



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Efectos de la clara en la producción y calidad de la hojarasca en un bosque mixto de la España central

PIQUER DOBLAS, M.^{1,4}, DEL RÍO, M.^{2,3} RUIZ-PEINADO, R., RUBIO-CUADRADO, A.⁵ BRAVO-OVIEDO, A.¹

¹ Departamento de Biogeografía y Cambio global (Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC), C/ Serrano 115 dpto 28006 Madrid.

² Centro de Investigación Forestal (CIFOR). Centro Nacional Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (CSIC), Ctra. A Coruña km 7.5, 28040 Madrid.

³ Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible UVa-INIA. E.T.S.I.I.AA., Palencia.

⁴ Maestría en Bosques y Conservación Ambiental, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Medellín, Colombia.

⁵ Departamento de Sistemas y Recursos Naturales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal. y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid.

Resumen

La hojarasca es el aporte de materia orgánica más importante en los bosques, y posee un rol clave en el reciclaje de nutrientes en los ecosistemas forestales. Nuestro estudio se enfoca en el impacto de la clara en la producción de hojarasca de un bosque mixto de pino y roble (*Pinus pinaster* y *Quercus pyrenaica*) situado en los montes de Toledo. El diseño experimental consta de tres intensidades de clara de *P. pinaster*: 25% (clara moderada) y 40% (clara fuerte) del área basimétrica y un control sin clara. Se analizaron las dinámicas de producción de hojarasca estacional durante los cuatro años posteriores a la clara (2010-2014); la concentración de nutrientes de la hojarasca (C, N, P, K, Ca, Mg) se analizó durante los dos primeros años (2010-2012).

Se evaluó la relación entre la clara y la producción de hojarasca mediante modelos lineales mixtos, explorando la influencia de factores climáticos, la especie y la estación. Los resultados apuntan a una reducción de la producción de hojarasca estacional en ambas especies cuando se efectúan claras sobre el pinar. La concentración de nutrientes sigue la tendencia contraria, aumentando en la hojarasca de ambas especies en el segundo año de estudio. Estos resultados suponen un primer acercamiento al efecto de esta técnica de manejo forestal sobre el reciclaje de nutrientes en un bosque mixto mediterráneo.

Palabras clave

Clara, hojarasca, nutrientes, *Pinus pinaster*, *Quercus pyrenaica*.

1. Introducción

Uno de los procesos más importantes en la dinámica de un ecosistema es el ciclo de nutrientes. La hojarasca constituye uno de los aportes de materia orgánica más importantes en los ecosistemas forestales. La producción de hojarasca, su caída (desfronde) y su posterior descomposición juegan un papel clave en el retorno de nutrientes al suelo del bosque, y en la composición y fertilidad de los mismos (Berg & Laskowski, 2006). Este proceso es complejo y está influido por multitud de factores. No obstante, el proceso de desfronde es un evento, en gran medida, asociado a las condiciones climáticas y diferencias latitudinales, a factores orográficos regionales (Blanco et al. 2006) y a fenología de las especies y factores locales.

El estudio de los factores que influyen en la cantidad de desfronde y sus patrones temporales permite comprender mejor las dinámicas forestales y cómo estas se relacionan con el cambio climático y el impacto antrópico. En el contexto actual de cambio global, este conocimiento es de interés tanto para la conservación como para el manejo sostenible de los bosques, dos disciplinas imprescindibles para enfrentar con éxito los retos climáticos. Entre las técnicas de manejo forestal, las claras son el tratamiento intermedio más utilizado. Además del componente de mejora por

liberación de competencia, la clara tiene efectos sobre el reciclaje de nutrientes en el bosque, pues influye sobre la cantidad de hojarasca producida (Roig et al. 2005; Blanco et al 2006; Navarro et al. 2013), disminuyéndola a nivel de rodal, y también sobre el microclima del bosque al incrementar la radiación que llega al suelo y favoreciendo la descomposición en zonas donde la temperatura es limitante (Vesala et al. 2005).

El presente estudio se desarrolla en un bosque mixto de pino (*Pinus pinaster*) y roble (*Quercus pyrenaica*) de la España central. Este bosque ha sido sometido a diferentes tratamientos de clara selectiva con el fin de analizar el impacto de esta técnica de manejo forestal sobre el patrón de desfronde y los cambios en la concentración de nutrientes de la hojarasca. Además, durante los cuatro años de duración de este experimento, se ha recogido información sobre las condiciones ambientales de temperatura y humedad. En esta investigación, presentamos los resultados obtenidos sobre el impacto de la clara y el clima en el desfronde.

