

Los daños por heladas tardías en los hayedos ibéricos: un reto emergente del cambio climático

Gabriel Sangüesa-Barreda^{1*},
Vicente Rozas¹,
Ana I. García-Cervigón²,
Ángel García-Pedrero³,
Miguel García-Hidalgo¹,
José Miguel Olano¹

¹ EifAB-iuFOR, Universidad de Valladolid,
Campus Duques de Soria, 42004 Soria.

² Área de Biodiversidad y Conservación,
Universidad Rey Juan Carlos, c/Tulipán s/n, E-28933 Móstoles.

³ Departamento de Arquitectura y Tecnologías
de Computadores, Universidad Politécnica de Madrid,
Boadilla del Monte E-28660.

El cambio climático afecta a los bosques de formas muy distintas. Algunos de estos impactos, como las defoliaciones por heladas tardías, son inesperados. El aumento de las temperaturas primaverales está adelantando la fecha de brotación de los bosques caducifolios. Pero también se está observando una mayor variabilidad intra- e interanual en las temperaturas. La conjunción de una brotación más temprana y una mayor variabilidad de las temperaturas conlleva un mayor riesgo de sufrir daños por heladas tardías. Estos eventos provocan la pérdida total de las hojas en desarrollo obligando al árbol a generar una segunda brotación a expensas de un menor crecimiento en grosor. En este artículo presentamos los últimos avances científicos en esta línea de investigación. Como marco de estudio utilizamos los hayedos ibéricos que muestran una gran vulnerabilidad a este tipo de eventos. Para finalizar, discutimos cómo estos avances pueden ayudar a predecir futuros daños en los hayedos.

Palabras clave: Cambio climático, dendroecología, heladas tardías, teledetección

LOS IMPACTOS DE LAS HELADAS TARDÍAS EN LAS ESPECIES CADUCIFOLIAS

El aumento de la temperatura media de la Tierra está adelantando la fecha de brotación de las especies caducifolias. Un ejemplo de esta tendencia es la foliación en los hayedos centroeuropeos, la cual se produce, en promedio, 2,8 días antes cada década [1]. Un efecto beneficioso

de este adelantamiento es que las especies caducifolias, como el haya, tienen estaciones de crecimiento más largas (Cleland et al., 2007) y, por lo tanto, los bosques caducifolios están experimentando un incremento en su productividad [2,3]. Sin embargo, una foliación cada vez más temprana no está exenta de riesgos. La mayor parte de las especies caducifolias de climas templado-fríos es muy sensible

a las temperaturas negativas durante el periodo de desarrollo de las hojas [4]; Sangüesa-Barreda et al., 2019). Si las heladas tardías (i.e. las últimas heladas primaverales) coinciden con el periodo de desarrollo de los nuevos brotes, pueden provocar la pérdida total de los órganos fotosintéticos (Figura 1). Esto obliga a los árboles a movilizar reservas para reconstruir las copas [5], proceso que puede durar varias semanas con la consiguiente reducción de la duración del periodo de crecimiento y el crecimiento en grosor.

Los hayedos ocupan un lugar destacado entre las formaciones caducifolias de la mitad norte de España bajo climas templados y mediterráneos de montaña. La colorida senescencia otoñal de sus hojas, así como la facilidad para caminar por su interior, hace que los hayedos sean el bosque caducifolio más icónico para el gran público. Aunque sea menos popular, la foliación primaveral de los hayedos es también un fenómeno muy espectacular (Figura 2). Es un proceso que

