



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

9CFE-1606

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza



Thaumetopoea pityocampa

SUÁREZ HERRERA, S. (1,2), CAÑELLAS, I. (1), ADAME, P. (1), ALBERDI, I. (1), FERNÁNDEZ MARINAS, A. (2), y MORENO FERNÁNDEZ, D. (1)

(1) Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR-INIA), CSIC. Carretera de la Coruña km 7.5. Madrid 28040.

(2) ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). C. de José Antonio Nováis, 10, Madrid 28040.

Resumen

Diversas evidencias científicas corroboran que el cambio climático está afectando al estado de salud de los bosques a nivel global debido al aumento de la intensidad y frecuencia de daños abióticos y bióticos. Entre los agentes causantes de daños bióticos en sistemas forestales destacan los insectos perforadores y defoliadores. Dentro de este último grupo, la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*) es una de las principales plagas en las masas de pinares peninsulares.

El objetivo del estudio es examinar la dinámica de la afección provocada por la procesionaria del pino en las parcelas pertenecientes a las diferentes redes de evaluación de daños españolas (ICP-Forests, Comunidades Autónomas, y Parques Nacionales) e identificar los principales factores asociados a la presencia y dispersión en las masas de pinares peninsulares.

Se incluyeron en el estudio un total de 1.647 parcelas con presencia de spp. Identificándose la procesionaria en 902 de éstas en algún momento del periodo de estudio (2002-2022). Los resultados muestran que el grado de afección de la procesionaria aumentó en los periodos 2002-2009 y 2015-2018 y disminuyó en 2010-2014 y 2019-2020.

Palabras clave

Plagas forestales, procesionaria, defoliación, redes de daños, pinares, cambio climático.

1. Introducción

Una de las principales plagas que afectan a los sistemas forestales mediterráneos es la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.)) (BATTISTI et al., 2006; BUFFO et al., 2007). Los daños que provoca en los bosques están asociados a la alimentación larvaria, ya que las orugas se alimentan de acículas de coníferas, principalmente pinos. Muestran una especial preferencia por *Pinus nigra* Arn., *Pinus sylvestris* L. y *Pinus halepensis* Mill. (HÓDAR et al., 2012). La hembra realiza la puesta uniendo dos acículas y cubriéndolas con escamas. En los primeros estadios, la oruga roen las acículas, que se secan adoptando un aspecto característico en forma de fagonazo (JACQUET et al., 2012). Se trata de una especie gregaria: las orugas comienzan formando un tenue refugio de seda cerca de la puesta, que va creciendo

progresivamente hasta convertirse en el característico bolsón. A partir del tercer estadio larvario adquieren su aspecto definitivo y desarrollan pelos urticantes. En este estadio, crean un bolsón más compacto, que utilizan como refugio diurno durante el invierno, saliendo de él durante la noche para alimentarse (HÓDAR et al., 2003). Al final de su desarrollo, las orugas pueden alcanzar hasta 4 cm de longitud. En los primeros estadios de desarrollo, las defoliaciones suelen ser moderadas, pero a medida que las larvas se desarrollan pueden llegar a consumir totalmente las acículas, produciendo defoliaciones severas o incluso totales cuando las poblaciones son elevadas. Una vez completado el desarrollo larvario, las orugas descienden del árbol en procesión para enterrarse en el suelo, donde pasan la fase de pupa o crisálida, pudiendo permanecer en diapausa entre uno y cuatro años. Los adultos emergen en verano manteniendo su actividad de noche. En esta fase del ciclo, tras el apareamiento, la hembra realiza la puesta, y los huevos eclosionan entre septiembre y octubre, reiniciándose así el ciclo biológico (MUÑOZ LOPEZ et al., 2011).

Las masas naturales de pinos soportan cíclicamente ataques del insecto. No obstante, desde su inicio hasta la generalización pueden transcurrir una serie de años en los que se identifican los siguientes niveles de daño durante el proceso de infestación (MYERS, 1993): Nivel 0 (ausencia de orugas o colonias muy diseminadas); nivel 1 (algunas colonias en bordes de masa, claros y pies aislados); nivel 2 (bastantes colonias en bordes de masa y claros, además de algunas por el centro de la masa); nivel 3 (defoliaciones parciales en bordes y pies aislados, y bastantes colonias por el centro); nivel 4 (defoliaciones muy fuertes en bordes y pies aislados y parciales en el resto de la masa); nivel 5 (defoliaciones muy fuertes en toda la masa).