2. Objetivos

Determinar las relaciones entre la cantidad de hojarasca y su concentración de nutrientes con las condiciones climáticas de humedad y temperatura en un bosque mixto de *Pinus pinaster* y *Quercus pyrenaica*, tras ser sometido a una clara de diferentes intensidades.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

El bosque mixto donde tuvo lugar el experimento se sitúa en los Montes de Toledo (39°31'N, 4°16'40"W). Esta zona posee un clima mediterráneo con una precipitación anual de 469 mm y una temperatura media anual de 12.9 °C, con una orientación noroeste y una pendiente de 21.5%. En 1950, el robledal nativo de *Quercus pyrenaica* Willd. fue sustituido por una plantación de *Pinus pinaster* Aiton, en la cual fueron creciendo de nuevo robles, conformando un bosque mixto con un dosel dominado por *P. pinaster* y un sotobosque de *Q. pyrenaica*.

3.2. Diseño experimental

En 2009 se estableció en este bosque un experimento de clara consistente en 2 tratamientos: una clara moderada en la que se cortó el 25% del área basal de las parcelas de estudio, y una clara intensa en la que se cortó el 40% del área basal. Además, se establecieron parcelas de control, en las que no se realizó clara. Se realizaron 3 réplicas por tratamiento, de modo que en total se establecieron 9 parcelas rectangulares de 0.06 ha cada una. En las parcelas con clara se retiraron los individuos de *P. pinaster* de menor diámetro hasta alcanzar la intensidad requerida.

Para el monitoreo de las variables climáticas, se instaló una estación metereológica HOBO U12 4-External Channel en una de las parcelas, que hace un registro cada 15 minutos de las variables de temperatura, precipitación y humedad. Estos datos se complementaron con los datos de la estación meteorológica de San Pablo de los Montes 3298X, perteneciente a la AEMET, que registra las mismas variables climáticas. De este modo, se obtuvieron los datos sobre las condiciones meteorológicas en las parcelas durante el periodo estudiado.

3.3. Estimación del desfronde

Para cuantificar el desfronde en cada una de las parcelas, se establecieron 4 trampas de hojarasca por parcela tras la primera clara en 2009. El material caído en estas trampas fue recogido mensualmente durante 4 años, desde septiembre de 2010 a septiembre de 2014. El material de las

trampas fue secado a 65 °C para la determinación de nutrientes y una fracción llevada a 105 °C hasta alcanzar un peso constante. Se consideraron las siguientes fracciones: hojarasca, ramas, corteza, semillas, flores y miscelánea. El material de cada especie se separó y pesó por separado. La cantidad de hojarasca caída en cada una de las trampas fue utilizada para estimar la hojarasca mensual total producida en cada parcela por cada especie.

3.4. Concentración de nutrientes y pérdida de masa

La hojarasca de cada especie se analizó por separado. La mitad de la muestra se destinó al análisis de nutrientes y fue secada a una temperatura de 65 °C, mientras que la otra mitad se destinó al cálculo de la pérdida de masa total de la muestra, y fue secada a 105 °C hasta alcanzar un peso constante. El análisis de nutrientes incluyó el porcentaje de carbono total (C), el nitrógeno total (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K).

La concentración inicial de nutrientes se determinó a partir de una submuestra de hojarasca colectada en febrero de 2011, fecha de inicio del experimento. Para todas las muestras, el carbono y nitrógeno total se determinó mediante una HCN-600 LECO. Las muestras foliares se procesaron en un sistema “aqua regia” de alta presión (ETHOS PLIS), y las concentraciones de nutrientes (mg/g de materia seca) se midieron mediante ICP-OES (Perkin-Elmer, Optima 2000).

3.5. Modelo de desfronde

Para explorar la influencia de la clara y el clima en la producción de desfronde, se realizaron modelos lineales mixtos utilizando el desfronde estacional como variable respuesta y numerosas variables explicativas (**Tabla 1**). Los períodos estacionales fueron divididos de la siguiente forma: primavera (marzo-mayo), verano (junio-agosto), otoño (septiembre-noviembre) e invierno (diciembre-febrero). Se utilizaron transformaciones logarítmicas en aquellas variables que no seguían una distribución normal según la prueba de Shapiro-Wilk, para poder cumplir con el supuesto de normalidad asumido en los modelos mixtos.

Tabla 1. Variables utilizadas para la construcción del modelo lineal mixto para el desfronde estacional de pino y roble. En el índice de Martonne, P hace referencia a la precipitación anual total en mm, y T a la temperatura media anual.