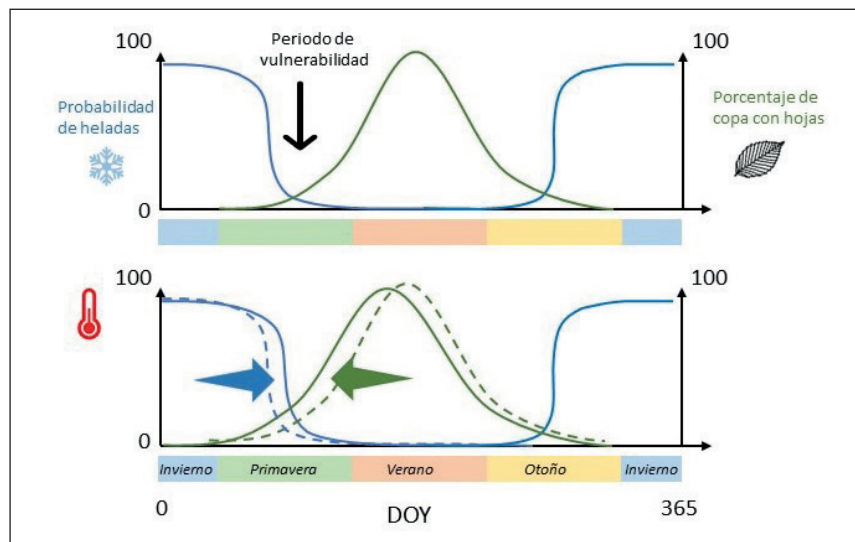


Figura 1. Cambios en la fecha de brotación de las especies caducifolias y en el periodo de vulnerabilidad frente a heladas tardías como consecuencia del cambio climático. El periodo de mayor vulnerabilidad a sufrir daños por heladas se produce en la primavera, cuando se solapan las fechas de brotación con las fechas en que se producen las últimas heladas. Un clima más cálido conlleva una mayor vulnerabilidad a las heladas, ya que se amplía el solapamiento entre el periodo de desarrollo de los nuevos brotes y las fechas en que ocurren las últimas heladas.

ocurre de un modo bastante sincrónico entre los diferentes árboles y hace que los bosques muestren un verde intenso debido al brillo de las hojas

tiernas recién brotadas que, poco a poco, según se endurecen, dan paso a un verde más oscuro. La fecha de la foliación del haya está controlada por



Figura 2. Hayedo de Fuente Dé en primavera. Fotografía: Vicente Rozas.

una combinación de factores ambientales, siendo los más importantes el fotoperíodo, las temperaturas primaverales y el frío invernal (vernalización; [6]). En hayedos de montaña con fenología más tardía donde la vernalización y el fotoperíodo están garantizados, la fecha de foliación es, por tanto, muy dependiente de las temperaturas primaverales. Este es el caso de muchos de los hayedos ibéricos, que se sitúan en zonas de montaña para minimizar el estrés hídrico estival, y donde la fecha de brotación está adelantándose con mayor rapidez.

Los hayedos son especialmente sensibles a las heladas tardías (Figura 3). Temperaturas por debajo de -3°C son suficientes para dañar las hojas en formación (Dittmar et al., 2006). En los últimos años, se han descrito numerosos episodios de daños por heladas en distintas poblaciones de haya en Europa (Bascietto et al., 2019; Vitasse y Rebetez, 2018), observándose a su vez importantes impactos en la productividad. Por ejemplo, se señalan reducciones del crecimiento tras una helada tardía de hasta el 40% con respecto a los 4 años previos [7]. Estas reducciones del crecimiento son especialmente importantes, considerando que el haya ocupa un lugar estratégico en el sector forestal de Europa y también en el norte de España, especialmente en el País Vasco y Navarra, donde sus masas se gestionan con el fin de obtener su valiosa madera. Desde el punto de vista ecológico, los hayedos son un ecosistema singular en las montañas templadas y mediterráneas ibéricas, ya que albergan a diversas especies animales y vegetales vulnerables o en peligro de extinción. Los hayedos también han sido tradicionalmente una fuente de recursos (leñas, carboneo, pastoreo) para la población local, por lo que constituyen un importante componente cultural del norte de España.

LOS DAÑOS POR HELADAS TARDÍAS SON UN EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO POCO ESTUDIADO

Los daños por heladas tardías desde un marco de cambio climático han recibido poca atención si los



Figura 3. Hojas de haya en brotación (a), y totalmente desarrolladas (b) en mayo de 2021. Hojas resultantes de una segunda brotación por los daños de una helada tardía en 2018 (c). Defoliación de los hayedos de mayor elevación en 2017 (d). Nótese que las poblaciones de menor altitud no se vieron afectadas por la helada. Todas las imágenes han sido tomadas en el Moncayo. Fotografías: María Sánchez (a y b), Gabriel Sangüesa (c), y Vicente Rozas (d).

