



J.A. Blanco\*, J.B. Imbert, F.J. Castillo

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias del Medio Natural, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, Navarra.

\* Correo electrónico: [juan.blanco@unavarra.es](mailto:juan.blanco@unavarra.es)

52

## Adaptación al cambio climático en pinares pirenaicos: controlando la densidad del rodal según el tipo de clima

### Resultados clave

- Las claras forestales alteran el microclima dentro del bosque, afectando tanto a la disponibilidad hídrica como a la disponibilidad de nutrientes. Estos efectos son distintos dependiendo de las características biogeoquímicas del suelo de cada bosque.
- El cambio climático puede afectar en el futuro a la disponibilidad hídrica pero también a la disponibilidad de nutrientes para los árboles al modificar las tasas de descomposición de hojarasca debido a un aumento de la temperatura y de la aridez.
- En bosques de los Pirineos occidentales, las claras pueden ayudar a la adaptación del bosque al cambio climático en condiciones hídricas limitantes, al mejorar la economía del agua y reducir la mortalidad potencial por sequía.
- En bosques continentales o sub-alpinos de los Pirineos occidentales la reducción de la limitación al crecimiento por temperatura y por un alargamiento del periodo vegetativo podría generar una oportunidad para generar más biomasa. Para aprovechar este crecimiento potencial los regímenes de claras actuales deberán modificarse para evitar un aclarado excesivo.

### Contexto

El pino albar o silvestre (*Pinus sylvestris* L.) es una de las especies más abundantes de Europa, siendo la península ibérica su límite suroeste de distribución. En Navarra, es la segunda especie más extendida, donde ocupa 60.414 ha (Vicente et al. 2004), el 17 % del área forestal total. En esta región, las actividades silvícolas en

estos bosques son muy importantes: la producción media anual es de 25.000 m<sup>3</sup> de madera de pino. Los rodales naturales de pino albar están localizados en el nordeste de la provincia, siendo la vegetación dominante en algunas áreas de los Pirineos: áreas con clima continental y con suelos poco profundos, donde las especies caducifolias no prosperan (Loidi y Báscones 1995, Rivas-Martínez 1987). El pino albar podría expandir su área de distribución, debido a la tendencia actual de un cambio en el clima hacia veranos más cálidos y secos.

La circulación de nutrientes en los pinares de pino silvestre se ve afectada de distinta forma en función de las condiciones biogeoclimáticas y del tipo de gestión (Blanco et al. 2005), por lo que pueden responder al cambio climático de manera distinta. Además, en muchos de los actuales pinares, los bosques originales estaban generalmente dominados por roble o haya, e individuos de estas especies todavía aparecen comúnmente en el sotobosque de los pinares, aunque normalmente son eliminados por claras en la primera mitad del turno forestal. Tras el abandono de las tierras agrícolas marginales desde los años 60 del siglo XX, todas las especies forestales, y en particular el pino silvestre, han expandido su abundancia y área de distribución (Gobierno de Navarra 1998). Además, la productividad relativa de pinos y hayas podría variar con el cambio climático, generando cambios en la estructura y productividad del bosque (Primicia et al 2013). Como resultado de estos posibles cambios en los procesos ecológicos de los bosques actuales junto a la aparición de nuevas masas forestales, existe una considerable incertidumbre en relación a las pautas futuras de crecimiento de los rodales de pino en esta región, incluyendo su respuesta al cambio climático. Una de las mejores herramientas para reducir esta incertidumbre consiste en el uso de modelos que simulan los procesos ecológicos y que además permiten simular los efectos de la gestión forestal. Para ello, estos modelos deben estar