	Nombre	Unidades	Observaciones
Variable explicativa	Desfronde estacional	kg/ha	Separado por especies
Variables respuesta	Clara	A, D, E	A (control) D (clara 25%) E (clara 40%)
	Temperatura	°C	Mínima, máxima y media estacional
	Precipitación	mm	Acumulado estacional
	Humedad relativa	%	Media estacional
	Índice de Martonne	-	$I_m = \frac{P}{T + 10}$

Los modelos lineales mixtos se construyeron utilizando el software R (R Core Team, 2021). Se partió de un modelo lineal saturado para encontrar la variable aleatoria óptima para el modelo. Este modelo saturado contiene el mayor número posible de variables explicativas no correlacionadas entre sí y todas sus posibles interacciones. Las variables aleatorias contempladas fueron el año, la parcela, estación, y los anidamientos parcela en estación y parcela en año. Se construyó un modelo saturado para cada una de estas variables aleatorias, utilizando en todos ellos las mismas variables explicativas, y se seleccionó el mejor modelo en función de su AIC (Sakamoto et al., 1986). Se decidió usar como variable aleatoria en el modelo final aquella contenida en el mejor modelo. Una vez determinada esta variable aleatoria, se realizó una selección de las variables explicativas partiendo del modelo saturado, mediante la eliminación progresiva de variables, y de las interacciones entre variables, hasta hallar el modelo con el menor AIC, que sería escogido como modelo final. Este procedimiento se realizó para pino y roble por separado, obteniendo un modelo mixto estacional para cada especie.

Los modelos mixtos fueron construidos con la función *lme()* del paquete *nlme* (Pinheiro et al., 2021). También se usó el paquete *AICmodavg* para el cálculo del AIC corregido, que penaliza la adición de parámetros al modelo (Mazerolle, 2020). La librería *multcomp* se utilizó para realizar las comparaciones múltiples de Tukey entre los diferentes niveles de los factores estadísticamente significativos ($p>0.05$) (Hothorn et al., 2008). Las gráficas se realizaron con el paquete *ggplot2* (Wickham, 2016).

3.6. Concentración estacional de nutrientes

La concentración y el stock de los nutrientes en la hojarasca de pino y roble se agrupó en cuatro períodos de 6 meses: septiembre 2010-febrero 2011 (Período 1), marzo 2011-agosto 2011 (Período 2), septiembre 2011-febrero 2012 (Período 3), marzo 2012-agosto 2012 (Período 4). Las diferencias en las concentraciones y el stock de cada nutriente se comprobaron mediante una prueba ANOVA para cada par de períodos equivalentes (P1 y P3, P2 y P4), tratamientos de clara y especie. En caso de encontrar diferencias estadísticamente significativas ($p>0.05$), se han realizado pruebas de comparaciones múltiples de Tukey.

Las concentraciones y el stock de nutrientes se transformaron logarítmicamente para cumplir con el supuesto de normalidad de residuos y linealidad. En aquellos casos en los que la transformación tampoco lograba la normalidad de residuos, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis. La comparación entre los períodos 2 y 4 se realizó únicamente para el nitrógeno y el carbono, ya que no existen datos del resto de nutrientes para el período 4.

4. Resultados

4.1. Modelos de desfronde estacional

Las variables climáticas que mejor explican el patrón de desfronde estacional difieren para cada especie. En el caso del pino, el mejor modelo lineal mixto incluye la temperatura mínima (γ) como variable explicativa (**Ecuación 1**), mientras que, en el caso del roble, la variable que mejor explica el patrón de desfronde estacional es la humedad relativa (λ) (**Ecuación 2**). Ambos modelos incluyen el tratamiento de clara (β) como variable explicativa, y la estación (v) como variable aleatoria.

$$ld_{pino} = \beta + \gamma + v + \varepsilon \quad (\text{ec. 1})$$

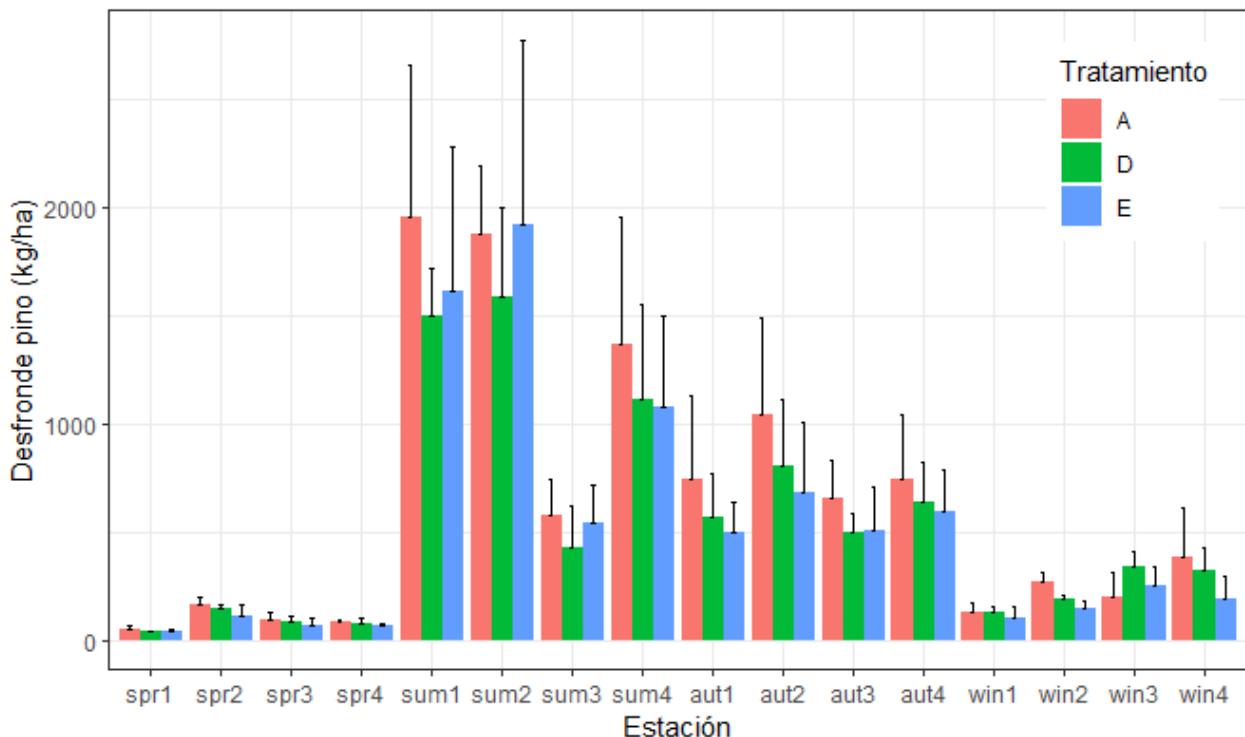
$$ld_{roble} = \beta + \lambda + v + \varepsilon \quad (\text{ec. 2})$$