comparamos con los efectos de las sequías. Los impactos de las sequías han concentrado gran parte del esfuerzo investigador en ecología forestal. Por ejemplo, si hacemos una búsqueda en Google Scholar con las palabras clave “drought”, “Spain” y “beech” obtenemos 13,400 resultados, mientras que si sustituimos “drought” por “late frost” obtenemos tan solo 437 resultados (búsqueda realizada el 20 de abril de 2021). El menor interés científico de los efectos de las heladas respecto a los efectos de las sequías podría deberse a que las coníferas, en las cuales se concentra la mayoría de los estudios de impactos del cambio climático, son especies perennifolias con menor riesgo de sufrir daños por heladas en su follaje. Sin embargo, ante la previsión de un aumento de su frecuencia, es esperable que en el futuro se incremente el interés, especialmente si tenemos en cuenta que el aumento de las temperaturas conlleva una notable acentuación del riesgo de defoliación por estas heladas en numerosas especies de árboles caducifolios.

Un aumento de la frecuencia de heladas tardías no parece la consecuencia más previsible de un mundo cada vez más cálido. Sin embargo, los modelos climáticos no solo apuntan a un incremento sostenido de las temperaturas medias, sino también

a una mayor variabilidad intra- e interanual de las temperaturas [8]. El calentamiento y la intensificación de las temperaturas extremas es algo que ya estamos observando, tanto por anomalías positivas (olas de calor asociadas a sequías extremas), como negativas (olas de frío). De esta forma, en general, existe una mayor frecuencia de heladas tardías y una foliación más temprana, aunque esta última avanza a un ritmo mucho más acelerado, permitiendo anticipar un escenario en el que los daños podrían ser más frecuentes.

Por otro lado, la naturaleza episódica de las heladas tardías y la ausencia de registros históricos fiables de defoliaciones por heladas hace que desconozcamos aspectos tan básicos como su período de recurrencia o la extensión geográfica de los daños. No disponemos de información tan primordial como en qué años y dónde han ocurrido estos eventos para poder realizar una evaluación fiable de la magnitud real de los daños por heladas, a pesar de que esta es una información clave que nos permitiría saber si realmente está cambiando su incidencia o si se trata de la consecuencia de un creciente interés por este fenómeno. Resulta, además, de especial interés evaluar la recurrencia y extensión de los daños por heladas ya que, simultáneamente