construidos sobre una sólida base de datos de campo procedentes de inventarios y estudios de seguimiento, que también deben usarse para calibrar y evaluar esos modelos (Blanco et al. 2005). Estas herramientas se necesitan urgentemente para facilitar la adaptación de la silvicultura navarra al cambio climático y a las nuevas tendencias socio-económicas y de gestión forestal. Así, la gestión forestal y las condiciones climáticas que determinan el crecimiento de los bosques en los Pirineos están experimentando cambios dramáticos. La expansión del arbolado en áreas agrícolas y pastizales abandonados, el consiguiente aumento de la evapotranspiración, junto con una paulatina reducción en las precipitaciones están reduciendo la disponibilidad hídrica para los bosques pirenaicos (Resco de Dios et al. 2007, López-Moreno et al. 2008). Además, la intensificación de la extracción de madera y biomasa de los bosques puede conducir a una reducción en la disponibilidad de nutrientes (Blanco et al. 2005). Sin embargo, hasta ahora no se ha realizado una evaluación detallada de los efectos de estos cambios simultáneos en los pinares pirenaicos de Navarra. Este informe representa una primera contribución para clarificar estas interacciones y estimar sus condiciones a largo plazo en la productividad de los bosques.

El grupo de Ecología y Medio Ambiente de la UPNA lleva 15 años estudiando los efectos de la gestión forestal en los procesos ecológicos de los bosques de pino silvestre de Navarra, con el objetivo de entender los efectos de la gestión forestal sobre el ciclo de nutrientes y la productividad de estos bosques. En este informe se describen algunos de los principales resultados de estas investigaciones en dos rodales experimentales de pino silvestre situados en el Pre-pirineo mediterráneo

(localidad de Aspuz) y en el Pirineo continental-subalpino (localidad de Garde), y sus implicaciones para la evolución futura de estos bosques bajo dos escenarios futuros de cambio climático.

