



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1909

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

Organiza





Fenología foliar del haya en la Sierra de Entzia como indicador del efecto del calentamiento global

ETXEBESTE LARRAÑAGA, I. (1) y CANTERO AMIANO, A. (2)

(1) Errez Kooperatiba / Tantai Baso Jabe Kooperatiba

(2) Fundación HAZI Fundazioa.

Resumen

El estudio de la fenología foliar de numerosas especies forestales está siendo utilizado para demostrar los efectos del cambio climático. Sin embargo, diversos estudios afirman que existen diferencias notables en la respuesta de cada especie. El haya (*Fagus sylvatica* L.) se ha clasificado como una especie que muestra una respuesta moderadamente insensible al cambio climático en el caso del efecto de la temperatura en la ruptura de las yemas o la emergencia primaveral de las hojas. Un total de 108 hayas en tres parcelas localizadas en la sierra de Entzia, Araba, han sido monitorizadas durante las primaveras de 2017 a 2024. Se ha registrado visualmente la evolución de las yemas foliares durante 8-10 semanas. Las fechas de la ruptura de las yemas se han utilizado para analizar el efecto tanto del descenso del número de días invernales con temperaturas medias bajas (<5°C) como el ascenso del número de días invernales y primaverales con temperaturas medias altas (>5°C). Los resultados han permitido el ajuste de un modelo que señala cómo las hayas monitorizadas en Entzia requieren de una mayor acumulación de calor durante los inviernos en los que hay pocos días de frío. Esta adaptación, posiblemente relacionada con la adaptación a disminuir de daños por heladas tardías, pone de manifiesto la necesidad de adaptar los modelos fenológicos para que incluyan las señales de transición de la endodormancia y ecodormancia. .

Palabras clave

Endormancia, ecodormancia, modelos fenológicos

1. Introducción

El estudio de la fenología ha estado vinculado al estudio de la variabilidad y a la adaptación intra- e interespecífica desde su conceptualización en el siglo XVIII (LINNAEUS 1751). A su vez, la productividad vegetal y la distribución de las especies está determinado por la duración del periodo vegetativo, ya que es crucial que las diferentes especies forestales adapten su reloj a las variables que condicionan su fenología (MURRAY *et al.* 1989). Esto es especialmente importante en el caso de las especies forestales de bosques templados. Evitar heladas tardías, o el impacto de inviernos adelantados es crucial para la supervivencia (CHUINE y BEAUBIEN 2001, BASLER 2016). Los eventos fenológicos que definen el inicio y el final del periodo vegetativo son de especial interés, ya que establecen la duración del periodo de crecimiento (CHUINE y BEAUBIEN 2001). En este sentido, la ruptura de la dormancia, manifestada como el inicio de la foliación o la ruptura de yemas foliares es un buen indicador de que los árboles han iniciado su periodo vegetativo (BASLER 2016). En las especies adaptadas a climas fríos, la temperatura y el fotoperiodo son los principales factores que inducen la entrada o salida de esta fase reposo invernal (BASLER 2016). A medida que ascienden las temperaturas del



planeta, se ha registrado el cambio en la fenología de un gran número de especies vegetales y animales (MENZEL 2002). El seguimiento fenológico es de hecho una herramienta muy importante para el estudio del cambio climático (MENZEL 2002, KRAUSE y SANDERS 2024). Por ejemplo, la monitorización fenológica ha permitido determinar que el periodo vegetativo de los árboles europeos ha aumentado 11 días, de media, desde el inicio de la década de los sesenta del siglo pasado hasta el fin de éste (MENZEL 2000).

El periodo de dormancia consta de tres fases: paradormancia, endodormancia y ecodormancia. La paradormancia está controlada por factores internos, p. ej. la dominancia apical. En el caso de las otras dos fases, el tránsito de una fase a otra es gradual y diferente para cada especie (BASLER 2016). Las temperaturas bajas otoñales son las inductoras de la entrada a la endodormancia, que generalmente termina tras una exposición determinada a temperaturas en el rango de 2-7°C. Muchas especies necesitan entonces de una señal relacionada con el fotoperiodo para transitar a la ecodormancia. Durante esta fase, el control del desarrollo de las yemas y su ruptura reside principalmente en factores climáticos, mayormente la temperatura (BASLER 2016). Dada la importancia que tiene en la producción primaria, la predicción precisa del momento de la foliación será de vital importancia durante las siguientes décadas (VITASSE *et al.* 2009).

El estudio de la relación de la temperatura y la fenología se traduce en la construcción de modelos fenológicos. Además de identificar las variables adecuadas, uno de los retos más importantes de la modelización fenológica de especies forestales es que estos modelos son diferentes para cada especie (CHUINE y BEAUBIEN 2001, VITASSE *et al.* 2009). Históricamente se han desarrollado dos tipos de modelos fenológicos relacionados con la foliación y otros eventos primaverales. Los modelos de una fase, los más antiguos, asumen que la ruptura de yemas que precede la foliación se da tras una acumulación determinada de una variable de desencadenamiento. Generalmente esta variable es una forma de desarrollo de las yemas adimensional y dependiente de la temperatura ambiental. Este tipo de modelos asume implícitamente que la activación de las yemas se da antes de la fecha en la que la acumulación de la variable desencadenante acciona la foliación. La segunda tipología, se conocen como modelos fenológicos de dos fases. Se caracterizan por considerar la acción de las temperaturas frías durante la endodormancia y la acción de temperaturas desencadenantes durante la ecodormancia (VITASSE *et al.* 2011). Los modelos de dos fases han ido ganando popularidad durante los últimos años, sobre todo tras la caracterización de especies forestales de gran importancia ecológica y económica y sensibles al efecto de la exposición al frío durante la dormancia (MURRAY *et al.* 1989, VITASSE *et al.* 2009, VITASSE *et al.* 2011, KRAUSE y SANDERS 2024).