Observando los coeficientes de los modelos ajustados (**tabla 2**), se observa que los tratamientos de clara reducen la cantidad de desfronde estacional en ambas especies con respecto al tratamiento control. La prueba post hoc de comparaciones múltiples de Tukey indica que hay diferencias entre los tratamientos de clara (D y E) y el control (A), sin embargo, no existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos tratamientos de clara (valor $p > 0.05$). Sin embargo, las variables climáticas tienen una mayor influencia sobre la producción de hojarasca en ambos modelos, especialmente en el caso del roble, en el que una mayor humedad relativa favorece la producción de hojarasca (**tabla 2**). En el modelo del pino, el aumento de las temperaturas mínimas favorece la producción de hojarasca (**tabla 2**).

Tabla 2. Coeficientes de los modelos lineales mixtos para el desfronde estacional por especies. Los parámetros significativos se indican en negrita, y el nivel de significancia con asteriscos (<0.05 , ** <0.01 , *** <0.001).*

Parámetro	<i>P. pinaster</i>	<i>Q. pyrenaica</i>
$\beta_1(\text{TrtD})$	- 0.200*	- 0.336**
$\beta_2(\text{TrtE})$	- 0.263**	- 0.465***
$\gamma (\text{Tmin})$	0.801*	-
$\lambda (\text{HR})$	-	3.455*
u (estación)	0.995	1.146
ϵ (error)	0.328	0.578

El periodo de mayor desfronde difiere en ambas especies, siendo en verano para el pino (**figura 1**) y en otoño para el roble (**figura 2**). La magnitud del desfronde también presenta diferencias entre ambas especies, siendo la producción de hojarasca de pino dos veces superior a la producida por el roble, tal y como se observa al comparar las gráficas de desfronde estacional (**figuras 1 y 2**).



*Figura 1. Desfronde estacional (kg/ha) de *Pinus pinaster* por tratamiento de clara (A: control, D: clara moderada - 25% AB-, E: clara intensa -40% AB-). Se muestra la media por tratamiento y las barras de error (media + desviación estándar). Las estaciones (spr: primavera, sum: verano, aut: otoño, win: invierno) están agrupadas por año (1: 2010, 2: 2011, 3: 2013, 4: 2014).*

