	Cuenca Endorreica/ I.T	0.97

to, una auténtica isla climática de temperaturas especialmente bajas, y una pluviometría de 1.150 mm en las zonas más elevadas (Gómez Zotano *et al.*, 2015, 2016).

3. Datos

Para la obtención de los datos de campo se utilizan un total de diez medidores de temperatura con *datalogger* incorporado, modelo Microlite II USB 32K (32.000 registros). Posee una frecuencia de medición cincominutal, y un rango temporal desde el 1 de noviembre de 2016 al 31 de mayo de 2017. Los sensores presentan una precisión $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, con una resolución térmica de $0,03^{\circ}\text{C}$ (Figura 1 y Tabla 1). Dos de los sensores (Monterilla y Navalasnó) han sido calibrados en el Centro Meteorológico Territorial (CMT) de Guadalupe por AEMET Murcia, siendo comparados con los termómetros oficiales en el interior de las garitas durante dos semanas (con una desviación final de $+0,2^{\circ}\text{C}$ en las temperaturas mínimas, y que es tenida en cuenta en los resultados expuestos). Para la protección de radiación en los *datalogger* se utilizan ocho garitas Davis no aspiradas de siete platos (modelo 7714), situadas a una altura de 1,5 m, y dos garitas de tipo pagoda cedidas por AEMET Murcia, éstas últimas utilizadas en Monterilla y Navalasnó. Se sitúan en esta ocasión a 2 m de altura para evitar la acumulación de nieve que se almacena en los fondos de dolinas durante la época invernal (Figura 2).

La determinación de los parajes altitudinalmente más fríos del área se lleva a cabo a través del modelo mesoescalar de alta resolución, HARMONIE-AROME 1.3 km, mediante el Open Data de www.meteofrance.com. AROME tiene una resolución horizontal de 2.5 km y fue desarrollado por los consorcios ALADIN y HIRLAM. Se trata de un modelo espectral bi-fourier de área limitada y no hidrostático, con un núcleo dinámico basado en una discretización semi-lagrangiana y semi-implícita de dos pasos de tiempo con una coordenada híbrida en la vertical

(Seity *et al.*, 2011). El modelo, uno de los mejores en la predicción de temperatura en la actualidad, obtiene datos muy próximos a la realidad superficial (diferencia de $-0,4^{\circ}\text{C}$ con respecto a estaciones meteorológicas superficiales). Es preciso señalar que el modelo enmascara las inversiones térmicas en cuencas de reducido tamaño (Süld & Denby, 2015). El cálculo del promedio (noviembre 2016-mayo 2017) se realiza a través de cálculos de valores medios de la cartografía utilizada. La elección del horario del modelo HARMONIE-AROME está sujeto a la temperatura mínima diaria de cada jornada, dependiendo, por tanto, del momento del día en que se registre el valor mínimo.

Para la estimación de la temperatura del aire se recurre a las imágenes satelitales, a través del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS/AQUA), con su canal *Land Surface Temperature Data and Emissivity Daily* (MYD11A1), perteneciente al Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) de la NASA. El producto MODIS (MYD11A1), cuya longitud de onda se sitúa entre 10.78 y 12.27 μm , obtiene correlaciones con temperaturas superficiales relativamente elevadas, entre 0,6 y 0,9, además de poseer un mejor resultado en piscinas de aire frío de cuencas pequeñas (Sarzi Freddi, 2010). Finalmente, la franja horaria de paso del satélite Aqua, a las 00 UTC, influye de manera destacada en que la correlación no sea mayor, al registrarse los valores mínimos horas más tarde, alrededor del amanecer.

4. Métodos

Con los datos cincominutales de temperatura procedentes de los *datalogger* se calculan los estadísticos utilizados en el estudio, principalmente referentes a las temperaturas mínimas nocturnas. El cálculo del número de heladas (ANFDs) o jornadas con temperatura mínima a 0°C , así como el cálculo de horas de frío Richardson ($T^{\text{a}} < 7^{\circ}\text{C}$) y horas de helada ($T^{\text{a}} < 0^{\circ}\text{C}$), se realiza a través del

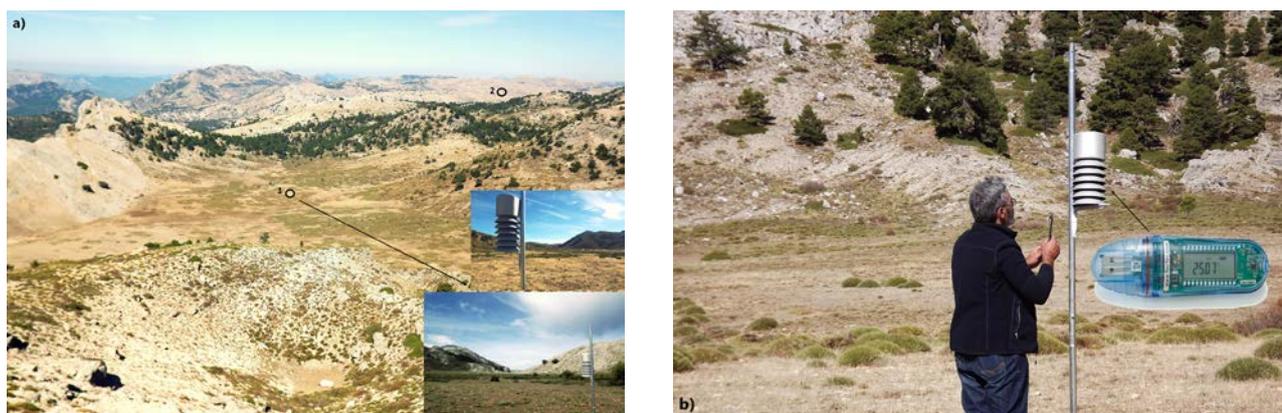


Figura 2(a): Vista panorámica del poljé colgado de Navasno (1) y campo de dolinas de Monterilla (2) en Hernán Perea, y (2b) detalle de la garita tipo pagoda de AEMET y datalogger microlite.

Figure 2(a): Panoramic view of the poljé of Navasno (1) and field of sinkhole Monterilla (2) in Hernán Perea, and (2b) detail of the pagoda type of AEMET and datalogger microlite.

análisis de hojas de cálculo (.csv). Además, se propone un índice de ratio de descenso, donde se establece el descenso de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) entre las 16:00 h (con insolación) y las 19:00 h. UTC (nocturno con irradiación). Se pretende cuantificar los desplomes térmicos más intensos durante los primeros momentos de las CAPs (tras la puesta de sol).

El promedio temporal de la temperatura del aire que refleja el sensor MODIS (MYD11A1) entre noviembre 2016 y mayo 2017 se realiza a través del promedio de 212 jornadas, utilizando las capas «Nighttime land surface» y «Nighttime clear sky» (para discriminar los píxeles nubosos). Se utiliza para ello el siguiente algoritmo para la conversión de valores de emisividad a temperatura del aire (Zhengming, 1999):

$$\text{TS} = ((\text{Banda} \cdot 0.02) - 273.15)$$

Además, se presenta una comparativa entre las temperaturas mínimas registradas por los *datalogger* y las temperaturas de los radiosondeos, tomando para ello la temperatura de cada una de las altitudes de los puntos de observación (*datalogger*) mediante el sondeo lanzado desde el CMT de Guadalupe - Murcia (AEMET) a las 00 UTC (1 de noviembre de 2016 al 31 de mayo de 2017). Se estudian, por tanto, las temperaturas en «atmósfera libre», es decir, aquellas que no están influidas por la topografía ni por ningún elemento que pueda distorsionar dichas temperaturas. Sería, pues, la temperatura teórica a cada altitud de los diferentes registradores de temperatura. Se analizan un total de 212 sondeos, tomando como referencia las altitudes de: 870, 1021, 1047, 1057, 1152, 1181, 1439, 1521, 1660 y 1770 m. Se establecen los ámbitos geográficos (*datalogger*) con mayor potencial para descender la temperatura respecto a la de su entorno altitudinal (intensidad de inversión).

Con la utilización de Modelos Digitales de Elevación (MDE) del PNOA (CNIG) se establecen diez intervalos altitudinales de 100 m, desde 850 a 1850 m de altitud, con

el fin de poder establecer los puntos más fríos de cada uno de los rangos planteados. Para ello, tras el cálculo promedio de la cartografía utilizada (212 mapas), se establece el píxel con la temperatura más baja.

Finalmente, se analizan dos casos de estudios de intensas inversiones térmicas, con irrupción fría y templada (21 de enero y 11 de marzo de 2017). Se realizan comparativas térmicas entre los diferentes *datalogger*, información de viento, humedad relativa, nubosidad y temperatura, a través de sondeos termodinámicos y estaciones meteorológicas en el área de estudio (www.meteociel.fr). El interés se centra especialmente en los *datalogger* instalados en los Campos de Hernán Perea, con una comparativa de sus diferentes parámetros topográficos entre el poljé de Navasno y la dolina de Monterilla, con especial significancia del parámetro *Sky View Factor* (f_v), (Whiteman *et al.*, 2004b):

$$f_v = \cos^2 \alpha$$

donde α es el ángulo promedio del horizonte marcado por las cumbres (medido desde el fondo). El valor más próximo a 1 (laderas más tendidas) determina un mayor enfriamiento irradiativo, siempre y cuando la dolina se encuentre cerrada.

Finalmente, los dos tipos de CAPs utilizados en los ejemplos, tipo 1 o evolución inalterada y tipo 8 o ventana de inversión, se caracterizan por presentar, en el primer caso, un descenso muy acusado de la temperatura tras la puesta de sol, con vientos inferiores a 5 m/s y humedades relativas inferiores al 60%. Son generadas principalmente por potentes dorsales en niveles medios y altos de la atmósfera al suroeste de la Península Ibérica. Mientras tanto, las ventanas de inversión suelen desarrollarse al alcanzar la calma en la fase más fría de la ventana (mínimo de viento de 0,8 m/s). Los valores medios de humedad relativa son extremadamente bajos, inferiores al 15% (Dorninger *et al.*, 2011.)