Los efectos del calentamiento global son cada vez más evidentes y se espera que la recurrencia como las recientes sequías de 2016, 2020 o 2022 y sus efectos sean cada vez mayores (ADAMS *et al.* 2017). El haya (*Fagus sylvatica* L.) se ha clasificado como una especie que muestra una respuesta moderadamente insensible al cambio climático en el caso del efecto de la temperatura en la ruptura de las yemas o la emergencia primaveral de las hojas. Los resultados de la modelización



fenológica señalaron que mientras que *Quercus petraea* verá incrementado su periodo vegetativo en 3,7 días por década, el haya lo hará sólo en 2,8 días (VITASSE *et al.* 2011, PACKHAM *et al.* 2012). Según MURRAY *et al.* (1989) el haya tiene una foliación tardía. Además, la acumulación de días de calor (número de días con temperaturas medias superiores a 5°C) se incrementa rápidamente con el descenso del frío invernal (número de días con temperaturas medias inferiores a 5°C entre el 1 de noviembre y la fecha asignada a la ruptura de yemas). Según los mismos autores el requerimiento de frío invernal durante la endodormancia se encuentra al límite en el Gran Bretaña, y vaticinaban que tal requerimiento se verá afectado tanto en localidades más cálidas como por el efecto del cambio climático. Se ha de tener en cuenta también que aunque la temperatura es un factor determinante para el inicio de la foliación, no es la única variable que la afecta (VITASSE *et al.* 2010). Por un lado, existe una gran flexibilidad intrapoblacional en la fecha de foliación (VITASSE *et al.* 2010). La exposición previa a heladas primaverales de hayas de la misma región, por ejemplo, pueden hacer que también se modifique la fecha en la que se inicie el periodo vegetativo (KRAJ y SZTORC 2009).

La distribución del haya en la Comunidad Autónoma de Euskadi tiene en la sierra de Entzia uno de los puntos más al sur de su distribución (HOUSTON DURRANT *et al.* 2016). Por otro lado, durante los últimos años el haya ha recuperado un interés especial en el sector forestal (GRUPO OPERATIVO FAGUS 2023). En este contexto, es de vital importancia monitorizar los efectos del cambio climático en la fenología del haya e incorporar este conocimiento a las diferentes medidas encaminadas a su selvicultura adaptativa.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo ha sido analizar el efecto del descenso del número de días invernales con temperaturas medias bajas (<5°C) y el ascenso del número de días invernales y primaverales con temperaturas medias altas (>5°C) en la ruptura de la ecodormancia de las yemas del haya. Como objetivo secundario, se ha querido evaluar los modelos fenológicos de dos fases en el caso del haya.

3. Metodología

Área de estudio

Para este trabajo se han monitorizado 108 individuos de *Fagus sylvatica* L. ubicadas en tres parcelas localizadas en un gradiente altitudinal ascendiendo al puerto de Opakua (Sierra de Entzia, Araba). En cada parcela se seleccionaron 36 pies, preferentemente dominantes o co-dominantes a los que se les asignó un número de pie de cara a poder llevar un seguimiento individualizado (Figura 1). La parcela 1 la constituyen hayas de gran porte, muchas trasmochas, en un monte alto monoespecífico (1024 msnm). La parcela 2 es un monte medio, irregular, dominada por haya, pero donde aparecen otras especies como fresnos, robles o alisos (943 msnm). La parcela 3 es un monte bajo, de diámetros sensiblemente menores que las parcelas anteriores (855 msnm). En esta última parcela hay pocos pies de haya dominantes que comparten masa con robles y alisos. El clima de la zona clasifica como mediterráneo oceánico, Köppen-Geiger Csb. La Figura 2



presenta un resumen de la climatología durante el transcurso de este trabajo y la serie histórica correspondiente del Atlas Climático de la Comunidad Autónoma de Euskadi.

Evaluación del estado fenológico

Las parcelas arriba mencionadas han sido monitorizadas anualmente desde 2017 con la excepción de 2023. La Tabla 1 detalla el número y fechas de muestreos. El tercio superior de las copas de las hayas se ha observado semanalmente. Evaluando el árbol en su conjunto, durante cada visita se determinó el estado o fase de desarrollo en el que estaba cada árbol. Para ello se anotaba el porcentaje de la copa que se hallaba en la fase más adelantada, agrupando esta medida de cobertura en 10%, 50% y 90% de las yemas. Para determinar el estado o fase de desarrollo de la yema, el protocolo inicial del Observatorio Pirenaico de Cambio Climático (ROUYER 2014) adaptó las fases de foliación del haya descritos de trabajos anteriores (VITASSE 2005), y designó inicialmente cinco fases de desarrollo. La primera fase se sitúa al final de la ecodormancia. Las yemas foliares están completamente cerradas en al menos 90% de tercio superior de la copa. Durante la segunda fase, las yemas se alargan y se hinchan. La tercera fase se caracteriza por la ruptura de las yemas. Asoma un penacho verde pero todavía no se distinguen las hojas. La fase 4 se diferencia porque las hojas forman un penacho grande en el que ya se distinguen las hojas. Finalmente, en la fase 5 las hojas están desarrolladas. Si bien esta categorización permite la comparación entre especies, en el caso del haya no diferencia una última fase en la que las hojas se endurecen y viran hacia un verde oscuro. Otro método de observación, el *Britzer*, se ajusta mejor que el descrito por Vitasse (2005) u otros también de carácter general (RASPE *et al.* 2020, KRAUSE y SANDERS 2024). A partir del 2018 se incluyó un estado intermedio, 4-5 para la fase en la que las hojas se mantienen sedosas y blandas, y se reservó la fase 5 para cuando las hojas comenzasen a endurecerse. En consecuencia, las lecturas de la campaña de 2017 no se han incluido en parte de los análisis.