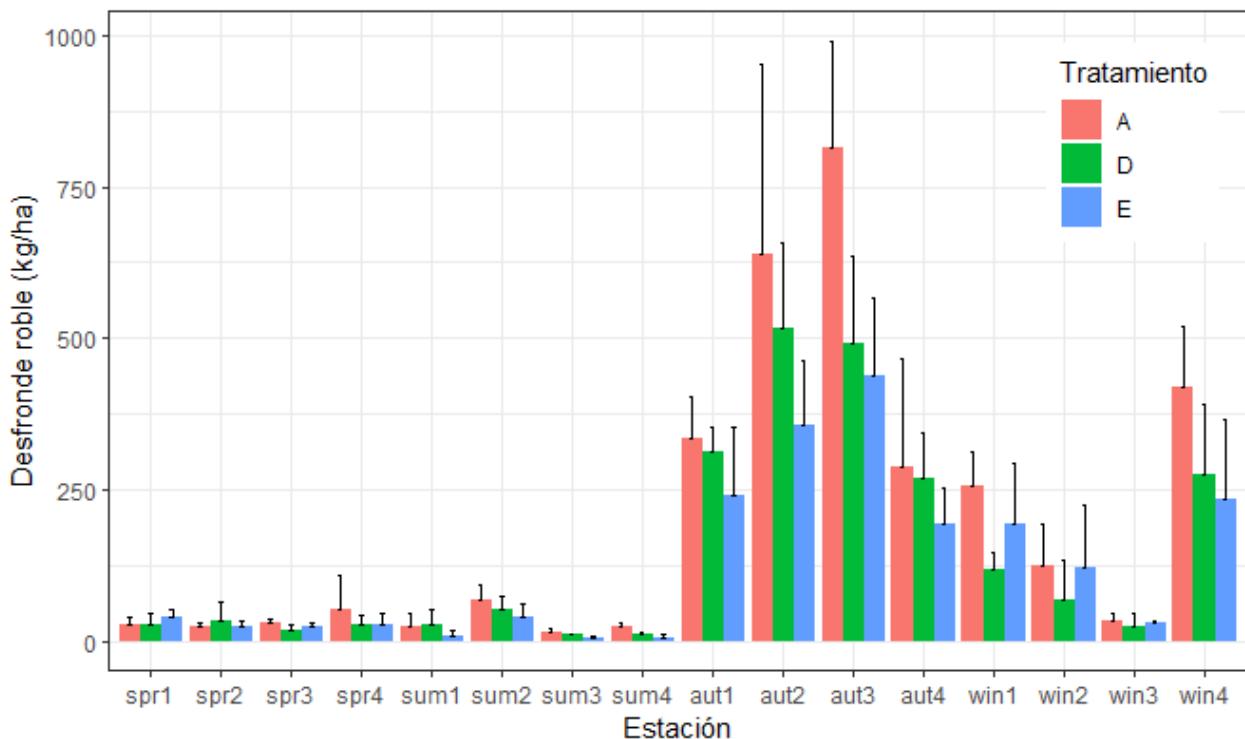


Figura 2. Desfronde estacional (kg/ha) de *Quercus pyrenaica* por tratamiento de clara (A: control, D: clara moderada -25% AB-, E: clara intensa -40% AB-). Se muestra la media por tratamiento y las barras de error (media + desviación estándar). Las estaciones (spr: primavera, sum: verano, aut: otoño, win: invierno) están agrupadas por año (1: 2010, 2: 2011, 3: 2013, 4: 2014).

4.2. Concentración de nutrientes

La concentración de los nutrientes analizados en la hojarasca durante el periodo de estudio varía según la especie y el periodo analizado. Para el pino, se observa un aumento del carbono, nitrógeno y magnesio en el periodo 3 (septiembre 2011 - febrero 2012) con respecto al periodo 1 (septiembre 2010 - febrero 2011) (**Tabla 3**). Carbono y nitrógeno también presentan diferencias estadísticamente significativas en los periodos de primavera – verano (periodos 2 y 4), produciéndose un aumento de ambos en el segundo año de estudio (periodo 4). El aumento en la concentración de nitrógeno en la hojarasca es de mayor magnitud que en el caso del carbono, provocando una reducción significativa en la relación C:N del periodo 2 al 4 (**Tabla 3**).

En el caso del roble, la concentración de carbono y nitrógeno fue superior en el primer periodo con respecto al tercero, mientras que el magnesio presenta la tendencia opuesta, aumentando en el tercer periodo (**Tabla 3**). La disminución significativa de la concentración de nitrógeno de la hojarasca produce a su vez una disminución de la relación N:P en el periodo 3 (**Tabla 3**). En los periodos de primavera – verano (periodos 2 y 4), tan sólo se produce un aumento significativo del carbono en el segundo año (periodo 4), provocando un aumento en la relación C:N para el mismo periodo (**Tabla 3**).

Tabla 3. Concentración (media ± DE) de los nutrientes presentes en la hojarasca en descomposición de ambas especies durante el periodo de estudio. Los periodos en estudio comprenden los siguientes meses: septiembre 2010-febrero 2011 (Periodo 1), marzo 2011-agosto 2011 (Periodo 2), septiembre 2011-febrero 2012 (Periodo 3), marzo 2012-agosto 2012 (Periodo 4). La concentración de nutrientes se expresan en porcentaje (%), y se incluye la relación Carbono:Nitrógeno y Nitrógeno:Fósforo. Se presentan los valores *p* de la prueba ANOVA, y se resaltan en negrita aquellas diferencias entre periodos estadísticamente significativas (*p*<0.05).