5. Resultados

5.1. Características de las temperaturas de los datos nocturnos de la red de dataloggers

Los valores promedios de las temperaturas mínimas obtenidas entre los meses de noviembre 2016 y mayo 2017 evidencian los dos puntos de observación más fríos en los Campos de Hernán Perea. En la dolina de Monterilla se obtienen promedios por debajo de 0°C, arrojando temperaturas mínimas medias de -2,2°C, y un promedio de -8,0°C en el mes de enero de 2017. En el resto de enclaves del área de estudio destacan La Risca y La Rogativa, con 0,7 y 1,1°C, respectivamente (Tabla 2). En cambio, las medias de las mínimas más elevadas se han obtenido en los observatorios de la cima de La Selva, en atmósfera libre (3,8°C), y el Barranco del Cenajo (3,1°C). Finalmente, es preciso considerar que las medias de las temperaturas mínimas mensuales adquieren valores negativos desde noviembre hasta abril, como es el caso del campo de dolinas de Monterilla, aspecto poco frecuente en ámbitos montañosos del

sureste peninsular (Figura 2). Además, es preciso señalar que Monterilla registra 54 días de helada consecutivos (10 diciembre 2016 - 1 febrero 2017), con dos hiatos (17 de diciembre de 2016 y 4 de enero de 2017). Asimismo, logra descender en 13 ocasiones por debajo de -10,0°C.

Las temperaturas mínimas absolutas muestran valores realmente sorprendentes en los puntos de observación utilizados. La dolina de Monterilla cuenta con registros de temperaturas mínimas por debajo de -10,0°C, durante tres meses diferentes. Mientras, Navasno sólo es capaz de establecerlo en enero y marzo (Tabla 3). Se advierten diferencias entre el mes de febrero y los meses de enero y marzo, siendo en el primero las mínimas del año 2017 marcadamente más elevadas del promedio para esta época del año. Por último, es preciso señalar que el 70% de los observatorios han registrado temperaturas por debajo de -10,0°C, e incluso registrando mínimas absolutas inferiores a -15,0°C, como es el caso de Monterilla y Navasno, con -18,6 y -15,8°C, respectivamente. El 18 de enero de 2017 se registra la jornada con la temperatura mínima promedio más baja (-11,5°C).

Tabla 2: Temperatura media de las mínimas (°C) (noviembre 2016 - mayo 2017).

Table 2: Average minimum temperature (°C) (november 2016 - may 2017).

Observatorio	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Media
Navasno	-0,2	-1,4	-5,1	-1,2	-1,3	1,3	5,6	-0,3
Monterilla	-2,0	-3,8	-8,0	-1,9	-2,9	-0,8	3,9	-2,2
Cañadas de Nerpio	1,1	-0,7	-3,6	0,9	0,6	3,4	8,1	1,4
Cañadas de Cañepla	1,8	1,9	-2,4	2,4	1,4	3,9	7,1	2,3
La Risca	0,3	-0,7	-3,3	0,9	-0,2	2,3	5,7	0,7
La Rogativa	0,4	-0,4	-3,3	0,9	0,4	2,8	7,6	1,1
Gollain	1,2	0,5	-2,3	0,8	0,9	2,9	5,7	1,4
Nevazo de Arriba	2,0	0,4	-1,8	1,6	1,7	3,7	6,2	2,0
Bco. del Cenajo	3,6	2,1	-1,5	2,6	2,2	4,7	8,0	3,1
La Selva	3,3	2,6	-0,3	1,9	3,2	5,9	9,7	3,8

Tabla 3: Temperaturas mínimas absolutas (°C) (noviembre 2016 - mayo 2017).

Table 3: Absolute minimum temperature (°C) (november 2016 - may 2017).

Observatorio	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Mínima
Navasno	-5,4	-6,4	-15,8	-6,1	-10,0	-3,9	-1,1	-15,8
Monterilla	-7,1	-14,0	-18,6	-8,0	-10,6	-7,9	-3,8	-18,6
Cañadas de Nerpio	-2,9	-6,5	-12,1	-3,3	-7,5	-0,5	3,1	-12,1
Cañadas de Cañepla	-3,9	-2,3	-9,8	-3,3	-4,3	-1,4	3,4	-9,8
La Risca	-5,5	-9,7	-12,0	-6,3	-4,9	-4,4	1,1	-12,0
La Rogativa	-4,6	-7,5	-11,7	-4,0	-5,6	-1,5	3,0	-11,7
Gollain	-2,8	-5,6	-11,3	-3,9	-4,1	-2,1	2,1	-11,3
Nevazo de Arriba	-2,9	-6,7	-10,9	-2,3	-3,1	-0,9	0,7	-10,9
Bco. del Cenajo	-1,3	-2,2	-8,1	-2,5	-2,2	-0,3	3,7	-8,1
La Selva	-1,6	-1,1	-9,3	-1,7	-3,4	0,3	3,8	-9,3

Respecto al número de heladas (ANFDs), el observatorio de Monterilla encabeza la lista, con un total de 145 heladas, seguido de Navalasno y La Risca, con 116 y 100 heladas, respectivamente, registrando heladas incluso en el mes de mayo (Tabla 4). Además, se aprecia en el mes de enero un mayor número de heladas, siendo en algunos casos prácticamente la totalidad del mes. Se evidencia una notable diferencia entre el pico de La Selva y el resto de *datalogger*, debido a su ubicación en atmósfera libre, sin influencia de inversiones térmicas, pese a su destacable altitud (1521 m).

El número total de horas de frío ($<7^{\circ}\text{C}$) y de helada ($<0^{\circ}\text{C}$), dentro del ámbito de los Campos de Hernán Perea, presentan los valores más elevados en ambos parámetros, con casi 3.500 horas de frío y alrededor de 1.100 horas de helada. Monterilla registra entre el 13 y el 23 de enero un total de 240 horas de frío, anotando en la totalidad de las 11 jornadas temperaturas siempre inferiores a 7°C .

Sin embargo, el resto de los puntos de observación presentan diferencias térmicas debido principalmente a su

orientación y ubicación. Así pues, el Nevazo de Arriba (>1200 m de altitud) registra 2.775 horas de frío debido a su altitud, lo que le permite no sólo registrar temperaturas muy bajas por inversiones térmicas, sino también por advección (Tabla 5). En cambio, en las horas de heladas se advierte un registro de 432. Mientras tanto, en otros ámbitos sin tanta influencia de los procesos de advección, como La Risca, se contabiliza un mayor número, concretamente 690,5 horas (Tabla 6).

Finalmente, con respecto al promedio del ratio descenso, los registros más destacables corresponde a La Risca ($5,7^{\circ}\text{C}$) y Gollain ($5,3^{\circ}\text{C}$), seguramente por tratarse de espacios con importante acumulación de radiación diurna, y una topografía donde los vientos catabáticos de las sierras colindantes (Gavilán, Álamos, Villafuerte...) actúan con celeridad e intensidad, por presentarse próximos a las respectivas cuencas. El mes con los promedios más elevados corresponde a mayo, aunque los meses de marzo y abril, por lo general, han registrado los valores absolutos más altos en La Rogativa ($14,8^{\circ}\text{C}$) y Gollain ($13,3^{\circ}\text{C}$). Éstos últimos registros destacan sobremanera,

Tabla 4: N° días de helada (ANFDs) (noviembre 2016 - mayo 2017).

Table 4: Frost days in the analyzed time period (november 2016 - may 2017).

Observatorio	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Total
Navalasnó	21	20	29	17	20	7	2	116
Monterilla	23	24	30	19	26	17	6	145
Cañadas de Nerpio	11	20	26	10	12	4	0	83
Cañadas de Cañepla	7	9	23	6	9	1	0	55
La Risca	13	19	27	11	20	10	0	100
La Rogativa	13	18	27	12	14	8	0	92
Gollain	12	17	26	14	14	9	0	92
Nevazo de Arriba	10	16	21	6	13	5	0	71
Bco. del Cenajo	6	12	23	6	8	2	0	57
La Selva	5	2	17	3	7	0	0	34

Tabla 5: N° horas de frío Richardson ($<7^{\circ}\text{C}$) (noviembre 2016 - mayo 2017).

Table 5: Richardson number hours ($<7^{\circ}\text{C}$) (november 2016 - may 2017).

Observatorio	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Total
Navalasnó	551,5	612,8	676,5	593,1	526,5	376,7	160,5	3.436,3
Monterilla	574,5	645,6	683,3	580,3	530,6	361,0	160,7	3.536,0
Cañadas de Nerpio	478,1	656,2	676,6	520,7	438,1	247,8	54,7	3.072,2
Cañadas de Cañepla	258,2	506,0	626,5	401,3	348,4	205,1	43,3	2.388,8
La Risca	235,9	494,9	577,5	355,8	353,0	241,0	109,8	2.367,9
La Rogativa	293,3	535,7	616,2	414,4	381,7	251,4	47,6	2.540,3
Gollain	319,2	505,9	575,1	382,1	362,9	246,2	121,8	2.513,2
Nevazo de Arriba	431,2	581,0	630,1	436,1	369,0	236,8	91,0	2.775,2
Bco. del Cenajo	292,4	460,0	546,5	289,1	335,8	189,1	39,6	2.152,5
La Selva	434,6	635,0	657,7	560,8	115,8	23,8	0,0	2.427,7

Tabla 6: N° horas de helada (<0°C) (noviembre 2016 - mayo 2017).
 Table 6: Frost number hours (<0°C) (november 2016 - may 2017).