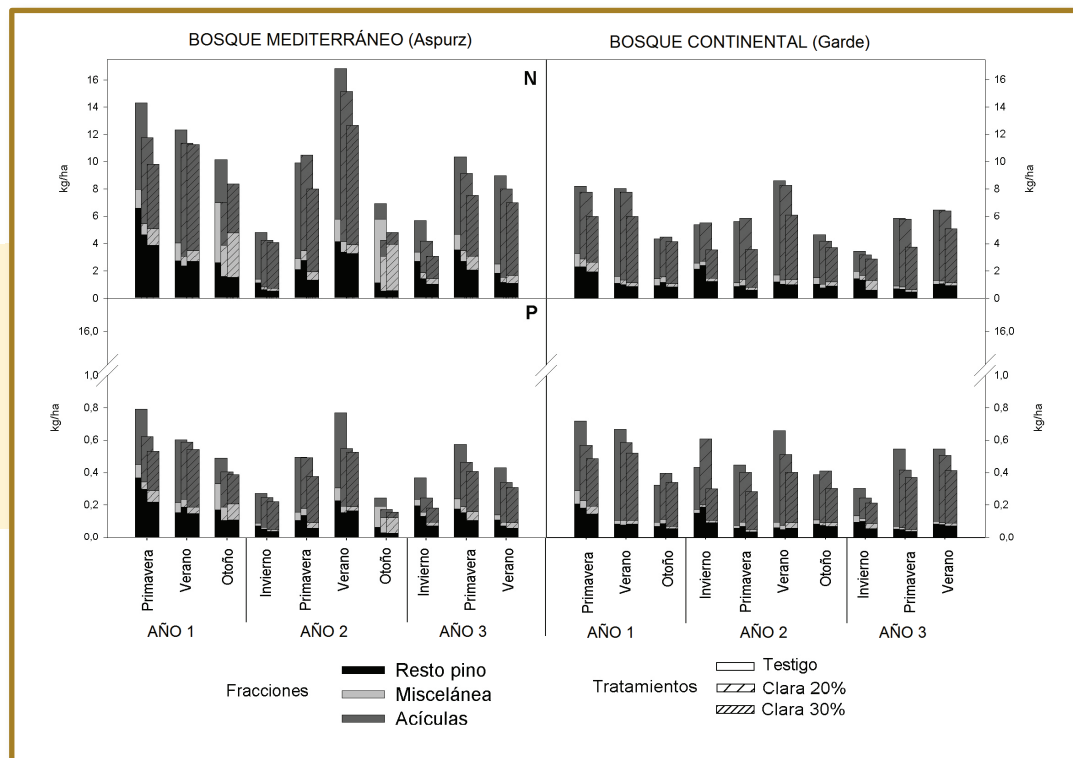
## ■ Adaptación

### Efectos sobre el ciclo de nutrientes

Las claras tienen varios efectos directos en el ecosistema forestal. En primer lugar, reducen la masa del dosel arbóreo al retirar parte de los árboles (Blanco et al. 2006a). La consecuencia directa de esta reducción es que la parte de biomasa aérea que cada año muere y se renueva (hojas secas, ramas, etc.) también se reduce (Figura 1). Por lo tanto, las claras tienen un primer efecto en los ciclos de nutrientes, ya que reducen tanto la cantidad de elementos minerales (nitrógeno, fósforo, potasio, etc.) como la materia orgánica total que se depositan sobre el suelo forestal. Esto podría suponer una ralentización del movimiento de nutrientes entre los árboles y el suelo, al menos hasta que los árboles que quedan tras las claras vuelvan a cerrar el dosel arbóreo tras desarrollar sus ramas (Blanco et al. 2006b).

Por otro lado, las claras también pueden afectar a la manera en que los árboles utilizan los nutrientes. Al reducirse el número de árboles, la competencia por los nutrientes también puede verse reducida. Dependiendo de las características particulares de cada rodal y del nutriente en cuestión, en algunos casos, los árboles que quedan tras las claras podrían ser menos eficientes en el uso de los nutrientes (p.e. en Garde para P, K y Mg, Figura

■ Figura 1.



▲ **Figura 1.** Producción estacional de desfronde (materia orgánica muerta que cae de las copas de los árboles) en dos rodales de pino silvestre sometidos a tres tratamientos de claras situados en dos localidades de los Pirineos navarros, durante tres años consecutivos. La intensidad de clara indica el porcentaje de área basal cortado. Las fracciones de desfronde fueron acículas (hojas de pino secas), resto de pino (ramas, corteza y piñas) y miscelánea (otra materia orgánica no procedente de los pinos, principalmente hojas de frondosas como el haya). N: Nitrógeno, P: Fósforo.

Fuente: Elaborado a partir de Blanco et al. (2006b).

Figura 2.

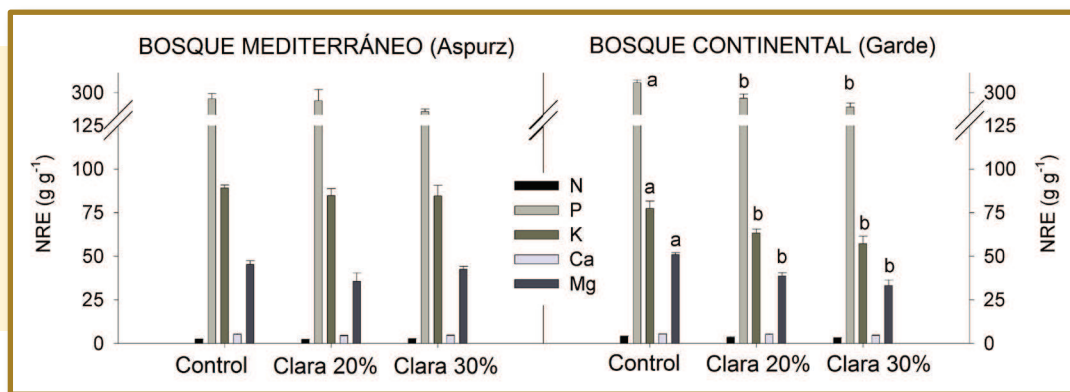


Figura 2. Eficiencia en la respuesta al uso de nutrientes (NRE: gramos de masa foliar generados por gramo de nutriente mineral) en dos rodales de pino silvestre sometidos a tres tratamientos de claras situados en dos localidades de los Pirineos navarros. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey HSD).

Fuente: Elaborado a partir de Blanco et al. (2009).