		Periodo 1	Periodo 3	valor p	Periodo 2	Periodo 4	valor p
C	<i>P. pinaster</i>	52.30 ± 1.94	51.81 ± 1.64	0.427	50.50 ± 4.40	54.43 ± 0.87	0.027
	<i>Q. pyrenaica</i>	50.96 ± 1.38	49.99 ± 1.31	0.057	44.76 ± 4.39	51.25 ± 1.19	0.018
N	<i>P. pinaster</i>	4.85 ± 1.08	4.50 ± 1.17	0.514	3.52 ± 0.74	5.42 ± 0.50	<.001
	<i>Q. pyrenaica</i>	9.50 ± 1.07	8.12 ± 1.87	0.079	10.71 ± 4.24	12.89 ± 3.41	0.366
P	<i>P. pinaster</i>	0.16 ± 0.04	0.19 ± 0.04	0.140	-	-	-
	<i>Q. pyrenaica</i>	0.26 ± 0.02	0.28 ± 0.05	0.387			
K	<i>P. pinaster</i>	1.02 ± 0.49	1.91 ± 0.70	0.009	-	-	-
	<i>Q. pyrenaica</i>	3.10 ± 0.84	3.98 ± 1.38	0.251			
Ca	<i>P. pinaster</i>	4.44 ± 0.79	5.62 ± 1.01	0.003	-	-	-
	<i>Q. pyrenaica</i>	9.75 ± 1.23	9.26 ± 1.67	0.293			
Mg	<i>P. pinaster</i>	1.74 ± 0.24	2.18 ± 0.34	<.001	-	-	-
	<i>Q. pyrenaica</i>	2.18 ± 0.25	2.38 ± 0.19	0.003			
C:N	<i>P. pinaster</i>	11.30 ± 2.79	12.06 ± 2.44	0.555	14.90 ± 3.03	10.10 ± 0.86	0.002
	<i>Q. pyrenaica</i>	5.43 ± 0.72	6.58 ± 2.13	0.138	5.09 ± 2.93	4.39 ± 1.85	0.610
N:P	<i>P. pinaster</i>	355.1 ± 104.9	289.2 ± 50.2	0.002	-	-	-
	<i>Q. pyrenaica</i>	196.6 ± 18.5	184.3 ± 40.2	<.001			

Las concentraciones de todos los nutrientes presentan diferencias estadísticamente significativas en ambas especies en las pruebas ANOVA realizadas (valor p < 0.05). En cambio, no existen diferencias entre especies en las relaciones C:P y N:P (**Tabla 3**). Excepto en el caso del carbono y de la relación C:N, las hojas del roble poseen una mayor concentración de nutrientes que las acículas del pino. Los tratamientos de clara no presentaron diferencias estadísticamente significativas en la concentración de ningún nutriente (valor p > 0.05).

4.3. Stock de nutrientes

El stock de nutrientes presenta mayores diferencias entre períodos que la concentración de nutrientes. En el caso del pino, todos los nutrientes presentan un aumento significativo de su stock en el tercer periodo (**Tabla 4**), y lo mismo sucede en el periodo 4 para carbono y nitrógeno, los dos nutrientes analizados en los períodos 2 y 4 (**Tabla 4**). El stock de nutrientes de la hojarasca de roble sigue el mismo patrón, sin embargo, las diferencias no son significativas en el caso del nitrógeno, el potasio y el calcio (**Tabla 4**).

Con respecto a las diferencias entre especies, las pruebas ANOVA indican que las diferencias entre el stock de ambas especies son significativas (valor p < 0.05), excepto en el caso del potasio. Las pruebas ANOVA para los tratamientos de clara solo presentaron diferencias estadísticamente significativas para el stock de potasio en el caso del pino (prueba de Tukey: A=D>E). En el caso del roble, existen diferencias entre tratamientos para el stock de calcio (prueba de Tukey: A>D=E) y de magnesio (prueba de Tukey: A=D>E).

Tabla 4. Stock (media ± DE) de los nutrientes presentes en la hojarasca en descomposición de ambas especies durante el periodo de estudio. Los periodos en estudio comprenden los siguientes meses: septiembre 2010-febrero 2011 (Periodo 1), marzo 2011-agosto 2011 (Periodo 2), septiembre 2011-febrero 2012 (Periodo 3), marzo 2012-agosto 2012 (Periodo 4). El stock de nutrientes se expresa en kg/ha. Se presentan los valores p de la prueba ANOVA, y se resaltan en negrita aquellas diferencias entre períodos estadísticamente significativas (p<0.05).

		Periodo 1	Periodo 3	p valor	Periodo 2	Periodo 4	p valor
C	<i>P. pinaster</i>	378.00 ± 155.24	542.50 ± 203.26	<.001	873.09 ± 271.38	1052.62 ± 303.44	0.011
	<i>Q. pyrenaica</i>	247.71 ± 78.92	302.79 ± 127.30	0.037	27.60 ± 6.51	44.21 ± 10.29	<.001