Observatorio	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Total
Navalasnó	146,9	217,5	416,2	125,2	151,7	33,7	5,1	1.096,6
Monterilla	192,3	281,9	444,0	124,7	191,3	84,3	12,0	1.330,5
Cañadas de Nerpío	68,5	208,4	332,0	52,4	69,2	6,9	0,0	737,5
Cañadas de Cañepla	42,1	51,9	232,5	32,6	37,9	3,3	0,0	400,3
La Risca	90,5	169,3	231,1	59,1	101,2	23,2	0,0	690,5
La Rogativa	93,2	179,0	281,9	71,3	72,1	23,2	0,0	720,7
Golláin	58,7	143,3	222,2	77,0	73,1	23,9	0,0	598,2
Nevazo de Arriba	32,9	112,1	199,6	30,6	43,5	13,0	0,0	431,7
Bco. del Cenajo	24,9	65,3	197,9	30,0	35,3	3,5	0,0	356,9
La Selva	44,3	16,2	236,2	21,0	60,9	0,0	0,0	378,6

Tabla 7: Ratio de descenso (°C) (noviembre 2016 - mayo 2017).
 Table 7: Temperature drop (°C) (november 2016 - may 2017).

Observatorio	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Media
Navalasnó	4,2	1,7	2,3	2,3	5,0	5,5	5,7	3,8
Monterilla	4,1	3,5	3,9	2,7	5,8	6,4	6,4	4,7
Cañadas de Nerpío	2,3	2,4	2,6	2,9	5,5	5,7	5,6	3,9
Cañadas de Cañepla	3,1	2,8	3,7	3,8	4,9	5,1	4,3	3,9
La Risca	4,7	4,0	4,4	5,2	6,3	7,5	7,5	5,6
La Rogativa	3,5	2,8	3,3	4,1	6,5	6,6	6,3	4,7
Golláin	3,0	2,6	3,2	4,6	7,3	7,4	8,8	5,3
Nevazo de Arriba	3,0	2,5	2,9	3,5	5,6	5,1	7,2	4,3
Bco. del Cenajo	4,2	3,3	4,5	3,6	6,1	5,5	5,3	4,6

con descensos en el caso de la Rogativa de 5°C/hora (Tabla 7), al coincidir masas de aire templadas con sobrecalentamiento diurno y madrugadas todavía de gran duración temporal.

5.2. Representación espacial de las temperaturas

Las imágenes del producto MYD11A1 y el modelo de alta resolución del HARMONIE-AROME muestran los valores más fríos (temperaturas mínimas de noviembre a mayo) localizados en la Sierra de Segura. Concretamente en los *datalogger* de Navalasnó y Monterilla, ubicados en la cubeta de los Campos de Hernán Perea, cerradas al sur por la Sierra de la Cabrilla, y por el este con la Sierra de la Guillimona (Figura 3).

Sectores meridionales de la Sierra de las Cabras (Albacete), el oeste de la Región de Murcia, o la altiplanicie del norte de Almería, entre Topares y Cañada Cañepla (María), constituyen, además, un significativo foco de frío nocturno. Es preciso señalar que el *datalogger* insta-

lado en éste último paraje no ha obtenido los resultados esperados estimados por el sensor MODIS (Tabla 9).

Se observa un claro gradiente térmico hacia el este, especialmente en altitudes ya por debajo de los 700 m, destacando algunos sectores fríos de escasa extensión (Figura 4). En estos ámbitos, las herramientas utilizadas no pueden visualizar el almacenamiento de aire frío nocturno. En ese sentido destacan los parajes de Golláin y Nevazo de Arriba, en la sierra de Caravaca de la Cruz; y el Barranco del Cenajo, en la Sierra de Pedro Ponce (centro de la Región de Murcia).

La localización de los emplazamientos más fríos por intervalos altitudinales mediante el modelo mesoescalar HARMONIE-AROME y del sensor satelital MODIS (MYD11A1) servirá de ayuda para una futura planificación y elección de nuevos emplazamientos en la red de *datalogger* que se está generando. Además, permitirá conocer el potencial de frío y número de heladas de las diferentes altitudes del área de estudio (Figura 5).

En el intervalo altitudinal entre 850 y 950 m, donde se encuentra el *datalogger* ubicado en el Barranco del Cena-

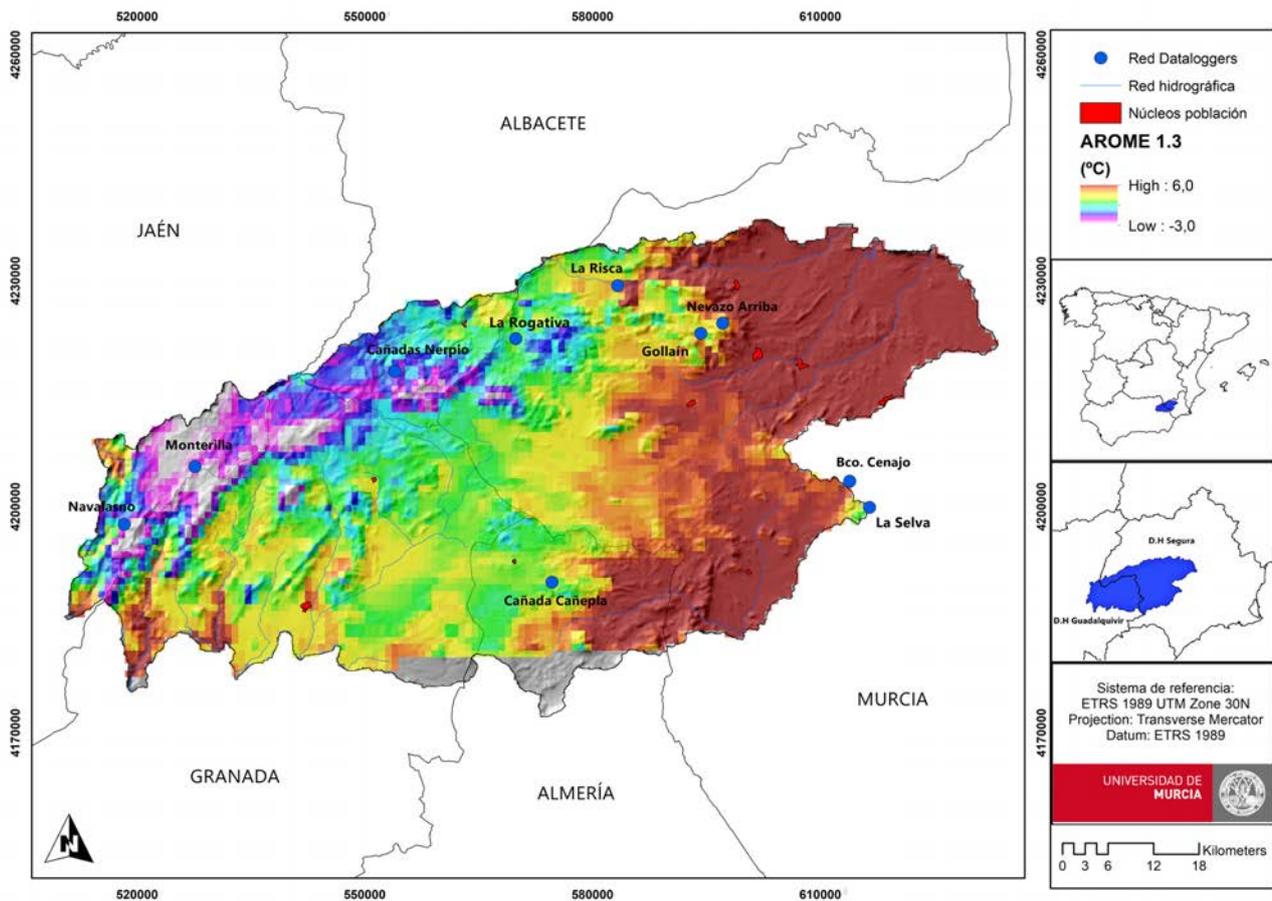


Figura 3: Distribución espacial de las temperaturas medias de las mínimas según el modelo mesoescalar HARMONIE-AROME 1.3 km (noviembre 2016 - mayo 2017).

Figure 3: Spatial distribution of average minimum temperatures according to the mesoscale model HARMONIE-AROME 1.3 km (november 2016 - may 2017).

jo, se obtiene como pixel más frío un sector entre los municipios de Huéscar y Orce (Granada), concretamente la Loma de los Atochares y Cañada Marín, con valores medios de 2 a 3°C más bajos que en el Barranco del Cenajo. A una altitud entre 950 y 1050 m, donde se ubican los parajes referencia de Gollain y La Risca, aparecen los lugares más fríos en la Sierra de Marmolance, al oeste de Huéscar (según HARMONIE-AROME). También al sur de la Puebla de Don Fadrique (Cortijo de Casablanca), en plena altiplanicie del norte de Almería. Suponen temperaturas inferiores de entre 1 y 2°C que los datos aportados por los *datalogger* ubicados a dicha altitud.

En el intervalo altitudinal donde se encuentra el *datalogger* de Cañada de Cañepla (María), entre 1050 y 1150 m, aparece el pixel más frío, concretamente a unos kilómetros de distancia, en la Cañada Grande, con sólo 0,5°C más bajo. En cambio, el modelo HARMONIE-AROME refleja el pixel más frío al norte de Castril, próximo al Embalse del Portillo, con 0,5°C menos que la ubicación del *datalogger*. En el intervalo 1150-1250 m, donde se encuentra representado el paraje de La Rogativa, destaca el norte de Huéscar, en el paraje de Casas de Campofique

y Cortijo Nuevo, en Pedro Andrés (Nerpio), con valores que se sitúan entre 1 y 2°C por debajo de La Rogativa.