Datos climáticos

Los datos climáticos empleados para el análisis se corresponden a los de la estación C024 de Euskalmet ubicado en la granja de Iturrieta y a escasos 2 km al sur de la ubicación de las parcelas. Se han descargado los datos disponibles a través de <https://opendata.euskadi.eus>. La mencionada estación inició sus registros climáticos en febrero de 2017, por lo que los datos son válidos para el análisis de las campañas entre 2018 y 2024..

Análisis estadístico

El registro de las fases de desarrollo propuesta por el OPCC es equivalente a una escala de 18 niveles categóricos. Estableciendo un estado de referencia 0, el estado 1, con un 10% de cobertura, se puede traducir a un valor de 0,056 que va aumentando en fracciones de 1/18 hasta llegar al máximo desarrollo en el estado 5



y un 90% de cobertura, linearizado a un valor de 1. De esta forma puede graficar la evolución fenológica de las diferentes parcelas durante las diferentes campañas. Con el objetivo de facilitar la interpretación de estos datos, se ha ajustado un modelo logístico relacionando el nivel de desarrollo y las fechas de las visitas. Con una estrategia de representación y análisis análoga, se han identificado tres categorías de árboles con comportamientos fenológicos diferentes. Por un lado, los árboles con una tendencia estándar se han categorizado como “normales”; los que requieren de un mayor tiempo para completar el desarrollo (“retrasados”), y un único pie, que como norma se ha desarrollado antes que los demás (“adelantado”). Esta categorización se ha realizado con el objetivo de poner de manifiesto la variabilidad intra-poblacional del comportamiento fenológico del haya.

Para poder computar el número de los *días de frío*, el número de días a partir del 1 de noviembre hasta la emergencia foliar con temperaturas medias inferiores a 5°C, con los *días de calor*, el número de días a partir del 1 de enero hasta la emergencia foliar con temperaturas medias superiores a 5°C es necesario determinar la fecha en la que se puede considerar que ha dado lugar la emergencia foliar. En base a los diferentes protocolos disponibles (VITASSE 2005, ROUYER 2014, RASPE *et al.* 2020, KRAUSE y SANDERS 2024), para este trabajo se ha fijado tal fecha cuando las yemas de por lo menos un 10% de la copa se encontraban en la fase o estadio 4. Los niveles de desarrollo convertidos a fracciones se han modelizado contra el día ordinal del año (número de días tras el 1 de enero) siguiendo un modelo linear generalizado, asignando la distribución del error como binomial. Los modelos ajustados, uno por año, se han utilizado para hallar la fecha modelizada para la fracción 0,556 correspondiente al estadio 4. A partir de la obtención de estas fechas se han contabilizado los días de calor y los días de frío para cada campaña. Finalmente, siguiendo el modelo propuesto por MURRAY *et al.* (1989), se ha calculado la acumulación de grados día hasta la mecha modelizada de emergencia foliar. Para ello, se ha empleado el método del seno simple estableciendo el umbral mínimo en 5°C (ROLTSCH *et al.* 1999). También se han vuelto a ajustar los datos publicados por MURRAY *et al.* (1989) para así poder comparar ambos resultados. Para ello se han digitalizado los datos presentados en la figura 1 del trabajo citado. El modelo propuesto por MURRAY *et al.* (1989) $T = a + b \cdot e^{-r \cdot C}$ relaciona la acumulación de calor medido en grados día (T), con el número de días de frío (C). Los parámetros del modelo no-linear propuesto por MURRAY *et al.* (1989), a , b y r , se han ajustado por mínimos cuadrados siguiendo el algoritmo Gauss-Newton. Todos los cálculos y gráficos han sido realizados en el entorno y lenguaje de programación R (R CORE TEAM 2023).

4. Resultados

La Figura 3 resume de forma visual la evolución del estado fenológico de uno de los individuos de haya monitorizados durante, en ese caso, la campaña de 2022. El cambio de protocolo en el año 2018 y el aumento gradual del número de semanas en las que se ha monitorizado la foliación (Tabla 1), ha incidido positivamente en el registro fenológico. La Figura 4 incluye los datos del año 2017. La diferencia de ambas aproximaciones es muy marcada; esto es, la no inclusión de una fase de foliación que describa el periodo en las que las hojas del haya se mantienen sedosas y blandas se ve reflejada en una respuesta con una tasa de cambio más alta. Sin embargo, la inclusión de la fase 4-5 hace que la tasa de cambio baje, y, por



lo tanto, la transición sea más progresiva. La campaña de 2018 se caracteriza por haber sido la más lluviosa y fría de las analizadas hasta ahora, con presencia de nieve hasta comienzos de abril (Figura 2). Sin embargo, la fecha modelizada como el inicio del periodo vegetativo (Tabla 2, 24 de abril), no difiere de la mayoría de las campañas restantes. En el extremo opuesto, la campaña de 2020 partía de un otoño en 2019 frío y acumuló, sobre todo en febrero, días calurosos de forma más condensada que el resto de las campañas. La parcela 1 presentaba árboles con yemas en la fase 3, asomando un penacho verde y cubriendo más del 90% de la copa el 18 de marzo. Cabe destacar que otro proceso fenológico, el de la vecería, se registró también durante el año 2020.