2), aumentando la concentración de los mismos en sus tejidos para mejorar sus reservas sin que haya un aumento proporcional en la biomasa del árbol. Este fenómeno, sin embargo, parece estar relacionado tanto con la calidad del sitio donde crece el bosque (que depende de la combinación de disponibilidad de luz, humedad y nutrientes), así como del tipo de clara. Una clara por lo bajo que elimina principalmente individuos muertos o enfermos que usan pocos nutrientes posiblemente tenga pocas consecuencias en la eficiencia en la que los árboles dominantes utilizan esos elementos minerales (Blanco et al. 2009). Este fue probablemente el caso de la clara realizada en Aspuz en 1999.

Las claras, además, pueden influir de forma importante en la velocidad a la que se descompone la hojarasca que ha caído al suelo del bosque. Al reducir el número de árboles se busca incrementar la luz disponible para los árboles que quedan. Sin embargo, también aumenta la luz y el viento que llegan al suelo forestal. Esto produce que en ambientes fríos (como el continental o alpino), la hojarasca se descomponga más rápidamente ya que al estar más caliente la actividad de los descomponedores aumenta. Este fenómeno se ha descrito comúnmente en ambientes de Norte América y Norte Europa (Prescott 2010). Sin embargo, en

ambientes templados o cálidos (como el mediterráneo) la hojarasca además de calentarse se seca, por lo cual los descomponedores reducen su actividad. Esto se traduce en un retardo en la descomposición de los restos vegetales (Figura 3) que conlleva un almacenamiento de sus nutrientes minerales por más tiempo sin que puedan aprovecharlos los árboles (Blanco et al. 2011). Esta interacción entre claras, microclima y disponibilidad de nutrientes puede tener importantes consecuencias a largo plazo, especialmente cuando se considera el cambio climático esperado que previsiblemente aumentará el número e intensidad de eventos de sequía, y por lo tanto reducirá aún más la descomposición de la hojarasca, con lo que los nutrientes estarán secuestrados más tiempo en la misma.

### Efectos sobre el crecimiento y productividad

Si el clima futuro se mantuviese en los rangos de precipitación y temperatura registrados hasta el momento, el rodal más mediterráneo sufriría algunos episodios de limitación hídrica de forma natural durante los veranos calurosos; en estas condiciones en el que las sequías no son excesivamente severas, los árboles más jóvenes suelen ser más vulnerables a la sequía debido a un menor desarrollo del sistema radicular. Sin embargo,

Figura 3.

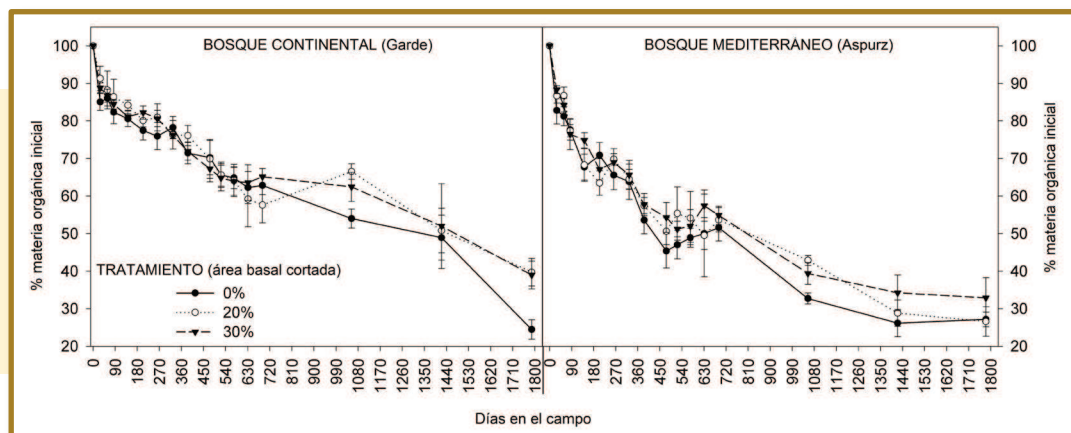


Figura 3. Pérdida de masa durante 5 años en acículas de pino situadas sobre el suelo forestal en dos rodales de pino silvestre sometidos a tres tratamientos de claras situados en dos localidades de los Pirineos navarros.