En altitudes más elevadas (1350 y 1450 m), se ubica el *datalogger* instalado en las estribaciones de la Sierra de las Cabras, en las Cañadas de Nerpio (Albacete), aunque en esta ocasión tanto el modelo HARMONIE-AROME como las imágenes satelitales coinciden en señalar el pixel más frío del intervalo altitudinal en Prado Molinero, junto a la pedanía de Santiago de la Espada, del Patronato (Jaén), con temperaturas hasta 1°C por debajo. A continuación, se analizan las altitudes comprendidas entre 1450 y 1550 m, donde se encuentra el *datalogger* del Pico de La Selva (atmósfera libre). Aquí las temperaturas mínimas son relativamente altas para su altitud. En este sector, los píxeles más fríos aparecen en la pedanía anteriormente citada de Don Domingo (Santiago de la Espada), y en el Pico del Banderín (Sierra de Castril), con temperaturas que llegan a ser 3°C más bajas.

En los sectores más elevados (1650 y 1750 m), donde se sitúan los *datalogger* de los campos de Hernán Perea, los valores de temperaturas más bajos arrojados corresponden al Barranco del Torillo (Sierra de Castril), según

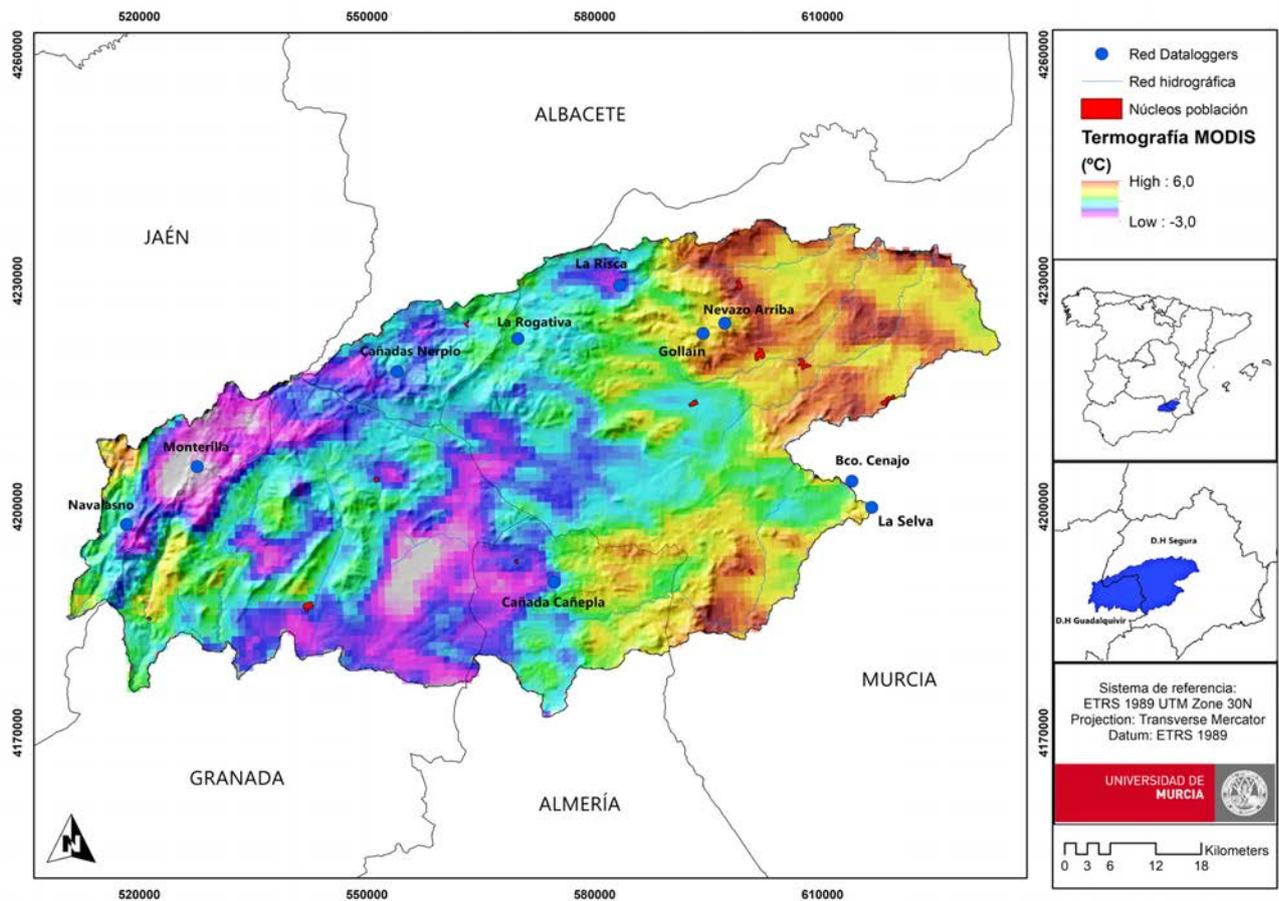


Figura 4: Distribución espacial de las temperaturas medias de las mínimas según el satélite MODIS AQUA (MYD11A1) (noviembre 2016 - mayo 2017).

Figure 4: Spatial distribution of average minimum temperatures according to MODIS AQUA satellite (november 2016 - may 2017).

el modelo HARMONIE-AROME. Coincidiendo con el *datalogger* ubicado en el campo de dolinas de Monterilla, el sensor MODIS (MYD11A1) establece el pixel más frío exactamente en este sector, y con la misma temperatura media de las mínimas (-1,6°C). Finalmente, en el intervalo altitudinal entre 1750 y 1850 m, donde se ubica el *datalogger* del polje colgado de Navasasno, los píxeles más fríos aparecen en la propia altiplanicie de Hernán Perea (MODIS), concretamente en Las Ratoneras, con un valor inferior en 1,4°C a Navasasno. Sin duda, se evidencia que no es una zona, a pesar de su altitud, donde los procesos de inversión térmica sean muy intensos. Por último, el modelo HARMONIE-AROME establece el punto más frío de toda el área de estudio en el Cerro de Torcas Altas, en la Sierra de la Guillimona (-2,3°C). Se concluye que los datos aportados por el modelo HARMONIE-AROME siguen una clara secuencia altitudinal, con valores entre 2,2°C en el intervalo 850-950 m y -2,3°C entre los 1750 y 1850 m. Por el contrario, las imágenes de satélite identifican mejor las piscinas frías, pues los valores más bajos (-1,6°C) se dan tanto en el rango altitudinal de 950-1050 m como en el de 1750-1850 m (Tabla 8).

5.3. Análisis de inversión térmica y distribución de probabilidad de heladas

Las inversiones térmicas en el área de estudio adquieren especial protagonismo en invierno, con valores realmente altos si se tiene en cuenta que los *datalogger* se sitúan a una altitud entre 900 y 1700 m. Para ello, se recurre a la comparativa entre las temperaturas mínimas registradas en superficie por los *datalogger*, y la temperatura en «atmósfera libre», es decir, el valor térmico de la altura geopotencial de cada uno de ellos sin ningún elemento que distorsione el valor. En ese sentido, según se aprecia en el diagrama de cajas, los parajes de Monterilla y La Risca son los ámbitos geográficos que registran las inversiones térmicas más intensas, según su altitud, con medianas de -10°C. Los valores absolutos alcanzan -22,0°C de diferencia, concretamente el 31 de diciembre de 2016 y el 22 de marzo de 2017. Es preciso apuntar que mientras se anotaba una temperatura de 8,0°C en el Geopotencial de 1660 m de altitud (Monterilla) a las 00Z del 31 de diciembre de 2016, la temperatura mínima registrada durante dicha madrugada fue de -14,0°C. Se trata, sin duda, de