Partiendo de la que el tamaño de la muestra no es grande, y de que el objetivo del estudio no ha sido identificar individuos con respuestas diferenciadas, durante las visitas de campo se han podido identificar comportamientos fenológicos muy diferentes entre los individuos evaluados. La Figura 5 representa cómo de forma coherente determinados individuos de cada parcela inician su foliación antes o después que la media del resto de los pies de la parcela correspondiente.

La Figura 6 presenta en azul los resultados y el modelo publicado en el trabajo de MURRAY *et al.* (1989) con los registrados en las campañas de este trabajo, en rojo. Los modelos ajustados son los siguientes:

Entzia (en rojo en la figura 6): $T = 161.926 + 13055.321 \cdot e^{-0.069 \cdot C}$, pseudo- R^2 de Efron 0.946

Murray (en azul en la figura 6): $T = -14.487 + 1118.236 \cdot e^{-0.013 \cdot C}$, pseudo- R^2 de Efron 0.995

Aunque la forma y los parámetros de los modelos ajustados difieren, el patrón se mantiene. Los años en los que se da un mayor número de días de frío las hayas de Opakua requieren de una mayor acumulación de calor, manifestado como una mayor acumulación de grados-día, para salir de la ecodormancia e iniciar el periodo vegetativo. La relación de la importancia de la acumulación de calor para el haya se pone de manifiesto en campañas como la de 2020 o la de 2024. Si bien el periodo vegetativo de 2020 se inició cerca de 20 días antes que el resto de las campañas, el calor acumulado para esa fecha y el número de días de frío fue similar a las campañas de 2019 o 2021. Sin embargo, durante el otoño e invierno de 2023-2024 se acumuló un número significativamente menor de días de frío, y el inicio del periodo vegetativo requirió de una acumulación añadida más de cien grados-día que el resto de las campañas; aun así, la fecha del inicio del periodo vegetativo en 2024 fue equiparable al de la mayoría de los años.

5. Discusión

Los resultados registrados para el seguimiento de la fenología de la foliación del haya en la Sierra de Entzia, Araba, demuestran que la fenología de esta especie es sin duda un muy buen indicador de los efectos del cambio climático. En tan sólo siete años se han podido registrar los efectos en la endodormancia del descenso del número de días de frío, así como del aumento de la acumulación de calor o grados día en la ruptura de la ecodormancia de las yemas foliares. Estos resultados confirman los resultados de trabajos anteriores (MURRAY *et al.* 1989, VITASSE *et al.*



2011) y ponen de manifiesto la necesidad de considerar la importancia de la exposición al frío durante la endodormancia. Al igual que en el caso de Gran Bretaña, es muy probable que esta exposición esté disminuyendo en la Sierra de Entzia, y que primaveras como la del 2018 sean cada vez más la excepción más que la regla (Figuras 2 y 6). A diferencia de otras localidades más continentales (ver por ejemplo los trabajos VITASSE *et al.* 2011, KRAUSE y SANDERS 2024), es muy probable que llegar al umbral de cerca de 90 días de frío que se ha registrado en Opakua (Tabla 2) se volverá cada vez más raro. En este sentido, el número de días de frío previos a la emergencia de 2024 ha sido prácticamente la mitad que en 2018. En términos generales la monitorización de los días de frío y la de los días de calor pueden ser una forma práctica y sencilla para predecir la fecha aproximada de emergencia foliar.

La serie temporal comienza a ser lo suficientemente larga como para evaluar localmente las diferentes estrategias de los pies dentro del área de estudio. En términos generales y de acuerdo con lo recogido por PACKHAM *et al.* (2012) es evidente que las hayas del área de estudio siguen la misma estrategia que las hayas de Gran Bretaña. Esta afirmación se basa fundamentalmente en el modelo y los datos de MURRAY *et al.* (1989). Hay que tener en cuenta que este trabajo se llevó a cabo en un vivero localizado en Edimburgo, Escocia, durante 1985, en el que los efectos que el dosel o el microclima no afectaron de la misma forma que en una masa natural (ZAHND *et al.* 2023). A su vez el rango altitudinal de la ubicación de las parcelas y las características de estas hacen que los 108 individuos monitorizados puedan manifestar adaptaciones individuales que se desvíen de las observaciones medias (Figura 5). Existen estudios en los que se demuestra la capacidad del haya de adaptarse localmente incluso en escalas temporales cortas (WESTERGREN *et al.* 2023). La identificación de los factores que determinan esta capacidad está fuertemente vinculada a la adaptación de las poblaciones del haya al cambio climático. El identificar los individuos que inicien el periodo vegetativo incluso con un menor número de días de frío puede permitir su selección positiva, por ejemplo durante el señalamiento de claras. Además de otros factores más estudiados, como la incidencia de la sequía (ADAMS *et al.* 2017), la selvicultura adaptativa del haya debería tener en cuenta también la fenología (GUSTAFSON *et al.* 2020).