N	<i>P. pinaster</i> <i>Q. pyrenaica</i>	3.56 ± 1.84 4.49 ± 1.10	4.46 ± 1.30 5.04 ± 2.61	0.037 0.868	6.13 ± 2.58 0.65 ± 0.30	10.38 ± 2.58 1.11 ± 0.40	<.001 0.074
P	<i>P. pinaster</i> <i>Q. pyrenaica</i>	0.11 ± 0.06 0.13 ± 0.04	0.19 ± 0.07 0.17 ± 0.08	0.002 0.041	-	-	-
K	<i>P. pinaster</i> <i>Q. pyrenaica</i>	0.73 ± 0.37 1.56 ± 0.73	1.98 ± 0.90 2.37 ± 1.10	<.001 0.114	-	-	-
Ca	<i>P. pinaster</i> <i>Q. pyrenaica</i>	3.13 ± 1.13 4.67 ± 1.50	5.62 ± 1.63 5.78 ± 2.99	<.001 0.248	-	-	-
Mg	<i>P. pinaster</i> <i>Q. pyrenaica</i>	1.27 ± 0.59 1.06 ± 0.39	2.33 ± 1.05 1.46 ± 0.72	<.001 0.003	-	-	-

5. Discusión

5.1. Efecto de la clara y el clima sobre el desfronde

Los modelos lineales mixtos indican que los tratamientos de clara moderada e intensa reducen la cantidad de desfronde estacional a nivel de masa con respecto al tratamiento control tal y como otros estudios muestran (Blanco et al. 2006, Navarro et al. 2013, Novack et al 2020). Sin embargo, no parece que los tratamientos de clara sean diferentes entre sí, lo cual podría indicar que el bosque mixto de *P. pinaster* y *Q. pyrenaica* el impacto de ambos tipos de clara sobre el desfronde estacional son similares. Otros estudios en el mismo bosque han demostrado que el efecto de la clara sobre las dinámicas forestales es complejo, y que los cambios introducidos por la clara afectan también al incremento radial y a la tasa de descomposición de la hojarasca (Aldea et al., 2017; Bravo-Oviedo et al., 2017).

Las variables climáticas incluidas en los modelos lineales mixtos tienen una influencia mayor sobre la cantidad de desfronde que los tratamientos de clara (**tabla 2**). Durante el proceso de selección de los modelos, las interacciones entre el clima y la clara no fueron significativas en ningún caso. Asimismo, cada especie estudiada ve afectada su cantidad de desfronde estacional por una variable climática diferente, lo cual indica que las características de cada especie determinan en gran medida la respuesta de la misma a perturbaciones climáticas y antrópicas (Blanco et al. 2006).

En un escenario de cambio climático, la cantidad de hojarasca de pino aumentaría dado el aumento de las temperaturas. Sin embargo, si se produce una reducción de la humedad en la zona, esto afectaría a la producción de hojarasca del roble, lo cual podría afectar también al reciclaje de nutrientes en el bosque, pues en el clima mediterráneo el factor limitante para la descomposición de la hojarasca suele ser la humedad. Los máximos estacionales de cada especie parecen estar muy determinados por su fenología, y podrían ser sensible a eventos climáticos extremos como sequías. En un estudio de síntesis Liu et al (2004) encontraron un fuerte control climático entre coníferas y frondosas en Eurasia sugiriendo que futuros escenarios climáticos podrían afectar de forma diferencial ambos grupos funcionales. Sin embargo, dentro de la misma especie existen factores locales que aumentan la variabilidad en la cantidad de desfronde en zonas Mediterráneas (Andivia et al. 2018).

5.2. Concentración y stock de nutrientes en la hojarasca

La concentración de nutrientes parece ser característica de cada especie, aunque se observa un incremento en el segundo año en la mayoría de los casos, que podría estar mediado por la reducción de la competencia introducida por la clara, aunque no se ha detectado un efecto estadísticamente significativo de la clara en la concentración otros estudios indican una reducción de nutrientes (Lado-Montserrat et al. 2015; Bueis et al. 2018). La clara sí presenta una mayor influencia

sobre el stock de nutrientes, posiblemente a través de su efecto sobre la cantidad de desfronde estacional.

A pesar de que el roble produce una cantidad de hojarasca mucho menor en comparación con el pino, su stock de nutrientes es superior en muchos casos, debido a las diferencias en la concentración de nutrientes en las hojas del roble y las acículas del pino. Este resultado muestra las grandes diferencias que puede presentar cada especie con respecto a su participación en un proceso básico de la dinámica forestal, algo que debe ser tenido en cuenta a la hora de aplicar técnicas de manejo forestal como la clara.

6. Conclusiones

La reducción de la densidad entre un 25 y un 50% del área basimétrica de pinos en sistemas forestales pino-roble de los Montes de Toledo reduce la cantidad de desfronde aportado y varía de forma no significativa la concentración de nutrientes aumentando la durante el segundo año tras la clara. Existe un control climático en la cantidad de desfronde, independiente de la intensidad de clara, siendo la temperatura mínima en el pino (efecto positivo) y la humedad relativa en el roble (efecto positivo) las variables climáticas significativas.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos SUM2008-0002-00-00 y AGL2011-29701-C02-01 (PINES4CHANGE). MP agradece los comentarios de los compañeros del Museo Nacional de Ciencias Naturales durante su estancia dentro del programa JAE Intro 2019. Se reconoce el trabajo de Javier Rodríguez en la puesta en marcha del experimento de San Pablo de los Montes.