Este proceso no es siempre continuo, pudiendo detenerse en cualquier momento por condiciones climáticas desfavorables. La evaluación de los índices o niveles de infestación debe hacerse en la fase de enterramiento, esto suele ocurrir dependiendo de las zonas entre finales de enero y mediados de marzo.

En el contexto del cambio global, la tendencia hacia condiciones climáticas más cálidas podría favorecer la expansión por procesionaria ampliando su área de distribución. Esto se debe a que esta especie es especialmente sensible a las bajas temperaturas invernales (HÓDAR et al., 2003; ROBINET et al., 2007). De hecho, HUCHON & DEMOLIN (1970) señalan que las orugas no sobreviven cuando el promedio de las temperaturas mínimas de enero descienden de -4°C . Por lo tanto, las bajas temperaturas invernales limitan severamente el desarrollo y la supervivencia de estos insectos, restringiendo así el tamaño de sus poblaciones (HARRINGTON et al., 2001). No obstante, la colonización de nuevas áreas está condicionada en buena medida por la capacidad de dispersión de las hembras. En este sentido, SEIXAS ARNALDO *et al.* (2011) demostraron que el aumento de emergencia de adultos se relaciona con temperaturas máximas superiores a 30°C , temperatura media por encima de los 23°C y temperatura mínima por encima de 17°C . Finalmente, HODAR (2012) encontraron una relación positiva entre la intensidad de la defoliación causada por la procesionaria y la Oscilación del Atlántico Norte.

Sin embargo, para comprender plenamente los cambios actuales y potenciales de la dinámica de esta plaga, es necesario disponer de más información a largo plazo sobre los patrones de brotes y su relación con los factores ambientales (AZCÁRATE et al., 2023;

GAZOL et al., 2019; HÓDAR et al., 2012).

2. Objetivos

El objetivo general del trabajo es evaluar la presencia de la procesionaria del pino en los principales hospedadores en España, acotando el estudio al ámbito peninsular. En particular se analizará i) la tendencia de la presencia de la procesionaria en los hospedadores citados en el periodo comprendido entre 2002 y 2022 y ii) la relación de la presencia del patógeno con las variables climáticas estacionales de temperatura.

3. Metodología

Para este estudio se han utilizado los datos presentes en la red armonizada (más información de la armonización puede encontrarse en Adame et al. 2022) que integran las tres redes de daños presentes en España en el periodo 2002 y 2022 (Red ICP-Forests, Red Autonómica y Red de Parques Nacionales; Tabla 1) para el agente *T. pityocampa* (en adelante procesionaria del pino). La red de ICP-Forests está formada por 620 puntos de muestreo instalados en nodos de una malla de 16 x 16 km en los que se han evaluado 14.880 pies; la Red Autonómica contempla 2.503 puntos de muestreo en una malla de 8 x 8 km o de 4 x 4 km, dependiendo de la Comunidad Autónoma, y 62.575 pies; y la Red de Parques Nacionales cuenta con 234 puntos de muestreo en una malla de 4 x 4 km y 6.076 pies. Esto da lugar a una red armonizada de 3.357 puntos de muestreo y 83.531 pies. En la figura 1 se ha representado la localización de los puntos de muestreo de las tres redes de seguimiento de daños en los bosques con presencia de hospedadores y afectadas por la procesionaria del pino.

Cabe señalar que las Comunidades Autónomas que disponen de red de daños autonómica son Andalucía, Aragón, Islas Baleares, Islas Canarias, Castilla La Mancha, Castilla y León, Cataluña, Extremadura, Galicia, Comunidad de Madrid y Comunidad Foral de Navarra.