La monitorización de la fenología cobra especial interés en las zonas en las que las especies forestales se hallen en el límite de su distribución actual. Son estas zonas las que reflejarán con más virulencia los efectos del calentamiento global. Además de afianzar la monitorización de este tipo de parcelas, los trabajos futuros deberán tener en cuenta a las variaciones intrapoblacionales en la respuesta fenológica al cambio climático. La identificación de individuos que rebajen el requerimiento de días de frío durante la endodormancia será de vital interés, especialmente en las poblaciones más meridionales y de menor elevación. La teledetección y el análisis de imágenes registradas por vehículos aéreos no tripulados abre la puerta a la identificación de individuos que destaquen en su adaptación al cambio de forma masiva (KRAUSE y SANDERS 2024) y pueden contribuir de forma significativa a la selvicultura adaptativa del haya.

6. Conclusiones



Las masas de haya estudiadas en la Sierra de Entzia pertenecen a una población muy sensible al descenso del número de días invernales con temperaturas medias bajas, y son por lo tanto un indicador muy adecuado para el seguimiento de los efectos del cambio climático. Se concluye también, que para la determinación del inicio del periodo vegetativo se deben utilizar modelos fenológicos de dos fases que incorporen la información relacionada tanto a la exposición al frío durante la endodormancia como la exposición al calor durante la rupura de la ecodormancia.

7. Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por los proyectos del Programa Operativo de Cooperación Territorial España-Francia-Andorra (POCTEFA) EFA 028/15 Canopée, EFA 337/19 Acclimafor y el proyecto LIFE PYRENEES-4CLIMA, y dan continuidad a lo iniciado dentro del Observatorio Pirenaico de Cambio Climático (OPCC). Los autores quieren agradecer a los miembros del equipo técnico de HAZI, Errez, Koop. Elk. Txikia y de Tantai Baso Jabe Kooperatiba así como a los alumnos de la Escuela Forestal de Murgia y los agentes forestales que han ayudado durante los trabajos de campo.

8. Bibliografía

ADAMS, H. D., M. J. ZEPPEL, W. R. ANDEREGG, H. HARTMANN, S. M. LANDHÄUSSER, D. T. TISSUE, T. E. HUXMAN, P. J. HUDSON, T. E. FRANZ y C. D. ALLEN; 2017. A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature ecology & evolution* 1(9): 1285-1291.

BASLER, D.; 2016. Evaluating phenological models for the prediction of leaf-out dates in six temperate tree species across central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 217: 10-21.

CHUINE, I. y E. G. BEAUBIEN; 2001. Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecology Letters* 4(5): 500-510.

GRUPO OPERATIVO FAGUS, Ed. 2023. Manual: Resultados finales del proyecto Grupo Operativo FAGUS.

GUSTAFSON, E. J., C. C. KERN, B. R. MIRANDA, B. R. STURTEVANT, D. R. BRONSON y J. M. KABRICK; 2020. Climate adaptive silviculture strategies: How do they impact growth, yield, diversity and value in forested landscapes? *Forest ecology and management* 470: 118208.

HOUSTON DURRANT, T., D. DE RIGO y G. CANDULLO; 2016. *Fagus sylvatica* and other beeches in Europe: distribution, habitat, usage and threats in San Miguel Ayanz. J., de Rigo, D., Candullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A.(eds.) *European Atlas of Forest Tree Species. Publication Office of the European Union, Luxembourg, pp. e012b90.*



KRAJ, W. y A. SZTORC; 2009. Genetic structure and variability of phenological forms in the European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science* **66**(2): 1-7.

KRAUSE, S. y T. SANDERS; 2024. European beech spring phenological phase prediction with UAV-derived multispectral indices and machine learning regression. *Scientific Reports* **14**(1): 23.

LINNAEUS, C.; 1751. *Philosophia botanica, in qua explicantur fundamenta botanica cum definitionibus partium, exemplis terminorum, observationibus rariorum, adjectis figuris aeneis.* *Kiesewetter, Stockholm* **7**.

MENZEL, A.; 2000. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *Int. J. Biometeorol.* **44**: 76-81.

MENZEL, A.; 2002. Phenology: its importance to the global change community. *Climatic change* **54**(4): 379.

MURRAY, M., M. CANNELL y R. SMITH; 1989. Date of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming. *Journal of Applied Ecology*: 693-700.

PACKHAM, J. R., P. A. THOMAS, M. D. ATKINSON y T. DEGEN; 2012. Biological Flora of the British Isles: *Fagus sylvatica*. *Journal of Ecology* **100**(6): 1557-1608.

R CORE TEAM; 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing.

RASPE, S., S. FLECK, E. BEUKER, A. BASTRUP-BIRK y T. PREUHSLER 2020. Part VI: Phenological Observations. Version 2020-3. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre. Eberswalde, Germany, Thünen Institute of Forest Ecosystems: 14.

ROLTSCH, W. J., F. G. ZALOM, A. J. STRAWN, J. F. STRAND y M. J. PITCAIRN; 1999. Evaluation of several degree-day estimation methods in California climates. *Int. J. Biometeorol.* **42**(4): 169-176.

ROUYER, E.; 2014. Protocolo de mediciones fenológicas de OPCC. Observatorio Pirenaico del Cambio Climático, CRPF Midi-Pyrenees.