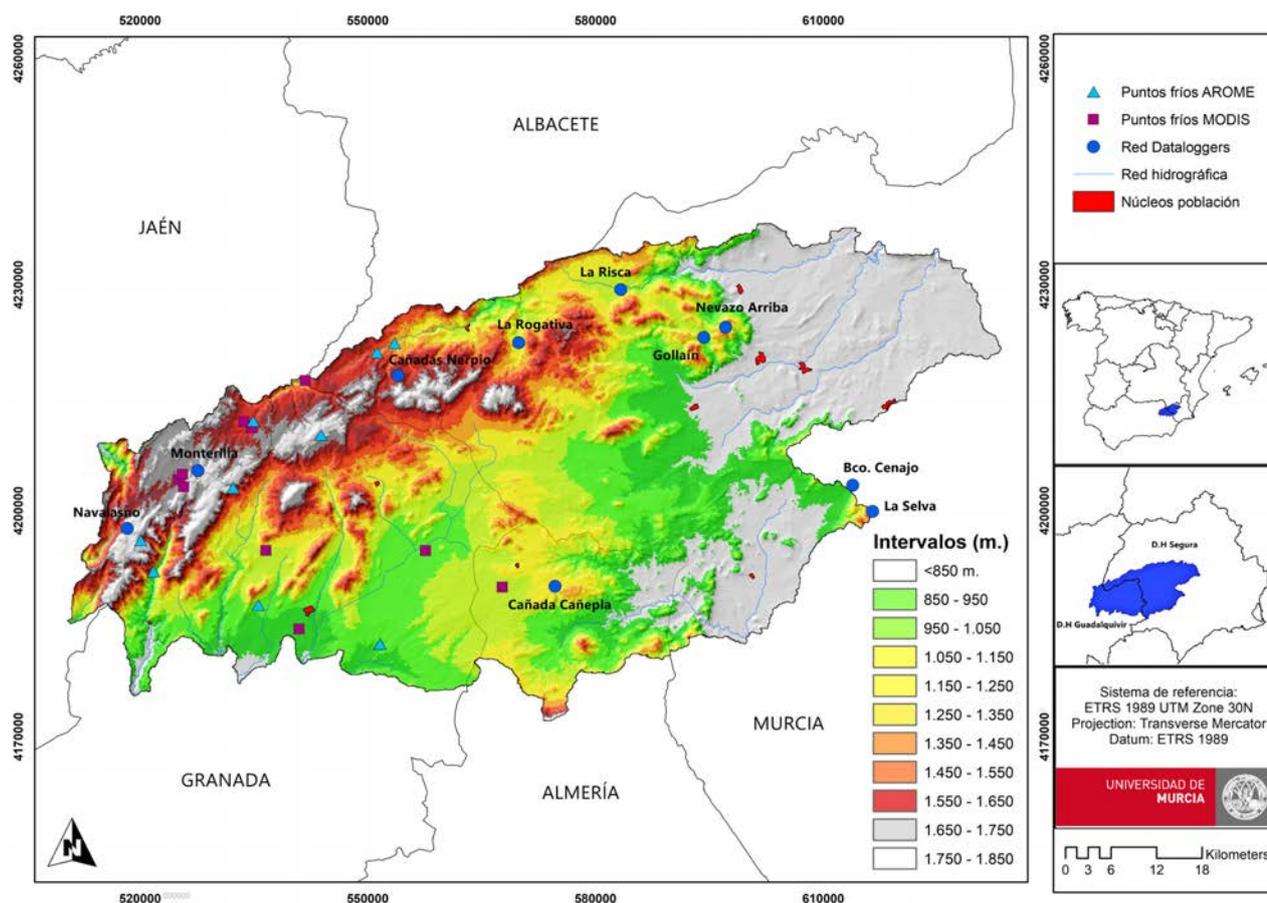


Figura 5: Representación de los puntos más fríos por intervalos altitudinales, calculados a través del modelo mesoescalar HARMONIE-AROME y satélite MODIS AQUA (MYD11A1)

Figure 5: Representation of the coldest points by altitudinal intervals, calculated through the mesoscale HARMONIE-AROME model and MODIS AQUA satellite (MYD11A1)

zonas con un potencial extraordinario de acumulación de aire frío en madrugadas estables, cuyos extremos más elevados superan con frecuencia los -15°C . Por el contrario, el pico de La Selva, situado en atmósfera libre, presenta los valores más bajos de la zona de estudio, con una mediana que se sitúa en sólo -3°C de diferencia. Constituye, por tanto, una zona que representa de forma muy aproximada el Geopotencial de 850 hPa (Figura 6), teniendo siempre en consideración que los valores mínimos se registran 7/8 horas después de la lectura del sondeo atmosférico (00 UTC) durante la época invernal.

Se registran inversiones térmicas igualmente intensas en los enclaves de Gollain y La Rogativa, con medianas de -9°C , y que constituyen espacios donde el aire frío nocturno se acumula con importancia en madrugadas estables. En estos sectores los valores absolutos más importantes alcanzan -18 y -20°C respectivamente, aunque el Barranco del Cenajo o Cañada Cañepla, con medianas de -8°C , ligeramente inferiores, son capaces de generar valores absolutos de -20°C . Es preciso señalar que la recurrencia es más limitada que los enclaves anteriores citados. Finalmente, a excepción de La Selva, los enclaves con las inversiones

térmicas menos intensas corresponden al Nevazo, Cañadas de Nerpio y Navasasno, espacios situados entre 1200 y 1800 m de altitud, que, a pesar de conformar espacios con un considerable potencial de acumulación de aire frío en zonas altas, obtienen medianas de -7°C . Ninguno de estos emplazamientos registra diferencias superiores a los -16°C , aunque su mayor altitud lo compensa.

El mes donde se producen las mayores diferencias corresponde a marzo, con un promedio de $-8,9^{\circ}\text{C}$, seguido de noviembre ($-8,2^{\circ}\text{C}$) y mayo ($-8,0^{\circ}\text{C}$). Se trata de meses donde las advecciones en capas medias atmosféricas, por lo general, son más templadas, pero que la longitud de la madrugada genera temperaturas mínimas absolutas relativamente bajas. Por el contrario, diciembre y febrero se caracterizan por presentar las diferencias comúnmente más bajas, con $-7,0$ y $-6,7^{\circ}\text{C}$ respectivamente, si bien es cierto que tienen la suficiente capacidad para generar diferencias absolutas entre -17 y -22°C .

La probabilidad de helada según la temperatura Geopotencial de 850 hPa puede ser una buena herramienta para el pronóstico de las temperaturas inferiores a 0°C . En el estudio se utiliza un año de observación, quizás un ran-

Tabla 8: Resumen de los parajes con el valor de temperatura más bajo según HARMINIE-AROME y MODIS (MYD11A según rango altimétrico).

Table 8: Place's summary with the lowest temperature value by HARMINIE-AROME and MODIS (MYD11A according to altimetric range).

Altitud (m.)	HARMONIE-AROME				MODIS (MYD11A1)			
	Municipio	Paraje	Tª (°C)	X,Y	Municipio	Paraje	Tª (°C)	X,Y
850-950	Orce	Loma Atochares	2,2	549600, 4180151	Huéscar	Cañada Marín	-1,0	538989, 4182250
950-1050	Huéscar	Sª Marmolance	1,4	533612, 4185320	Puebla don Fadrique	Cortijo de Casablanca	-1,6	534578, 4192658
1050-1150	Castril	Emb. Portillo	1,3	519781, 4189870	María	Cañada Grande	-1,3	565489, 4187753
1150-1250	Nerpio	Pedro Andrés	1,0	551562, 4220135	Huéscar	Casas de Campofique	-1,3	534404, 4192387
1250-1350	Nerpio	Sª de Huebras	0,4	549197, 4218896	Nerpio	Río Zumeta	-0,8	539664, 4215172
1350-1450	S. de la Espada	El Patronato (Prado Molinero)	-0,1	532913, 4209848	S. de la Espada	El Patronato (Prado Molinero)	-1,1	531725, 4209676
1450-1550	Castril	Pico el Banderín (Sª Castril)	-0,6	530196, 4200901	S. de la Espada	Don Domingo (Rambla del Tollico)	-1,1	531614, 4209676
1550-1650	Castril	Barranco de la Magdalena (Sª Castril)	-1,7	518083, 4193998	S. de la Espada	Campos Hernán Perea (Juan Perrera)	-1,5	523460, 4202747
1650-1750	Castril	Barranco del Torillillo (Sª Castril)	-1,7	519564, 4197153	S. de la Espada	Campos Hernán Perea (Monterilla)	-1,6	523168, 4201995
1750-1850	Puebla don Fadrique	Cerro Torcas Altas (Sª Guillimona)	-2,3	541954, 4207984	S. de la Espada	Campos Hernán Perea (Ratoneras)	-1,5	523543, 4200965

Tabla 9: Diferencias de temperatura entre lo estimado por el sensor MODIS (MYD11A1), por el modelo meteorológico HARMINIE-AROME y los datalogger del área de estudio (noviembre 2016 - mayo 2017).

Table 9: Temperature differences between MODIS sensor (MYD11A1), the meteorological model HARMINIE-AROME and the dataloggers of the study area (november 2016 - may 2017).

Observatorio	Tª MODIS (°C)	Tª AROME (°C)	Tª Superficie (°C)	Diferencia T Sup. - MODIS (°C)	Diferencia T Sup. - AROME (°C)
Navalaso	0,0	0,1	-0,3	-0,3	-0,4
Monterilla	-2,3	-0,2	-2,2	0,1	-2,0
Cañadas de Nerpio	0,0	0,2	1,4	1,4	1,2
La Rogativa	1,7	1,9	1,1	-0,6	-0,8
La Risca	-0,7	3,0	0,7	1,4	-2,3
Gollain	2,8	2,6	1,4	-1,4	-1,2
Nevazo de Arriba	3,0	2,9	2,0	-1,0	-0,9
Bco. del Cenajo	1,3	3,6	3,1	1,8	-0,5
La Selva	2,5	2,3	3,8	1,3	1,5
Cañadas de Cañepla	-0,6	3,0	2,3	2,9	-0,7
Promedio	0,8	1,9	1,3	0,5	-0,6