Tabla 1. Parcelas con presencia de hospedadores y parcelas afectadas por procesionaria del pino en el periodo 2002-2022

Clasificación	Número de parcelas		
	Red	Con presencia de hospedadores	Afectadas por procesionaria del pino
	ICP-Forest	310	186
	Autonómica	1.229	636
	Parques Nacionales	108	80
Región bioclimática			
	Alpina	88	43
	Atlántica	183	29
	Mediterránea	1.376	830
Especie hospedante			
	<i>P. sylvestris</i>	555	252
	<i>P. nigra</i>	431	280
	<i>P. pinea</i>	239	156
	<i>P. halepensis</i>	504	185
	<i>P. pinaster</i>	513	218

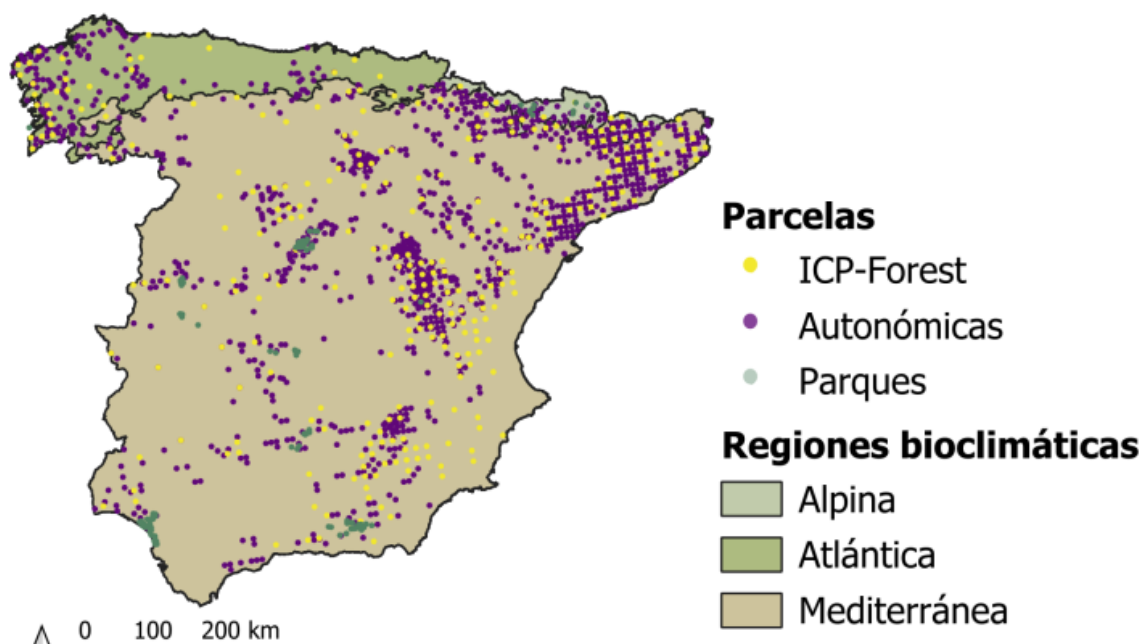


Figura 1. Distribución de parcelas con presencia de hospedadores en cada red de daños en el periodo 2002-2022

Para la realización de este estudio se ha considerado: la distribución de estas parcelas por regiones bioclimáticas (alpina, atlántica y mediterránea) y la especie hospedante (*Pinus sylvestris* L., Ait., *Pinus nigra* Arn., *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus pinea* L.).

Para evaluar el grado de afección (GA) se estimó la proporción de número de pies

afectados (NA) frente al total de los cinco principales hospedadores considerados en el estudio (NH), a nivel de parcela, expresada en porcentaje: $GA (\%) = NA / NH$.

Además, se evaluó el grado de afección de cada hospedante de forma independiente, con el mismo procedimiento, pero solo teniendo en cuenta los potenciales hospedadores y los afectados para cada especie.

Se analizó el efecto de los siguientes factores: región bioclimática y especie hospedadora en el grado de afección y su evolución en el tiempo. Otra variable de interés es la ocurrencia de afección, que se calcula como la proporción de parcelas afectadas frente al total con presencia de los cinco principales hospedadores, expresada en porcentaje.

Finalmente, con el objetivo de analizar la relación entre la presencia de la procesionaria del pino y las variables climáticas, se ha calculado el coeficiente de correlación biserial. Este coeficiente es adecuado cuando se desea conocer la correlación entre una variable dicotómica o binaria (por ejemplo, presencia y ausencia en formato de 1 y 0), en nuestro caso la presencia o ausencia del insecto, y una variable continua, en nuestro caso las variables climáticas estacionales. De forma análoga al coeficiente de Pearson, sus valores varía entre -1 y 1: valores cercanos a 1 indican una relación positiva y fuerte entre las dos variables; valores cercanos a -1 indican una relación negativa y fuerte; mientras que valores en torno a 0 sugieren una ausencia de correlación estadística sólida. Además, se ha calculado el p-valor asociado a cada correlación para evaluar si las relaciones son significativas o no.