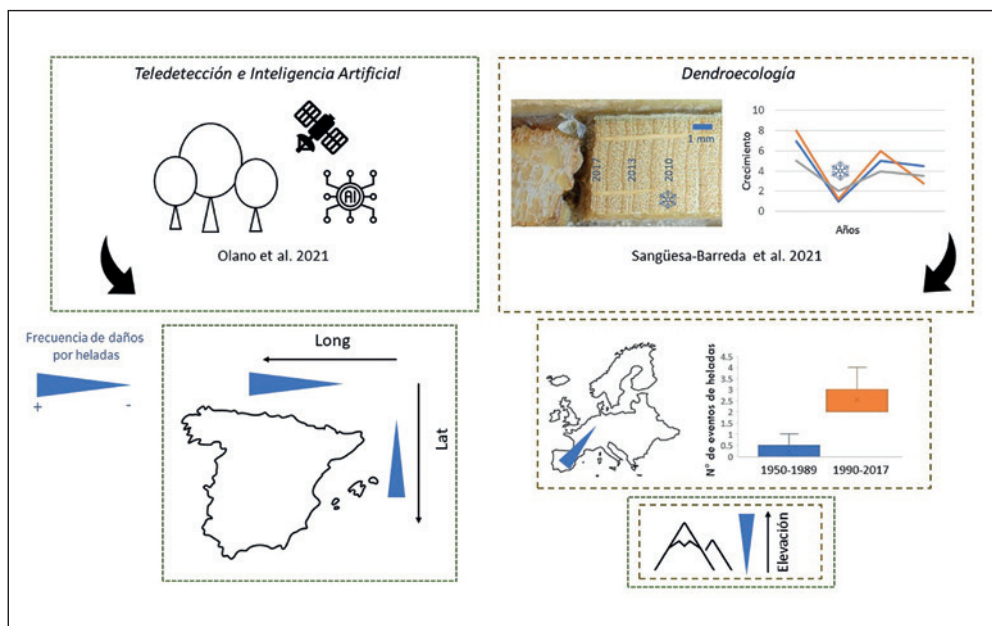


Figura 4. Infografía de los principales resultados de Olano et al. (2021) y Sangüesa-Barreda et al. (2021). Olano et al. (2021) utilizó series de datos de teledetección y técnicas de inteligencia artificial para reconstruir la incidencia de las heladas tardías en la Península Ibérica desde 2003 al 2018. Los resultados de este trabajo mostraron una mayor incidencia en los hayedos de mayor elevación y situados en el extremo occidental y más al sur. Por otro lado, Sangüesa-Barreda et al. (2021) utilizó datos climáticos e información de los anillos de crecimiento (dendroecología) para reconstruir la incidencia de las heladas desde 1950 en toda el área sur de distribución de la especie. Los resultados mostraron una mayor incidencia desde 1990, y una mayor frecuencia de daños por heladas en las poblaciones más al sur y de mayor elevación.

a su incidencia sobre los hayedos, se producen importantes daños en especies cultivadas de gran interés económico, como es el caso de los viñedos y las plantaciones de árboles frutales. Por ello, el primer aspecto de nuestra investigación fue tratar de reconstruir la frecuencia y extensión de las afecciones de daños por heladas tardías. Con este fin, utilizamos dos herramientas que permiten reconstruir estos fenómenos en el pasado: la teledetección y la dendrocronología.

La defoliación de un bosque por una helada tardía implica una reducción brusca de la actividad fotosintética durante la primavera, que puede apreciarse en las imágenes satelitales. Así, diferentes autores han reconstruido la incidencia de diferentes eventos de helada tardía utilizando teledetección. Bascietto et al. (2019) reconstruyeron la incidencia de las defoliaciones de la helada tardía que en 2016 afectó a toda Italia; otros autores [9] evaluaron con valores diarios de NDVI (un índice espectral que mide la productividad primaria) los efectos de la helada de 2017 en un bosque mixto de haya y roble en el Sistema Central. Buscando una perspectiva espacial y temporal más amplia, nuestro grupo ha tratado de comprender cómo han afectado las heladas tardías a los hayedos en la Península Ibérica durante las últimas décadas, reconstruyendo los daños infligidos por éstas a los hayedos

ibéricos desde 2003 a 2018 utilizando los registros de actividad fotosintética proporcionados por los satélites MODIS (Olano et al., 2021). Aunque la identificación de heladas tardías a partir de registros de actividad fotosintética pueda parecer sencilla, realmente su implementación en hayedos resulta compleja. El efecto de la pérdida brusca del aparato fotosintético asociada a las heladas deja una señal muy nítida en el registro de imágenes de satélite. Sin embargo, gran parte

de los hayedos peninsulares se refugian en lugares montañosos donde las abundantes nieblas y las precipitaciones orográficas amortiguan la sequía propia del clima mediterráneo. El carácter neblinoso de estos bosques impide el paso de la luz y, por tanto, limita enormemente la observación a los satélites basados en la radiación reflejada, los que se denominan sensores pasivos. Para resolver el problema derivado de la ausencia de observaciones durante los momentos





Valentín Maguñiza

críticos de la primavera, utilizamos técnicas de inteligencia artificial que nos permitieron descubrir patrones diferenciales de radiación reflejada en aquellos hayedos que habían sufrido daños por heladas tardías. Nuestra investigación nos ha permitido conocer que la mayoría de los daños por heladas tardías se concentran en unos pocos años, 2008, 2010, 2013, 2017 y 2018, y que los hayedos más occidentales, con una menor pluviometría y ubicados a mayor altitud son los más vulnerables a las heladas tardías de toda la Península Ibérica.

La tecnología satelital es de uso relativamente reciente y, aunque existen programas espaciales que permiten ir al pasado más allá de las misiones MODIS, no consiguen tener una perspectiva temporal amplia. Para superar esta barrera, empleamos la segunda de las técnicas, la dendrocronología, o en su sentido más específico, la dendroecología, que permite evaluar retrospectivamente la variación temporal de procesos ecológicos mediante el estudio de los anillos anuales de crecimiento de los árboles [10]. Las defoliaciones por heladas tardías y el posterior redirec-