VITASSE, Y.; 2005. Mesures et modélisation des dates de débourrement des



bourgeons de six espèces ligneuses le long d'un gradient altitudinal dans les Pyrénées. *Sciences et Technologies, Université Bordeaux, 49p.*

VITASSE, Y., C. C. BRESSON, A. KREMER, R. MICHALET y S. DELZON; 2010. Quantifying phenological plasticity to temperature in two temperate tree species. *Functional Ecology* 24(6): 1211-1218.

VITASSE, Y., S. DELZON, E. DUFRÊNE, J.-Y. PONTAILLER, J.-M. LOUVET, A. KREMER y R. MICHALET; 2009. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: do within-species populations exhibit similar responses? *Agricultural and forest meteorology* 149(5): 735-744.

VITASSE, Y., C. FRANCOIS, N. DELPIERRE, E. DUFRÊNE, A. KREMER, I. CHUINE y S. DELZON; 2011. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(7): 969-980.

WESTERGREN, M., J. ARCHAMBEAU, M. BAJC, R. DAMJANIĆ, A. THERAROS, H. KRAIGHER, S. ODDOU-MURATORIO y S. C. GONZÁLEZ-MARTÍNEZ; 2023. Low but significant evolutionary potential for growth, phenology and reproduction traits in European beech. *Molecular Ecology*.

ZAHND, C., M. AREND, A. KAHMEN y G. HOCH; 2023. Microclimatic gradients cause phenological variations within temperate tree canopies in autumn but not in spring. *Agricultural and Forest Meteorology* 331: 109340.

Tabla 1. Resumen de las fechas en las que se han realizado las observaciones fenológicas de la foliación del haya en la Sierra de Entzia, Araba.

Año	Semana inicial	Semana final	Nº observaciones
2017	14	20	7
2018	14	20	7
2019	13	20	8
2020	12	20	9
2021	11	20	10
2022	11	20	10
2024	12	21	10

Tabla 2. Número de días de calor (>5°C) entre el 1 de enero y la fecha modelizada de emergencia, de frío (<5°C) entre el 1 de noviembre del año anterior y la fecha modelizada de la emergencia foliar y grados-día acumulados desde el 1 de enero hasta la fecha modelizada de la emergencia foliar (i.e. al menos un 10% de las yemas en el estado 5) del haya en la Sierra de Entzia, Araba.

Año	Días de calor	Días de Frío	Grados día	Fecha modelizada emergencia
2018	39	126	166,29	2018-04-24
2019	45	90	186,36	2019-04-21
2020	46	85	182,92	2020-04-04
2021	54	85	218,47	2021-04-28
2022	47	99	172,16	2022-04-25
2024	65	66	298,75	2024-04-24

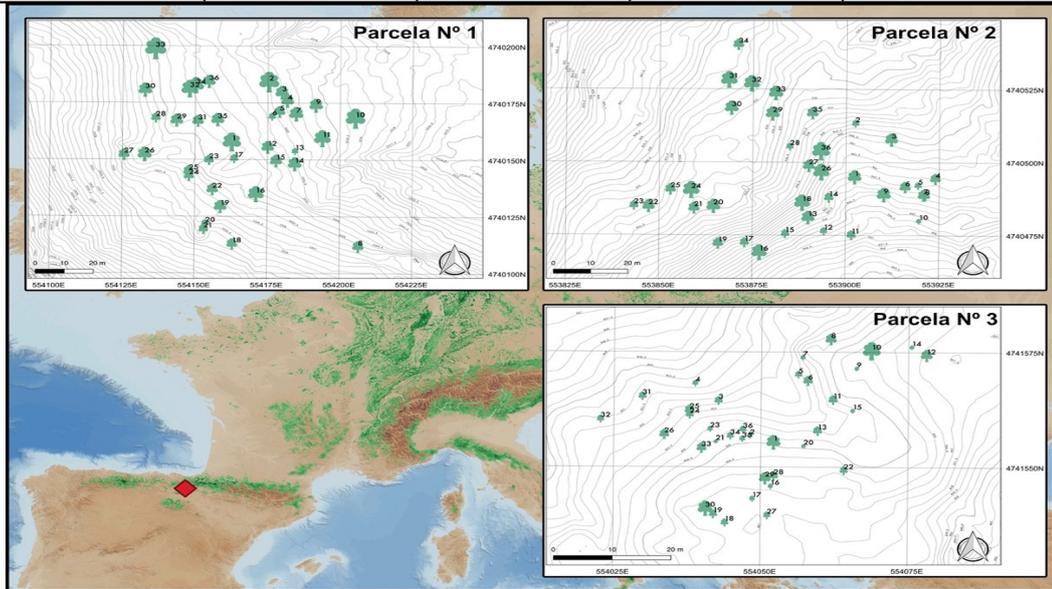


Figura 1. Ubicación del área de estudio en Opakua respecto a la distribución europea del haya (HOUSTON DURRANT et al. 2016) y planos detallados de la ubicación de los pies monitorizados por parcelas.