Las variables climáticas de temperatura empleadas han sido obtenidas de CHELSA v2.1 (KARGER et al., 2020). Para las temperaturas correspondientes a la estación de otoño se tiene como referencia las del año anterior al que se evalúa. Se ha decidido así debido a que es en los meses de verano cuando se realiza la toma de datos en campo en los puntos de muestreo, y en ese momento se estarían evaluando los efectos producidos por esa estación correspondientes al año previo.

4. Resultados

Los resultados evidencian un posible patrón cíclico en la infección, por procesionaria del pino. El grado de afección aumentó notablemente en los periodos 2002-2009 y 2015-2018, mientras que se observó una disminución en los intervalos 2010-2014 y 2019-2020. La media del grado de afección (GA) se sitúa en un 31,4%, con una tendencia ligeramente ascendente en la que pueden distinguirse varios ciclos de aumento de afección. Por su parte, la media de la ocurrencia alcanza el 19,8%, mostrando una tendencia ascendente más marcada a lo largo del periodo analizado. (Figura 2 y Figura 3).

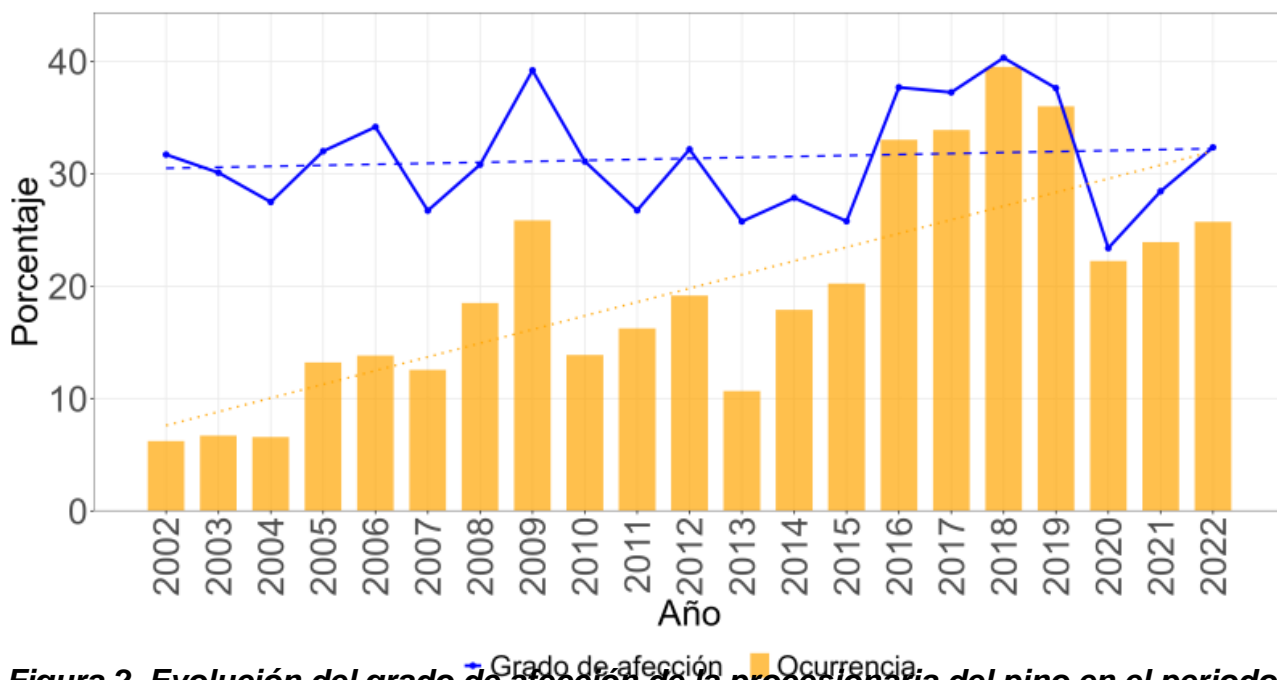


Figura 2. Evolución del grado de afección de la procesionaria del pino en el periodo 2002-2022 y su ocurrencia