cionamiento de las reservas hacia la producción de una segunda brotación impiden invertir estos recursos en la producción de madera, con lo que se aprecia una reducción de la anchura de los anillos de crecimiento de los árboles en el año en concreto en que se produjo la helada. Esto queda registrado en la madera y posibilita la identificación de estos eventos mientras la madera permanezca inalterada. Sin embargo, existen otros factores climáticos y bióticos que también ocasionan reducciones en el crecimiento, como pueden ser los insectos defoladores. Por lo tanto, es necesario encontrar pautas que permitan discriminar entre las diferentes causas que generan anillos estrechos. En periodos con registros instrumentales es posible discernir los daños por heladas frente a otros factores, ya que es posible relacionar las defoliaciones con primaveras inusualmente cálidas, que conllevan un adelanto de la brotación, unido a heladas importantes a finales de abril o mayo (Vitasse et al., 2018; Sangüesa-Barreda et al., 2021). La reconstrucción retrospectiva de los daños por heladas durante los periodos preinstrumentales es más

compleja y constituye un reto para futuras investigaciones.

El análisis de los anillos de crecimiento de las hayas, nos ha permitido identificar los eventos de daños por heladas en toda la distribución de esta especie en el sur de Europa desde 1950. Nuestros resultados, mostrados en Sangüesa-Barreda et al. (2021), indicaron una mayor frecuencia de daños por heladas en los hayedos más cercanos a su límite sur de distribución, así como un aumento de la frecuencia a partir de 1990, que está directamente relacionada con un incremento de las temperaturas primaverales. Después de 1990, las defoliaciones por heladas se produjeron cada 14-15 años, mientras que antes de 1990, las defoliaciones ocurrían de media cada 33 años. En algunas zonas particulares, como en el Moncayo, el aumento de la frecuencia de los daños por heladas fue todavía mayor, ya que encontramos árboles afectados por hasta 3 eventos (2010, 2013 y 2017) durante los últimos 8 años. Además, los daños no solo son más frecuentes, sino que también están afectando a extensiones geográficas cada vez más amplias (Sangüesa-Barreda et al., 2021). Por ejemplo, los últimos eventos de defoliaciones por heladas acaecidos en 2010, 2013 y 2017 fueron identificados en gran parte de las poblaciones ibéricas de haya. Usando la información de los anillos de crecimiento, otros estudios han podido constatar que la capacidad de resiliencia de los hayedos frente a las heladas es muy alta. Así, tan solo uno o dos años después del evento de helada, las tasas de crecimiento son similares a las observadas previamente a la defoliación [11]. Este resultado nos indica una alta capacidad de adaptación de los hayedos frente a esta perturbación, aunque en esta investigación no se contempla el posible efecto acumulado de varios eventos de defoliación primaveral en una corta ventana de tiempo. El efecto combinado del estrés por sequía y las defoliaciones por heladas en una misma estación de crecimiento también ha sido muy poco estudiado [12], constituyendo una línea de investigación que podrá desarrollarse en el futuro.

¿CÓMO SERÁ EL FUTURO DE LOS HAYEDOS IBÉRICOS?

Tanto la teledetección como la dendroecología indican una clara aceleración de las defoliaciones por heladas tardías que va en línea con las tendencias marcadas por el cambio climático. Los daños por heladas se concentran en los hayedos del sur de Europa, de mayor elevación y menor pluviometría, en los que la mayor altitud con respecto a las poblaciones del centro de Europa hace que sean más vulnerables. Algunos autores sugieren que se podría producir una migración en altitud de las poblaciones de haya ibéricas para minimizar el estrés por sequía relacionado con el cambio climático [13]. Sin embargo, esta estrategia podría no ser efectiva, ya que la mayor frecuencia de daños por heladas puede limitar la capacidad de los hayedos para adaptarse y hacer frente al estrés hídrico, cada vez mayor como consecuencia del calentamiento global.

Pero, ¿podemos hacer algo desde la gestión forestal para minimizar los daños por heladas tardías en los hayedos? Como ocurre con todos los cambios ambientales importantes a nivel global, la gestión adaptativa no es sencilla, ni existen recetas generales que solucionen todos los problemas. La gestión futura de los hayedos debería abordar los retos derivados del cambio climático, concretamente procurando amortiguar el conocido impacto de las sequías, que puede modularse disminuyendo la densidad de las masas y, por lo tanto, la competencia intraespecífica. Sin embargo, la gestión que haga frente a los daños producidos por las heladas tardías se antoja muy complicada o imposible. Entonces, ¿cómo afectarán las heladas a los hayedos en el futuro? El haya mantiene un importante carácter competitivo frente a otras especies coexistentes (p.e. *Pinus* spp., *Taxus baccata*, *Quercus* spp., *Tilia* spp., *Acer* spp.). Los efectos negativos causados por estas defoliaciones, por muy frecuentes que sean, no deberían constituir un problema que llegue a disminuir gravemente la resiliencia de los hayedos. Como hemos visto, su capacidad de resiliencia manifestada en el crecimiento es alta, aunque otros procesos eco-