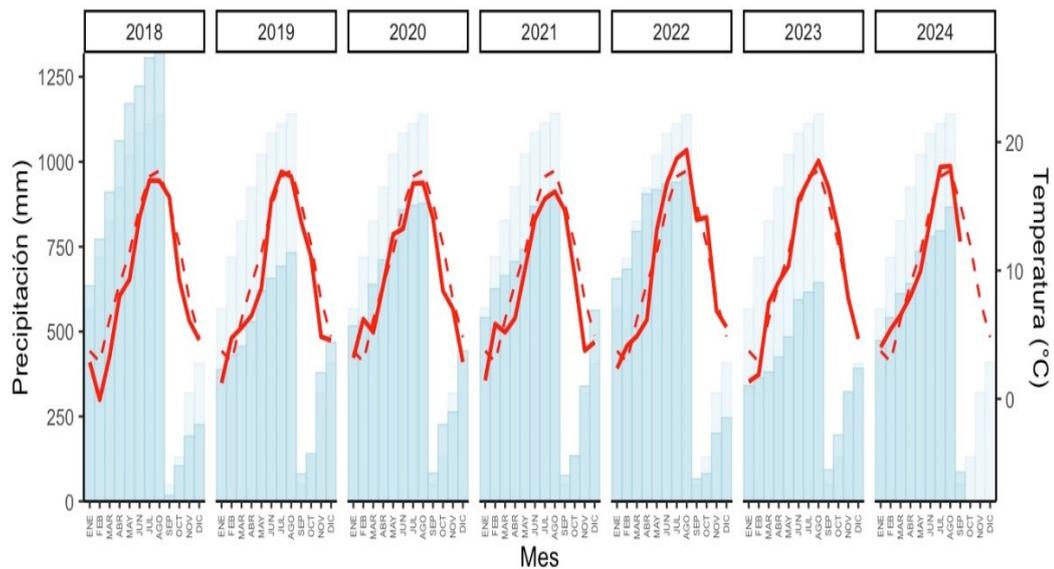


Figura 2. Temperatura media mensual entre el año 2018 y finales de septiembre de 2024 y lluvia acumulada entre septiembre y agosto, por año hidrológico, en comparación con la serie histórica de la estación de Iturrieta (Araba). En azul oscuro, precipitaciones acumuladas por año hidrológico, septiembre a agosto,

durante el periodo de estudio. En azul claro, precipitaciones medias acumuladas durante la serie histórica por año hidrológico. Línea roja continua, temperaturas medias mensuales durante el periodo de estudio. Línea roja discontinua, temperaturas medias mensuales durante la serie histórica. .

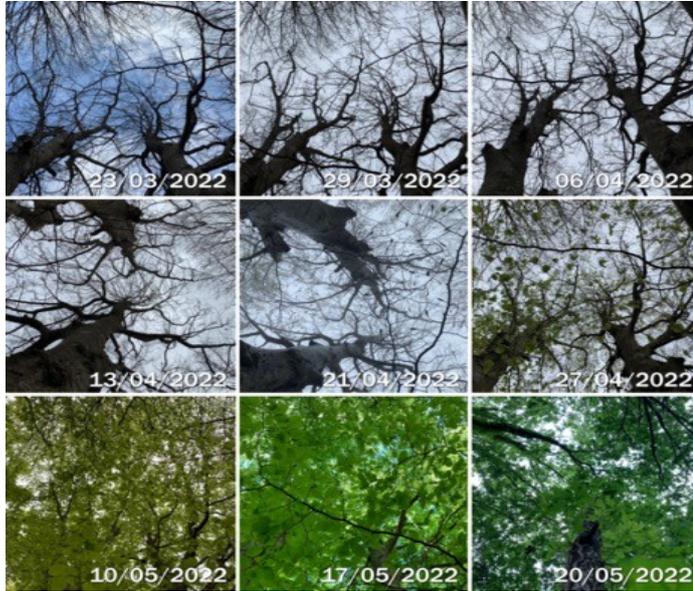


Figura 3. Serie de fotografías cenitales tomadas en el pie central de la parcela 3 de Opakua durante el año 2022. La fotografía central, corresponde al 21 de abril, y se pueden observar las primeras yemas en fase 3.

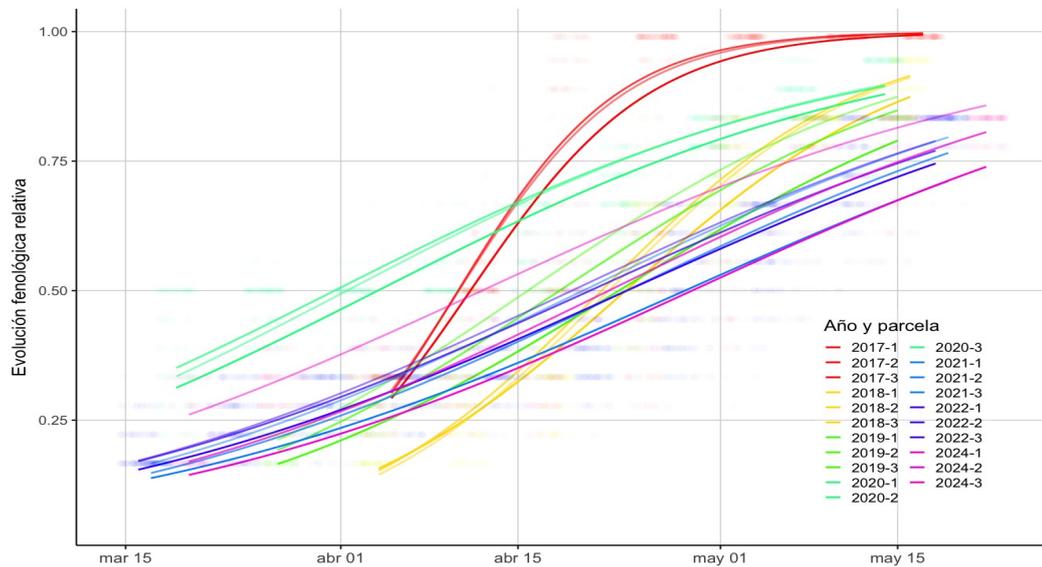


Figura 4. Evolución fenológica relativa durante el periodo de estudio de las parcelas de haya en Opakua durante los años 2017-2022 y 2024. El nivel 1 significa que las yemas del pie en cuestión han alcanzado el estado 5 con al menos un 90% cobertura.