Al analizar los efectos por región bioclimática, los resultados muestran que la región mediterránea presenta el mayor grado de afección, con un valor medio de 31,4%, un valor mínimo de 24,2% en 2020 y un valor máximo de 41,4% en 2018. En la región alpina, la media se sitúa en el 17,5%, registrándose valores nulos en los primeros años de estudio y en 2014, y alcanza un valor máximo de 37,5% en 2008. En la región atlántica, el grado medio de afección es del 15,6% aunque con una ocurrencia notablemente baja, del 3,8%. En relación con la ocurrencia, la región mediterránea vuelve a sdestacar con los valores más altos, con una media de 22,1% y un pico máximo en2018, con un 43% . En la región alpina, la media de ocurrencia es del 10,4% , alcanzando su valor máximo en 2017 con un 40,8%.

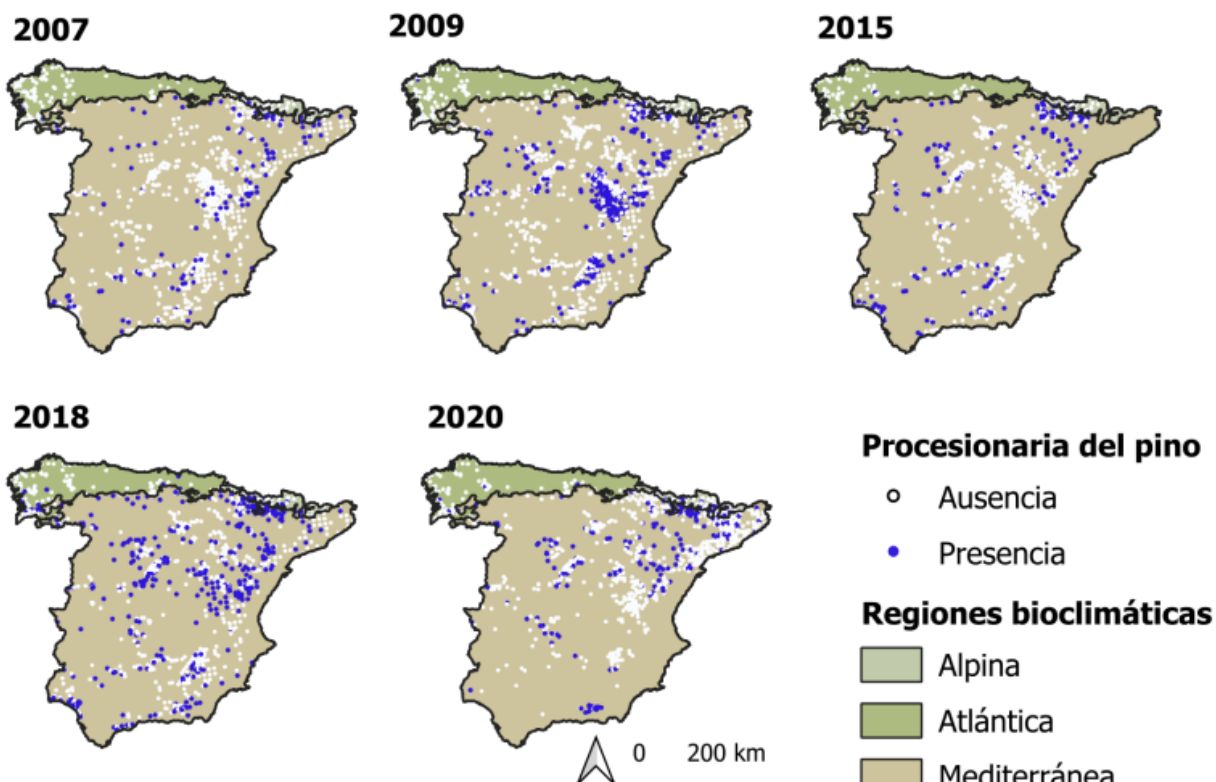


Figura 3. Distribución de parcelas con presencia de hospedadores y afectados por la procesionaria del pino en el periodo 2002-2022