lógicos clave también podrían verse afectados. Entre ellos, la producción de frutos disminuye en los años con defoliación por heladas [5], lo que conlleva efectos negativos en cascada sobre la fauna propia de estos ecosistemas que dependen de la cosecha de hayucos, además de repercutir en el establecimiento de nuevas hayas y, por tanto, en la capacidad de regeneración de los bosques. En el peor de los escenarios, los hayedos más afectados podrían pasar a ser bosques mixtos. En este sentido, se encontró una ventaja competitiva del roble albar (*Quercus petraea*) frente al haya tras la helada de 2017 [9]. De forma coincidente, pero en un hayedo del sur de Italia [14], se detectó un aumento de la regeneración de *Pinus heldreichii* probablemente en relación con los últimos eventos de heladas que causaron defoliaciones en las hayas. La mayor incidencia de las heladas en los hayedos situados a mayor altitud también podría implicar cambios en la composición y dinámica de los bosques de montaña, y por lo tanto en su flora y fauna asociadas.

La concentración de eventos de heladas en las poblaciones de mayor altitud y a lo largo del rango más seco de distribución de la haya puede representar una seria limitación para su posible migración altitudinal en respuesta al cambio climático. La reconstrucción y monitorización de los daños es clave para mejorar nuestra comprensión de este fenómeno tanto a escala local como regional. En este sentido, la combinación de la información de los anillos de crecimiento con las nuevas tecnologías, como la teledetección o las técnicas de inteligencia artificial, proporcionan un buen tándem para llevar a cabo esta tarea.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en las actividades de difusión de los proyectos spRING (CGL2017- 87309-P; Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España) y SEÑALES (VA026P17; Junta de Castilla y León, UE-FEDER). La actividad investigadora de Gabriel Sangüesa-Barreda ha sido financiada por dos contratos postdoctorales Juan de la Cierva del Ministerio de Economía, Industria y

Competitividad (FJCI 2016-30121 y IJC2019-040571-I; fondos FEDER). Agradecemos la colaboración de todos los técnicos y agentes medioambientales de Aragón, Castilla y León, La Rioja y Navarra, que nos han ayudado en la consecución de los permisos necesarios para la realización de los muestreos y en la localización de las zonas de estudio.

REFERENCIAS

Se incluyen las referencias clave destacadas por los autores; el resto, indicadas con números en el texto, están disponibles como documentación adicional en la página web de la revista.

- Bascietto M, Bajocco S, Ferrara C et al. 2019. Estimating late spring frost-induced growth anomalies in European beech forests in Italy. *Int. J. Biometeorol.* 63: 1039–1049.
- Cleland EE, Chuine I, Menzel A et al. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol. Evol.* 22: 357–365.
- Dittmar C, Fricke W, Elling W. 2006. Impact of late frost events on radial growth of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Germany. *Eur. J. Forest Res.* 125: 249–259.
- Gu L, Hanson PJ, Post WM et al. 2008. The 2007 Eastern US spring freeze: increased cold damage in a warming world? *Bioscience* 58: 253–262.
- Olano JM, García-Cervigón AI, Sangüesa-Barreda G et al. 2021. Satellite data and machine learning reveal the incidence of late frost defoliations on Iberian beech forests. *Ecol. Appl.* 31: e02288.
- Sangüesa-Barreda G, Filippo A, Piovesan G et al. 2021. Warmer springs have increased the frequency and extension of late-frost defoliations in southern European beech forests. *Sci. Total Environ.* 775: 145860.
- Sangüesa-Barreda G, Villalba R, Rozas V et al. 2019. Detecting *Nothofagus pumilio* growth reductions induced by past spring frosts at the northern Patagonian Andes. *Frontiers Plant Sci.* 10: 1–15.
- Vitasse Y, Rebetez M. 2018. Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017. *Climate Change* 149: 233–246.
- Vitasse Y, Schneider L, Rixen C et al. 2018. Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agric. For. Meteorol.* 248: 60–69.