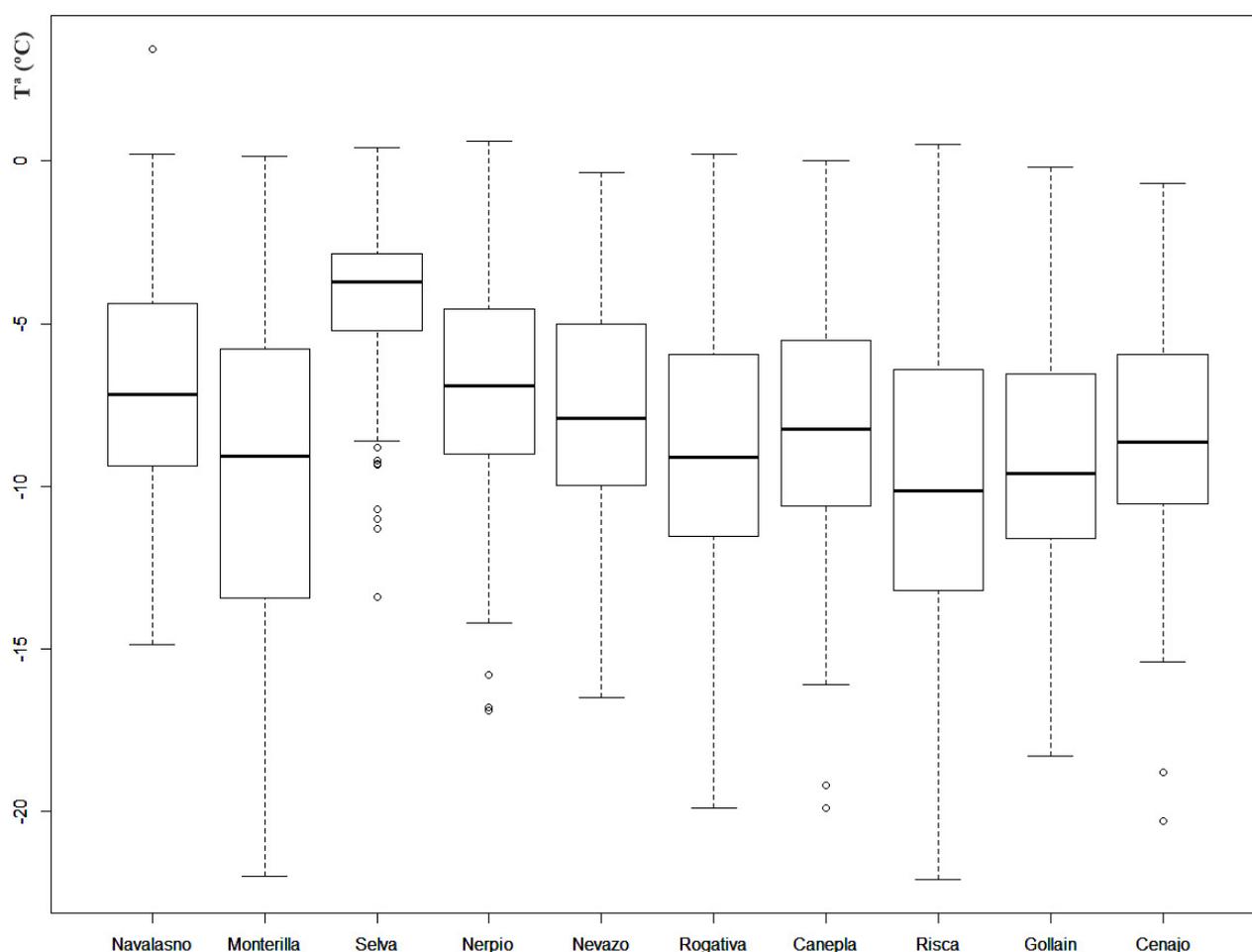


Figura 6: Distribución de las diferencias entre las temperaturas mínimas registradas por los datalogger, y la temperatura en «atmosfera libre» para la altitud de cada datalogger (noviembre 2016 - mayo 2017).

Figure 6: Distribution of the differences between the minimum temperatures registered by the datalogger, and the temperature in «free atmosphere» for the altitude of each datalogger (November 2016 - May 2017).

go temporal de escasa duración. Pese a ello, se advierte cómo las heladas están casi aseguradas con una isoterma de 0°C , salvo en el Nevazo y Cañada de Cañepla, donde los porcentajes se sitúan entre el 85 y el 75% (Tabla 10).

Sin embargo, con la isoterma de 5°C , Monterilla y Navalsno presentan los porcentajes más elevados, debido a su mayor altitud (85 y 77% de probabilidad de helada), mientras que otros emplazamientos a una altitud menor mantienen una probabilidad de helada relativamente alta, como Cañadas de Nerpio (67%), La Risca (65%), La Rogativa (63%) o Gollain (61%). No obstante, esta isoterma condiciona considerablemente que la temperatura descienda de 0°C en los parajes del Nevazo, Barranco del Cenajo, Cañada Cañepla o La Selva, con porcentajes entre el 52 y el 42%. Tanto Monterilla como Navalsno mantienen porcentajes realmente elevados, del 77 y 71% con la isoterma 10°C a 850 hPa, lo que ya supone para su altitud una reducción en el proceso de inversión térmica de más de 10°C para llegar a la helada. Se concluye, por tanto, que en el páramo de Hernán Perea la probabilidad

de helada se mantiene muy elevada durante toda la estación invernal, casi siempre con isotermas a 850 hPa inferiores a 10°C . Los porcentajes se reducen en La Selva (24%), Cañada Cañepla (33%) o Barranco del Cenajo (38%).

Finalmente, con una temperatura templada en el sureste peninsular (15°C a 850 hPa), sorprende Monterilla con un porcentaje de helada del 70%, corroborando una vez más que se trata de un emplazamiento que posee una probabilidad muy elevada de helada, en condiciones de estabilidad atmosférica. El resto de emplazamientos presentan porcentajes considerablemente más bajos en comparación con la Altiplanicie de Hernán Perea, pero a pesar de ello siguen siendo relativamente elevados y próximos a Navalsno; en La Risca: 56%, Gollain y La Rogativa: 49%, y en Cañadas de Nerpio: 43%.

Se establece, además, una gran diferencia entre el polje colgado de Navalsno (59%) y Monterilla (70%). Parece que la tipología en forma de dolina se impone al poje plano en la consecución de temperaturas mínimas más

Tabla 10. Probabilidad de helada según la isoterma a 850 hPa registrada a las 00 UTC (noviembre 2016 - mayo 2017).
 Table 10. Frost probability according to the isotherm at 850 hPa registered at 00 UTC (november 2016 - may 2017).

Tª 850 hPa (°C)	Monterilla	Navalasnó	La Selva	Nerpio	Nevazo	Rogativa	Cañepla	Risca	Gollain	Cenajo
-7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
-2	100	100	100	100	100	100	85	100	100	100
-1	100	100	100	100	87	100	80	100	100	100
0	100	100	100	100	83	100	77	100	100	100
1	100	100	100	100	82	92	75	73	91	82
2	91	91	77	86	60	77	64	64	73	73
3	94	87	71	84	57	71	52	65	65	65
4	90	83	56	73	53	69	49	65	63	54
5	85	77	48	67	52	63	42	65	61	48
6	83	76	39	66	48	63	40	63	63	46
7	84	74	32	61	47	63	39	65	60	42
8	84	72	29	58	47	62	38	64	60	42
9	78	71	25	53	45	62	35	64	60	39
10	77	71	24	53	45	61	33	67	61	38
11	75	71	23	52	43	61	32	66	58	36
12	74	68	21	50	43	58	28	63	56	36
13	71	65	20	47	41	52	26	58	51	33
14	72	61	19	45	37	52	23	58	51	33
15	70	59	18	43	35	49	24	56	49	31
16	70	58	18	42	33	47	23	53	47	29
17	69	56	17	41	32	45	22	52	45	28
18	67	54	17	39	32	45	22	52	45	28

bajas. El poljé a pesar de poseer una mayor extensión, se encuentra más abierto a los vientos en capas medias de la atmósfera. Tal y como apuntan los parámetros teóricos de Daly *et al.* (2010), la dolina de Monterilla posee una menor insolación y una mayor predisposición a las sombras invernales (Sky View Factor muy elevado: 0,91). Estas aparecen a primeras horas de la tarde, lo que, al principio del proceso de inversión térmica (45 minutos después de la puesta de sol), las paredes de la dolina evitan el desplazamiento lateral de la CAP, quedando el aire frío mucho más confinado (Whiteman & Barr, 1986)). En cambio, el poljé, a pesar de poseer un mayor volumen de almacenamiento de aire frío, posee una gran abertura hacia el suroeste que propicia un flujo nocturno más turbulento ($R_c > 0,25$, modelo teórico de Dorninger *et al.*, 2011). La CAP, por tanto, es mayormente erosionada por los fuertes vientos que soplan en invierno en los picos alledaños

(Empanadas y Cabrilla, cerca de 2100 m de altitud). El emplazamiento en atmósfera libre (La Selva) sólo presenta el 18%, lo que concluye que sólo emplazamientos con suficiente potencial de inversiones térmicas intensas pueden presentar una de cada dos madrugadas con heladas bajo una masa de aire templada y estable en el invierno.

5.4. Casos de estudio: 21/01/2017 y 11/03/2017

Se analizan dos casos de estudio referentes al comportamiento de dos episodios de inversión térmica y la evolución de las CAPs en el área de análisis. En primer lugar, durante la madrugada del 21 de enero de 2017 se registraron en el sureste de la Península Ibérica temperaturas mínimas considerablemente bajas para enero, con anomalías de 2 a 3°C, debido a la advección de aire frío de origen