La evaluación interanual en cada especie hospedadora revela que *P. nigra* es la especie más afectada, con una media del 15,4%. Presenta incrementos notables entre 2003 y 2009, alcanzando su valor máximo en 2018 (42,8%), seguido de un descenso hasta el 10% en 2020. *P. pinea* ocupa el segundo lugar en cuanto al grado medio de afección, con un 11,5%, y muestra una tendencia creciente a lo largo del periodo analizado hasta alcanzar los valores más altos en 2016 (24,6%), 2017 (21%) y 2018 (25,1%). El resto de especies, *P. halepensis*, *P. pinaster* y *P. sylvestris* presentan medias de grado de afección más bajas: 4,1%, 3,7% y 2,9% respectivamente (Figura 4). Sin embargo, al analizar la ocurrencia media de afección por especie, el orden de importancia varía. *P. nigra* y ambos con un 65%, seguidos por *P. sylvestris* (45%), *P. pinaster* (42%) y *P. halepensis* (37%).

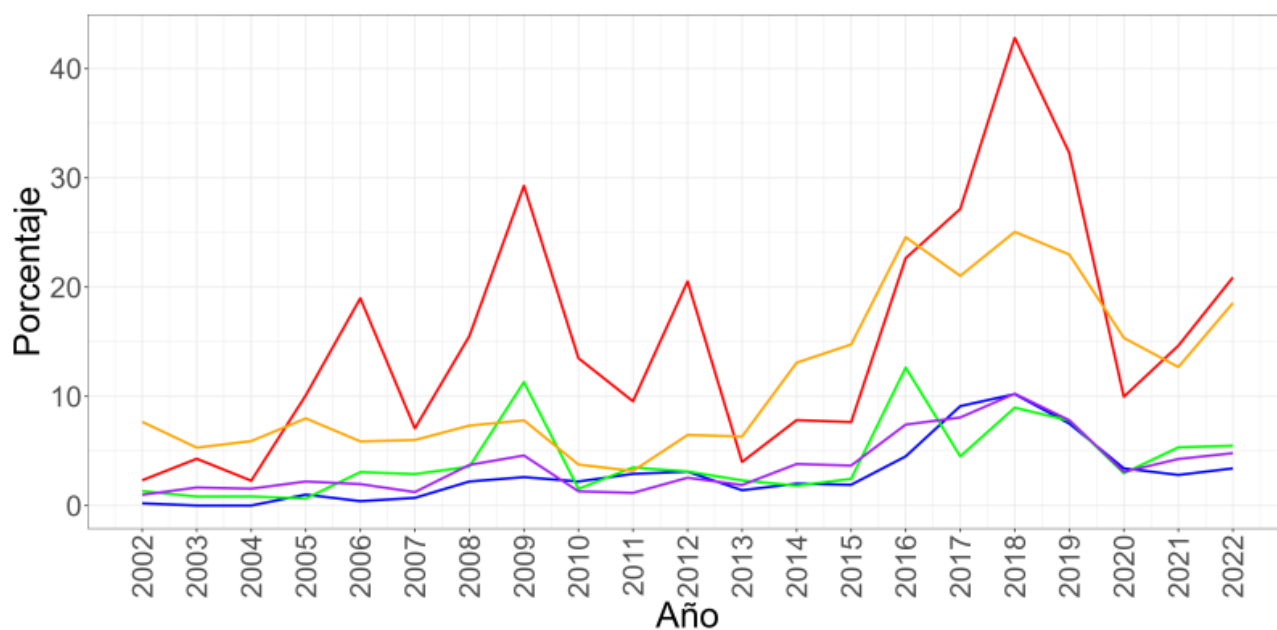


Figura 4. Evolución del grado de afección de la procesionaria del pino 2002-2022 sobre los principales hospedadores de masas españolas de pinares

Por último, el análisis de correlación con las variables climáticas estacionales de temperatura ha resultado significativo para todas ellas. Se ha obtenido un coeficiente positivo de 0,0276 para la temperatura de invierno (p-valor = 0,0002), un coeficiente positivo de 0,0843 para la temperatura de primavera (p-valor < 0,0001), un coeficiente positivo de 0,1302 para la temperatura de verano (p-valor < 0,0001) y coeficiente positivo de 0,0654 para la temperatura de otoño (p-valor < 0,0001).

5. Discusión

La evaluación del grado de afección de la procesionaria del pino, basado en la información disponible en las redes de daños, muestra que *P. nigra* es el hospedante que contribuye en mayor medida a los daños causados por esta plaga en las masas de pinares de la península ibérica. Se observa evidencia de la existencia de picos cíclicos de infección, los cuáles cada vez alcanzan valores más altos.