Fuente: Elaborado a partir de Blanco et al. (2011).

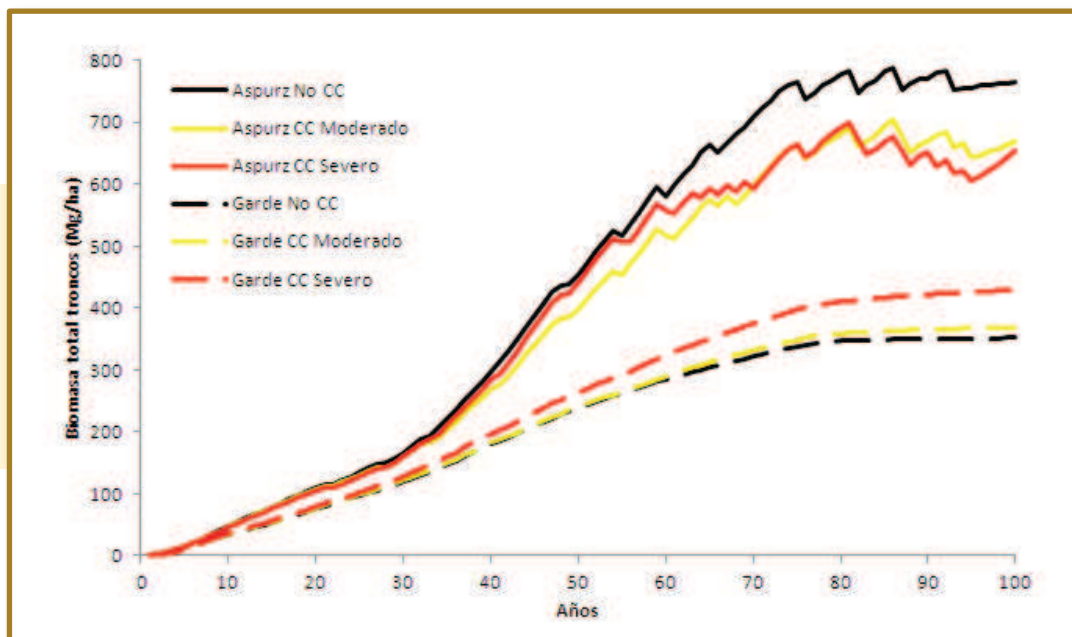
en un escenario de paulatina intensificación del cambio climático, los efectos de la sequía sobre la biomasa del rodal serían más negativos al afectar a árboles maduros, ya que a la reducción en las precipitaciones se le añadiría una mayor competencia por el agua disponible en el suelo cuanto más desarrollados estén los árboles (Seely et al. 1997). Como consecuencia, se espera que ocurran episodios más frecuentes de mortalidad natural relacionada con episodios de estrés hídrico y que ya aparecen de forma periódica en el clima actual. Sin cambio climático, estos episodios serían más notables en la segunda mitad de la vida del rodal (árboles de 50 a 100 años de edad). Esta mortalidad provocaría una reducción momentánea de la biomasa aérea de los troncos al morir algunos de los árboles, pero el resto crecería posteriormente más, compensando esas pérdidas (Figura 4). En otras palabras, las sequías funcionarían como un evento de autoaclareo. Sin embargo, ante escenarios de cambio climático, se producirían más episodios de limitación hídrica cuanto mayor sea el calentamiento y la reducción de las precipitaciones, que provocarían una mayor mortalidad. Esto se traduciría en un menor crecimiento de todos los árboles, y en conjunto en un descenso de la productividad del rodal (Figura 4). Bajo un escenario de cambio climático severo, el aumento de las temperaturas en otoño permitiría un alargamiento del período vegetativo en primavera y otoño, periodos con mayor disponibilidad hídrica, que en parte compensaría la mayor frecuencia e intensidad del déficit hídrico del verano. Este fenómeno podría asemejarse a una clara fuerte inicial, y podría favorecer el crecimiento de los árboles jóvenes que aún no compiten de forma intensa por el agua del suelo. Sin embargo, cuando los árboles superan los 60 años de edad, esa ventaja se pierde al aumentar la intensidad de los episodios de mortalidad, y en conjunto la productividad en un escenario de cambio climático severo se reduce por debajo del escenario de cambio climático moderado en el bosque mediterráneo

(Figura 4). Esto podría indicar la necesidad de realizar claras intensas hacia los 60 años de edad.