8. Bibliografía

ALDEA, J., BRAVO, F., BRAVO-OVIEDO, A., & RUIZ-PEINADO, R. (2017). Thinning enhances the species-specific radial increment response to drought in Mediterranean pine-oak stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238, 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.009>

ANDIVIA, E., BOU, J., FERNÁNDEZ, M., CARITAT, A., ALEJANO, R. VILAR, L., VAZQUEZ-PIQUÉ, J. (2018) Assessing the relative role of climate on litterfall in Mediterranean oak forests. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 11(6): 783-793.

BERG, B., LASKOWSKI, R. (2006). Litter decomposition: a guide to carbon and nutrient turnover. *Advances in Ecological Research* 38, Elsevier Academic Press 428 p.

BLANCO, J.A., BOSCO IMBERT, J., CASTILLO, F.J. 2006. Influence of site characteristics and thinning intensity on litterfall production in two *Pinus sylvestris* L. forests in the Western Pyrenees. *For. Eco. Manage.* 237: 342-352.

BLANCO, J.A., BOSCO IMBERT, J., CASTILLO, F.J 2008. Nutrient return via litterfall in two contrasting *Pinus sylvestris* forests in the Pyrenees under different thinning intensities. *For. Eco. Manage.* 256: 1840-1852.

BRAVO-OVIEDO, A., RUIZ-PEINADO, R., ONRUBIA, R., & DEL RÍO, M. (2017). Thinning alters the early-decomposition rate and nutrient immobilization-release pattern of foliar litter in

Mediterranean oak-pine mixed stands. *Forest Ecology and Management*, 391, 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.032>

BUEIS, T., BRAVO, F., PANDO, V., TURRIÓN, M.B. 2018. Local basal area affects needle litterfall, nutrient concentration and nutrient release during decomposition in *Pinus halepensis* Mill. Plantations in Spain. *Ann. For. Sci* 75: 21.

LADO-MONSERRAT, L., LIDÓN, A., BAUTISTA, I., 2015. Litterfall, litter decomposition and associated nutrient fluxes in *Pinus halepensis*: influence of tree removal intensity in a Mediterranean forest. *Eur. J. For. Res.* 134: 833–844.

LIU, C., WESTMAN, C.J., BERG, B., KUTSCH, W., WANG, G.Z., MAN, R., ILVESNIEMI, H. 2004. Variation in litterfall-climate relationships between coniferous and broadleaf forests in Eurasia. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 13(2):105-114.

HOTHORN, T., BRETZ, F., & WESTFALL, P. (2008). Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal*, 50(3), 346–363.

MAZEROLLE, M. J. (2020). *AICcmodavg: Model selection and multimodel inference based on (Q)AIC(c)* (R package version 2.3-1). <https://cran.r-project.org/package=AICcmodavg>

NAVARRO, F.B., ROMERO-FREIRE, A., DEL CASTILLO, T., FORONDA, A., JIMENEZ, M.N., RIPOLL, M.A., SÁNCHEZ-MIRANDA, A., HUNTSINGER, L., FERNÁNDEZ-ONDOÑO, E. (2013). Effects of thinning on litterfall were found after years in a *Pinus halepensis* afforestation area at tree and stand levels. *For. Eco. Manage.* 289, 354-362.

PINHEIRO, J., BATES, D., DEBROY, S., SARKAR, D., & R CORE TEAM. (2021). *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*. <https://cran.r-project.org/package=nlme>

R CORE TEAM. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>

ROIG, S., DEL RIO, M., CAÑELLAS, I., MONTERO, G. (2005). Litter fall in Mediterranean *Pinus pinaster* Ait. Stands under different thinning regimes. *For. Eco. Manage.* 206, 179-190.

SAKAMOTO, Y., ISHIGURO, M., & KITAGAWA, G. (1986). *Akaike Information Criterion Statistics*. Dordrecht, The Netherlands: D. Reidel.

VESALA, T., SUNI, T., RANNIK, Ü., KERONEN, P., MARKKANEN, T., SEVANTO., S., GRÖNHOLM, T., SMOLANDER, S., KULMALA, M., ILVESNIEMI, H., OJANSUU, R., UOTILA, A., LEVULA, J., MÄKELÄ, A., PUMPANEN, J., KOLARI, P., KULMALA, L., ALTIMIR, N., BERNINGER, F., NIKINMAA, E., HARI, P., 2005. Effect of thinning on surface fluxes in a boreal forest. *Global Biogeochem. Cycles* 19, 1–11. <https://doi.org/10.1029/2004GB002316>.

WICKHAM, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.