Tal como se esperaba, se ha encontrado un efecto positivo y significativo de la temperatura de invierno con la presencia de la procesionaria. Las bajas temperaturas de invernales actúan como un limitante para el desarrollo de las orugas (HÓDAR et al., 2003; ROBINET et al., 2007). No obstante, se ha encontrado que otra variable como la temperatura de verano presenta un coeficiente de correlación mayor con la presencia de este insecto. En línea con estos resultados, TAMBURINI et al. (2013) no encontraron una evidencia sólida de que las bajas temperaturas de invierno tuvieran un efecto negativo en las tasas de crecimiento de la procesionaria, mientras que la temperatura de verano sí mostró una influencia significativa en su dinámica. Sin embargo, esta relación no se mantuvo constante en todas las zonas de estudio, ya que dependía de la región; en áreas con temperaturas más elevadas, la relación no fue significativa, indicando la existencia de un umbral máximo de temperatura para el desarrollo óptimo de la especie. SEIXAS ARNALDO et al. (2011) señalan que, en un estudio realizado en Portugal, el aumento de las temperaturas (máximas superiores a 30°C, medias por encima de los 23°C y mínimas

por encima de los 17°C en los meses de verano) puede alargar el periodo de vuelo de los adultos y aumentar su actividad. En la misma línea, BATTISTI *et al.* (2006) observaron que, en zonas de alta montaña, temperaturas extraordinariamente altas en los meses de verano están asociadas con una mayor dispersión de las hembras adultas. Por lo tanto, el hecho de que la dispersión de la especie dependa en gran medida de la capacidad de supervivencia de los individuos explica que la relación de la presencia de la procesionaria sea más fuerte con la temperatura de verano que la de invierno. Sin embargo, temperaturas extremadamente altas durante el verano puede aumentar la mortalidad de los individuos de esta especie (ROBINET *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2011) y reducir sus poblaciones localmente (BATTISTI *et al.*, 2015). De hecho, el aumento de las temperaturas de verano está relacionado con la desaparición de la procesionaria en el norte de África (BOUROUGAAOUI *et al.*, 2021).

6. Conclusiones

La procesionaria del pino presenta un patrón cíclico de infestación, con periodos de mayor intensidad asociados a condiciones climáticas favorables, especialmente en la región mediterránea. La correlación positiva entre la temperatura estacional y la infestación refuerza la influencia del cambio climático en la expansión y severidad de la plaga. Bajo escenarios de cambio global, es fundamental implementar estrategias de gestión adaptativa que consideren tanto las características específicas de los hospedadores como los cambios proyectados en las variables climáticas.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto MITECO2023-AF: “Fundamentos Científicos de la Información Forestal Basados en Inventario Forestal Nacional”. Agradecemos la disponibilidad de los datos de la Red ICP de Nivel I a ICP-Forest, al Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico, al Organismo Autónomo de Parques Nacionales y a las Comunidades Autónomas (Andalucía, Aragón, Cantabria, Castilla-La Mancha, Castilla y León, Cataluña, Comunidad Foral de Navarra, Comunidad de Madrid, Extremadura, Galicia e Islas Baleares).

8. Bibliografía

AZCÁRATE, F. M.; SEOANE, J.; SILVESTRE, M.; 2023. Factors affecting pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) incidence in Mediterranean pine stands: A multiscale approach. *Forest Ecology and Management*, 529, 120728. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120728>

BATTISTI, A.; AVCI, M.; AVTZIS, D. N.; JAMAA, M. L. Ben; BERARDI, L.; BERRETIMA, W.; BRANCO, M.; CHAKALI, G.; EL ALAOUI EL FELS, M. A.; FRÉROT, B.; HÓDAR, J. A.; IONESCU-M?L?NCU?, I.; ?PEKDAL, K.; LARSSON, S.; MANOLE, T.; MENDEL, Z.; MEURISSE, N.; MIRCHEV, P.; NEMER, N.; ... ZAMOUM, M.; 2015. Natural History of the Processionary Moths (*Thaumetopoea* spp.): New Insights in Relation to Climate Change. In A. Roques (Ed.), *Processionary Moths and Climate Change : An Update* (pp. 15–79). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9340-7_2