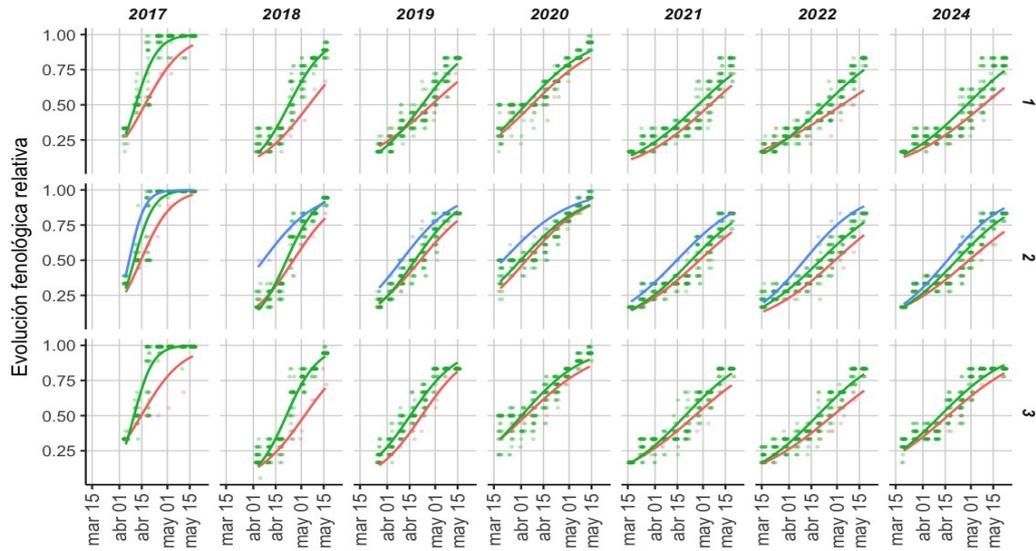


Figura 5. Evolución fenológica relativa de pies agrupados como normales (verde), adelantados (azul) o retrasados (rojo) durante los periodos de estudio de las parcelas 1, 2, y 3 de haya en Opakua (Araba) durante 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 y 2024. El nivel 1 significa que las yemas del pie en cuestión han alcanzado el estado 5 con al menos un 90% cobertura.

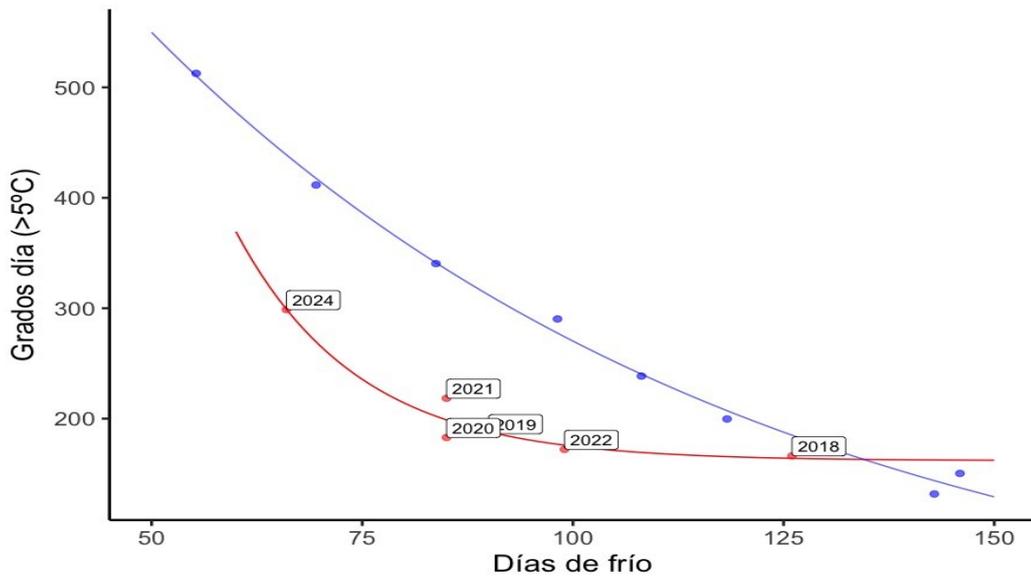


Figura 6. En rojo, la relación entre la acumulación de días frío y días de calor con la emergencia de las hojas en las hayas estudiadas en Opakua (Araba) durante 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 y 2024. En azul, los resultados y el modelo publicado en el trabajo de MURRAY et al. (1989). Los días de frío, hacen referencia al número de días a partir del 1 de noviembre hasta la emergencia foliar con temperaturas medias inferiores a 5°C, y los días de calor, el número de días a partir del 1 de enero hasta la emergencia foliar con temperaturas medias superiores a 5°C.