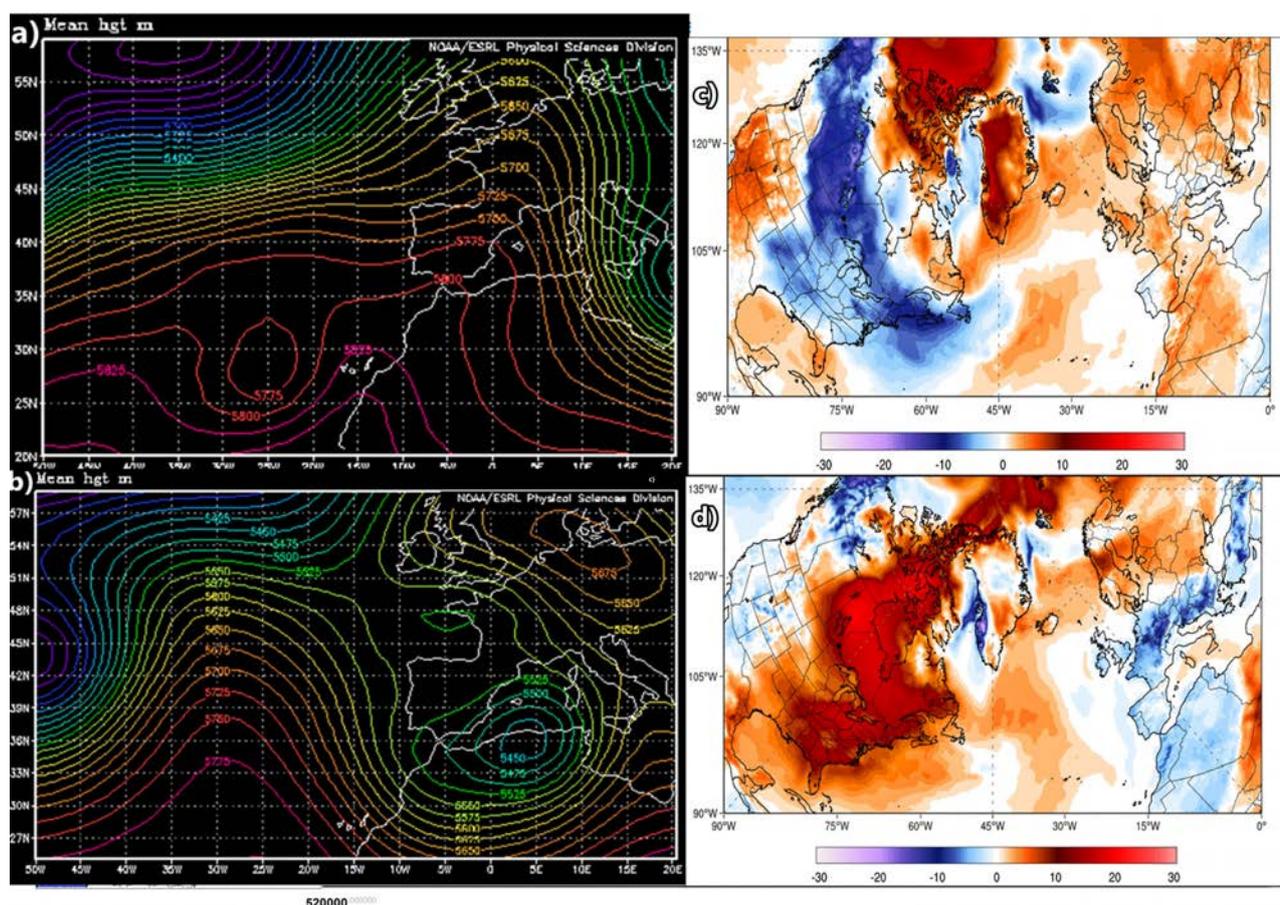


Figura 7: Configuración sinóptica (geopotencial 500 hPa) y anomalía de temperatura a 2 m de: a) y d) 11 de marzo de 2017; y b) y d) 21 de enero de 2017.

Figure 7: Synoptic configuration (Geopotential 500 hPa) and temperature anomaly 2 m of: a) march 11, 2017 and b) january 21, 2017.

Polar continental (Pc). Se anota una temperatura de $-5,7^{\circ}\text{C}$ en el Geopotencial de 850 hPa en la ciudad de Murcia (sondeo de las 00 UTC) (Figura 7a y 7c). Con un importante albedo, debido a la nieve acumulada durante días anteriores (50-60 cm), se generan procesos de irradiación en el campo de dolinas de Monterilla, registrando un valor mínimo de temperatura de $-18,6^{\circ}\text{C}$ a las 02:40 h. En efecto, son diversas las investigaciones científicas que ponen de relieve la interrelación existente entre un mayor espesor de nieve con procesos de inversión térmica, tal y como demuestran Vitasse *et al.* (2017) en el Valle de La Brevine (Suiza). Los autores concluyen que las temperaturas mínimas más bajas (durante procesos de irradiación), se registran con acumulaciones de entre 60 y 90 cm de nieve.

El tipo de CAP presente durante esta madrugada es la *cold pool* «window» o ventana de inversión (Dorninger *et al.*, 2011). Se trata de una piscina de aire frío extremadamente corta en el tiempo, como consecuencia de un intervalo de calma puntual tras un frente, o por lo apertura de claros en la zona de estudio. Suele aparecer bajo condiciones dinámicas intensas, tal y como ocurrió durante ese

periodo con alternancia de inestabilidad (nevadas a cota baja) y momentos de calma nocturna (Figura 8a).

El segundo episodio de análisis, la madrugada del 11 de marzo de 2017, se produce una advección de aire templado subtropical marítimo de componente suroeste en la Península Ibérica (Figura 7b y 7d), con temperaturas en el geopotencial de 850 hPa de $17,3^{\circ}\text{C}$ en la ciudad de Murcia (sondeo de las 00 UTC). Se producen anomalías térmicas de 7°C . El tipo de piscina fría o CAP que da lugar es la más común de los analizados a nivel planetario. Se trata del tipo 1 de Dorninger, o «*undisturbed night*» (evolución inalterada). Se caracteriza por presentar un descenso de temperatura muy acusado durante las primeras horas de la tarde-noche, coincidiendo con una rápida pérdida de energía infrarroja. Con un progresivo pero paulatino descenso térmico durante la madrugada, la capa límite de inversión suele romperse aproximadamente una hora después de la salida del sol (Eisenbach *et al.*, 2003). Desde el punto de vista sinóptico suelen coincidir con irrupciones potentes de dorsales en niveles medios y altos atmosféricos de origen subtropical marítimo, acompañadas de altas presiones superficiales. En el área de estudio

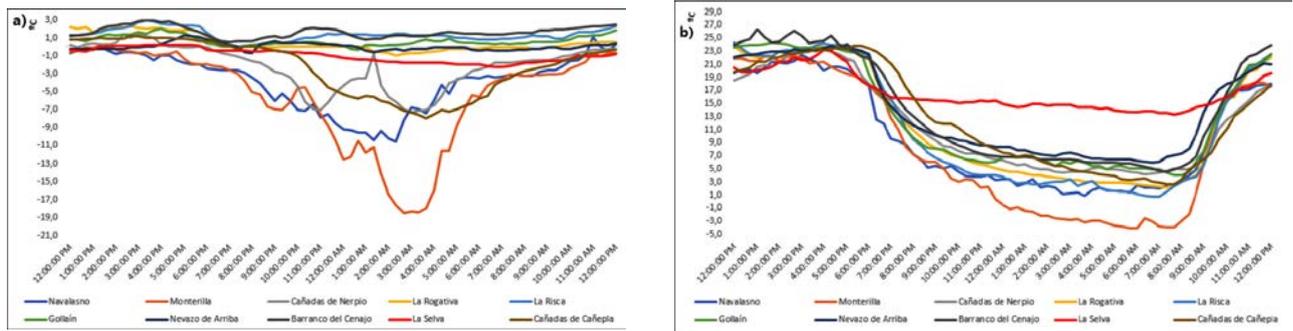


Figura 8: Evolución temporal de la temperatura de los datalogger del área de estudio durante las jornadas de: a) 21 de enero de 2017 y b) 11 de marzo de 2017.

Figure 8: Temperature evolution of the datalogger in the study area during the days of: a) January 21, 2017 and b) March 11, 2017.

aparecen diferencias térmicas de 17,2°C entre las temperaturas mínimas de la dolina de Monterilla (-4,1°C) y el pico de La Selva (13,3°C), donde la ausencia de flujos de viento en zonas deprimidas es el principal factor para tales diferencias (Figura 8b).

6. Discusión y conclusiones

A tenor de los datos resultantes, el interior sureste peninsular, y más concretamente la Sierra de Segura (Campos de Hernán Perea), es un espacio extraordinariamente frío en invierno, con promedios de las temperaturas mínimas de hasta -8,0°C en el mes de enero del año 2017, y valores absolutos por debajo de -18,0°C. Además, presenta un total de 145 días de heladas desde octubre a mayo. Otros ámbitos

geográficos también destacan por sus interesantes valores de temperaturas invernales, como demuestra, por ejemplo, las 100 heladas acumuladas a altitudes que rondan los 1000 m de altitud en el interior de la Región de Murcia.

Desde el 1 noviembre de 2016 al 31 mayo de 2017, el valor mínimo de -18,6°C ocupa el 9º valor más bajo de todos los registros analizados en España, bien sea a través de redes meteorológicas oficiales o de aficionados (foro «Polos de frío», en <https://foro.tiempo.com/>) (Tabla 11). Además, las tasas de descenso en piscinas frías son especialmente acusadas en el área de estudio, con gradientes de 123,7°C/km (11 marzo 2017), es decir, diferencias térmicas de 17,2°C en 139 m de altitud. Son valores incluso superiores a los aportados por Pepin & Kidd (2006) en la Cerdanya catalana (Pirineos orientales), con 82,9°C/km el 23 junio 2003, o lo que es lo mismo, diferencias de 8,0°C

Tabla 11: Valores de temperatura mínimas más bajas en España (noviembre 2016 - mayo 2017).

Table 11: Absolute minimum temperature in Spain (november 2016 - may 2017).

Paraje-Municipio	Provincia	Red/Usuario	Altitud	Temperatura (°C)
Camalonga	Navarra	MeteoRoncal (estación no-profesionales)	1540	-27,4
Pica D'Estats	Lérida	Meteo Valls D'Aneu	3143	-25,0
Cespedosa - Linares	Teruel	Meteoibericosureste	1490	-24,5
Das Aeródromo	Gerona	meteo.cat	1100	-21,6
Llivia	Gerona	Meteo Valls D'Aneu	1225	-21,5
Hoyón de Ródenas	Teruel	Pedre (estación no-profesionales)	1460	-21,4
Poljé Vasequilla	Teruel	Pedre (estación no-profesionales)	1518	-20,9
Fortanete	Guadalajara	Meteoibericosureste	1353	-20,7
Alcalá de la Selva	Teruel	Meteoibericosureste	1404	-20,3
Monterilla	Jaén	Propia (estación no-profesionales)	1660	-18,6
Sierra de las Nieves	Málaga	ACAMET	1700	-18,0
El Toro - Navas	Castellón	AVAMET	1481	-18,0
Villaceid	León	Leónnieve (estación no-profesionales)	1045	-17,0
Brañuelas	León	SAIH Duero	1090	-16,2
Navasasno	Jaén	Propia (estación no-profesionales)	1770	-15,8

en 96 m de altitud. Mediante el análisis de modelos mesoescalares de alta resolución y productos elaborados del sensor MODIS, el paraje de Las Ratoneras (Campos de Hernán Perea) y el Cerro de Torcas Altas (Sierra de la Guillimona) constituyen los emplazamientos con una estimación de las temperaturas mínimas más bajas durante el invierno 2016/2017.