- BATTISTI, A.; STASTNY, M.; BUFFO, E.; LARSSON, S.; 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12(4), 662–671. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01124.x>
- BOUROUGAAOUI, A.; BEN JAMÂA, M. L.; ROBINET, C.; 2021. Has North Africa turned too warm for a Mediterranean forest pest because of climate change? *Climatic Change*, 165(3), 46. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03077-1>
- BUFFO, E.; BATTISTI, A.; STASTNY, M.; LARSSON, S.; 2007. Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agricultural and Forest Entomology*, 9(1), 65–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2006.00321.x>
- GAZOL, A.; HERNÁNDEZ-ALONSO, R.; CAMARERO, J. J.; 2019. Patterns and Drivers of Pine Processionary Moth Defoliation in Mediterranean Mountain Forests. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00458>
- HARRINGTON, R.; FLEMING, R. A.; WOIWOD, I. P.; 2001. Climate change impacts on insect management and conservation in temperate regions: can they be predicted? *Agricultural and Forest Entomology*, 3(4), 233–240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1461-9555.2001.00120.x>
- HÓDAR, J. A.; CASTRO, J.; ZAMORA, R.; 2003. Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming. *Biological Conservation*, 110(1), 123–129. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00183-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00183-0)
- HÓDAR, J. A.; ZAMORA, R.; CAYUELA, L.; 2012. Climate change and the incidence of a forest pest in Mediterranean ecosystems: can the North Atlantic Oscillation be used as a predictor? *Climatic Change*, 113(3), 699–711. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0371-7>
- HUCHON, H.; DEMOLIN, G.; 1970. La bioécologie de la Processionnaire du pin : dispersion potentielle, dispersion actuelle. 22(Spécial), 220–234. <https://doi.org/10.4267/2042/20421i>
- JACQUET, J.-S.; ORAZIO, C.; JACTEL, H.; 2012. Defoliation by processionary moth significantly reduces tree growth: a quantitative review. *Annals of Forest Science*, 69(8), 857–866. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0209-0>
- KARGER, D. N.; SCHMATZ, D. R.; DETTLING, G.; ZIMMERMANN, N. E.; 2020. High-resolution monthly precipitation and temperature time series from 2006 to 2100. *Scientific Data*, 7(1), 248. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00587-y>
- MUÑOZ LOPEZ, C.; PEREZ FORTEA, V.; COBOS SUÁREZ, P.; HERNÁNDEZ ALONSO, R.; SÁNCHEZ PEÑA, G.; 2011. Sanidad Forestal : Guía en Imágenes de Plagas, Enfermedades y otros Agentes Presentes en los Bosques (Ediciones Paraninfo). Mundi-Prensa.

MYERS, J. H.; 1993. Population Outbreaks in Forest Lepidoptera. *American Scientist*, 81(3), 240–251. <http://www.jstor.org/stable/29774919>

ROBINET, C.; BAIER, P.; PENNERSTORFER, J.; SCHOPF, A.; ROQUES, A.; 2007. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France. *Global Ecology and Biogeography*, 16(4), 460–471. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2006.00302.x>

ROBINET, C.; ROUSSELET, J.; PINEAU, P.; MIARD, F.; ROQUES, A.; 2013. Are heat waves susceptible to mitigate the expansion of a species progressing with global warming? *Ecology and Evolution*, 3, 2947–2957. <https://doi.org/10.1002/ece3.690>

SANTOS, H.; BURBAN, C.; ROUSSELET, J.; ROSSI, J.-P.; BRANCO, M.; KERDELHUÉ, C.; 2011. Incipient allochronic speciation in the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*, Lepidoptera, Notodontidae). *Journal of Evolutionary Biology*, 24, 146–158. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2010.02147.x>

SEIXAS ARNALDO, P.; OLIVEIRA, I.; SANTOS, J.; LEITE, S.; 2011. Climate change and forest plagues: the case of the pine. *Forest Systems*, 20(3), 508–515. <https://doi.org/10.5424/fs/20112003-11394>

TAMBURINI, G.; MARINI, L.; HELLRIGL, K.; SALVADORI, C.; BATTISTI, A.; 2013. Effects of climate and density-dependent factors on population dynamics of the pine processionary moth in the Southern Alps. *Climatic Change*, 121(4), 701–712. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0966-2>