Las inversiones térmicas más intensas en el área de estudio se producen en el mes de enero (-8,9°C), noviembre y marzo, con diferencias alrededor de -8°C son capaces de generar valores absolutos de -22°C en la Risca (Murcia) y Monterilla (Jaén), presentando, por tanto, las mayores acumulaciones de aire frío con respecto al entorno de su atmósfera libre. Sin embargo, espacios como Navalasno (Jaén), Cañadas de Nerpio (Albacete) o Nevaizo (Murcia) presentan procesos de inversión térmica algo más modestos. Sin duda, en el área de estudio, la topografía en forma de dolina parece acumular mejor el aire frío que en el poljé, con una probabilidad muy alta de helada en Monterilla, del 100% con la isoterma 0°C a 850 hPa, del 85% a 5°C, del 77% a 10°C, llegando incluso al 70% de heladas con madrugadas estables bajo isotermas «templadas» de 15°C a 850 hPa.

Agradecimientos

Por su inestimable ayuda, especial agradecimiento a la Delegación Territorial de Murcia de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), y a su meteorólogo Luis Bañón, por la cesión de dos garitas tipo pagoda, y por la calibración de dos *data logger* del tipo Microlite 32K empleados en los Campos de Hernán Perea (Monterilla y Navalasno).

Referencias

- Atlas Climático Digital de la Península Ibérica, 2006. Departamentos de Biología y Ecología de la Universidad Autónoma de Barcelona. <http://www.opengis.uab.es/wms/iberia/mms/index.htm>
- Castillo Requena, J. M. (1988). *La abstracción climática, la realidad meteorológica y la aproximación geográfica: el clima de Andalucía desde las perspectivas del análisis regional con los tipos de tiempo* (Tesis Doctoral, Universidad de Granada), 861 pp.
- Clements, C.B., Whiteman, C.D. & Horel, J.D., 2003. Cold-air-pool structure and evolution in a mountain basin: Peter Sinks, Utah. *Journal of Applied Meteorology*, 42(6): 752-768. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0752:CSAEIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0752:CSAEIA>2.0.CO;2)
- Cunha, S., Silva, A., Cabrinha, V., Nunes, L.F., Mendes, L., Marques, J., Mendes, M. & Neto, J., 2011. *Atlas climático ibérico*. Agencia Estatal de Meteorología, 80 pp. ISBN: 978-84-7837-079-5
- Daly, C., Conklin, D.R. & Unsworth, M.H., 2010. Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts. *International Journal of Climatology*, 30(12): 1857-1864. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.2007>
- Dorninger, M., Whiteman, C.D., Bica, B., Eisenbach, S., Pospichal, B. & Steinacker, R., 2011. Meteorological events affecting cold-air pools in a small basin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(11): 2223-2234. <https://doi.org/10.1175/2011JAMC2681.1>
- Eisenbach, S., Pospichal, B., Whiteman, C.D., Steinacker, R. & Dorninger, M., 2003. Classification of cold air pool events in the Gstettneralm, a sinkhole in the Eastern Alps. Extended Abstracts, Int. Conf. on Alpine Meteorology and MAP-Meeting, Brig, Switzerland, MeteoSwiss, Publication 66, 157-160.
- Gómez-Zotano, J., Alcántara-Manzanares, J., Martínez-Ibarra, E. & Olmedo-Cobo, J.A., 2015. La sistematización del clima mediterráneo: identificación, clasificación y caracterización climática de Andalucía (España). *Revista de Geografía Norte Grande*, 61: 161-180. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022015000200009>
- Gómez-Zotano, J., Alcántara-Manzanares, J., Martínez-Ibarra, E. & Olmedo-Cobo, J.A., 2016. Applying the technique of image classification to climate science: the case of Andalusia (Spain). *Geographical Research*, 54(4): 461-470. <http://dx.doi.org/10.1111/1745-5871.12180>
- Jiménez, M.A., Ruiz, A. & Cuxart, J., 2015. Estimation of cold pool areas and chilling hours through satellite-derived surface temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207: 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.017>
- Lareau, N.P., Crosman, E., Whiteman, C.D., Horel, J.D., Hoch, S.W., Brown, W.O. & Horst, T.W., 2013. The persistent cold-air pool study. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(1): 51-63. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00255.1>
- Litschauer, D., 1962. *Untersuchung der Entwicklung von Kaltluftseen in Dolinen- und Beckenlagen (Investigation of the development of cool air pools in sinkholes and basins)*. Ph.D. dissertation, University of Vienna, 129 pp.
- Miró, J.R., Peña, J.C., Pepin, N., Sairouni, A. & Aran, M., 2017. Key features of cold-air pool episodes in the northeast of the Iberian Peninsula (Cerdanya, eastern Pyrenees). *International Journal of Climatology*, 37. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5236>
- Page's, M., Pepin, N. & Miró, J.R., 2017. Measurement and modelling of temperature cold pools in the Cerdanya valley (Pyrenees), Spain. *Meteorological Applications*, 2(24): 290-302. <http://dx.doi.org/10.1002/met.1630>
- Pepin, N. & Kidd, D., 2006. Spatial temperature variation in the Eastern Pyrenees. *Weather*, 61(11): 300-310. <http://dx.doi.org/10.1256/wea.106.06>
- Pospichal, B., Eisenbach, S., Whiteman, C.D., Steinacker, R. & Dorninger, M., 2003. Observations of the cold air outflow from a basin cold pool through a low pass. En Ext. Abstr., Vol. A, Intl Conf. Alpine Meteor. and the MAP-Meeting 2003 (pp. 153-156).
- Richardson, E.A., Seeley, S.D & Walker, D.R., 1974. A model for estimating the completion of rest for Redhaven and Alberta peach trees. *Hortic. Science* 9(4): 331-332.
- Sarzi Freddi, L., 2010. Comparazione temperature da stazione e temperature da sensore MODIS. Tesi di Master, ARPAE, 62 pp.
- Sauberer, F. & Dirmhirn, I., 1954. Über die Entstehung der extremen Temperaturminima in der Doline Gstettner-Alm. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 5(3-4): 307-326.
- Sauberer, F. & Dirmhirn, I., 1956. Weitere Untersuchungen über die kaltluftansammlungen in der Doline Gstettner-Alm bei Lunz im Niederösterreich (Further investigations of the cold air buildup in the Gstettner-Alm doline near Lunz in lower Austria). *Wetter Leben*, 8: 187-196.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F. & Masson, V., 2011. The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139(3): 976-991. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1>

- Steinacker, R., Dorninger, M., Pospichal, B., Eisenbach, S., Holzer, A.M., Whiteman, C.D. & Baumann, K., 2007. A sinkhole field experiment in the Eastern Alps. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(5): 701-716. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-5-701>
- Süld, K. & Denby, R., 2015. Verification of AROME MetCoOp reanalysis for 2010. *Klimamodellering og luftforurensning (KL) and Numerisk værvarsling (NM)*, ISSN 2387-4201.
- Vitasse, Y., Klein, G., Kirchner, J. W. & Rebetez, M., 2017. Intensity, frequency and spatial configuration of winter temperature inversions in the closed La Brevine valley, Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(3-4): 1073-1083. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1944-1>
- Whiteman, C.D., 1986. Temperature inversion buildup in Colorado's Eagle Calley. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 35(4): 220-226. <https://doi.org/10.1007/BF01041814>
- Whiteman, C.D. & Barr, S., 1986. Atmospheric mass transport by along-valley wind systems in a deep Colorado valley. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(9): 1205-1212. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025<1205:AMTBAV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<1205:AMTBAV>2.0.CO;2)
- Whiteman, C.D., Bian, X. & Zhong, S., 1997. Low-level jet climatology from enhanced rawinsonde observations at a site in the southern Great Plains. *Journal of Applied Meteorology*, 36(10): 1363-1376. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<1363:LLJCFE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<1363:LLJCFE>2.0.CO;2)
- Whiteman, C.D., Zhong, S., Shaw, W.J., Hubbe, J.M., Bian, X. & Mittelstadt, J., 2001. Cold pools in the Columbia Basin. *Weather and Forecasting*, 16(4): 432-447. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2001\)016<0432:CPITCB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2001)016<0432:CPITCB>2.0.CO;2)
- Whiteman, C.D., Pospichal, B., Eisenbach, S., Weihs, P., Clements, C.B., Steinacker, R. & Dorninger, M., 2004a. Inversion breakup in small Rocky Mountain and Alpine basins. *Journal of Applied Meteorology*, 43(8): 1069-1082. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<1069:IBSRM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<1069:IBSRM>2.0.CO;2)
- Whiteman, C.D., Haiden, T., Pospichal, B., Eisenbach, S. & Steinacker, R., 2004b. Minimum temperatures, diurnal temperature ranges, and temperature inversions in limestone sinkholes of different sizes and shapes. *Journal of Applied Meteorology*, 43(8): 1224-1236. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<1224:MTDTRA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<1224:MTDTRA>2.0.CO;2)
- Whiteman, C.D., Hoch, S.W., Hahnenberge R.M., Muschinski, A., Hohreiter, V., Behn, M. & Clements, C.B., 2008. METCRAX 2006: Meteorological experiments in arizona's meteor crater. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(11): 1665-1680. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2574.1>
- Zhengming, W., 1999. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD). Institute for Computational Earth System Science, Santa Barbara, 1999, 75 pp.