La limitación por agua disponible para los árboles es mayor en el bosque mediterráneo (Aspurz) que en el continental (Garde, Figura 4). En ambos bosques la disponibilidad se reducirá debido al incremento de aridez. Sin embargo, en Garde la disponibilidad de agua será suficiente para evitar eventos de mortalidad por sequías. Como consecuencia, en Garde la productividad del rodal aumentaría al aumentar la intensidad del incremento de temperaturas (Figura 4). Esto se debe a que en esta localidad la variable limitante del crecimiento es la temperatura y no la humedad (Blanco et al. 2006). Un aumento de las temperaturas alargaría la duración del periodo de crecimiento de los árboles, sin que la reducción esperada en la precipitación fuera suficiente para causar una reducción del crecimiento o episodios de mortalidad. Por lo tanto, en este caso, realizar claras preventivas en este bosque continental podría no ser necesario, e incluso suprimiéndolas se podría evitar la pérdida del aumento de crecimiento y productividad que se produciría si se eliminan árboles.

La sequía estival es una de las principales causas de limitación del crecimiento del pino silvestre en sus límites de distribución meridional y occidental (Bogino et al. 2009, Primicia et al. 2013, Martínez-Vilalta et al. 2012), de forma similar a otros pinos presentes en la península ibérica (Candel-Pérez et al. 2012, Sánchez-Salguero et al. 2012). Los cambios en productividad de las zonas en explotación podrían tener consecuencias económicas importantes. Por ejemplo, si los rodales estudiados están ahora clasificados, en base a su productividad, como de calidad “alta” en Aspuz y de calidad “media-baja” en Garde (Puertas 2003), en el futuro la clasificación podría invertirse. Todos estos resultados sugieren la necesidad de realizar claras en el

■ **Figura 4.**



▲ **Figura 4.** Evolución futura de la biomasa de troncos de árbol en dos rodales de pino silvestre no sometidos a gestión forestal en dos localidades de los Pirineos navarros (Aspurz: clima mediterráneo; Garde: clima continental) bajo tres escenarios climáticos distintos. Ver Material Suplementario para una descripción de los tipos de clima y escenarios climáticos.

Fuente: Elaboración propia.

bosque mediterráneo para reducir la competencia por los recursos hídricos entre los árboles, adelantándose de esta forma a la mortalidad natural que muy posiblemente se verá aumentada hacia finales del siglo XXI. Estas claras podrían ser un instrumento que facilite la adaptación del bosque al cambio climático (Martínez-Vilalta et al. 2012, Lloret 2012). Sin embargo, aunque esta medida de adaptación podría ser efectiva en rodales jóvenes, también podría ser contraproducente si los árboles que han crecido en rodales de baja densidad alcanzan grandes tamaños a edades avanzadas, pudiendo demandar más agua que un rodal sin aclarar (D'Amato et al. 2013).

El cambio climático puede tener otros efectos en el ecosistema. Según nuestras estimaciones, un aumento en la temperatura puede aumentar la velocidad a la que se descompone el humus y la hojarasca, al aumentar la actividad de los organismos que trocean, consumen y descomponen la hojarasca. Sin embargo, una reducción en la precipitación podría provocar el efecto contrario, reduciendo la velocidad a la que se descompone la materia orgánica del suelo al reducirse la disponibilidad de agua para los organismos descomponedores. Este efecto refleja el doble papel limitante de la temperatura y la precipitación en la descomposición de hojarasca en estos bosques (Blanco et al. 2011). Los cambios simultáneos en precipitación y temperatura podrían tener efectos difíciles de predecir de forma intuitiva, siendo necesario utilizar modelos de simulación para predecir sus resultados a nivel de ecosistema.

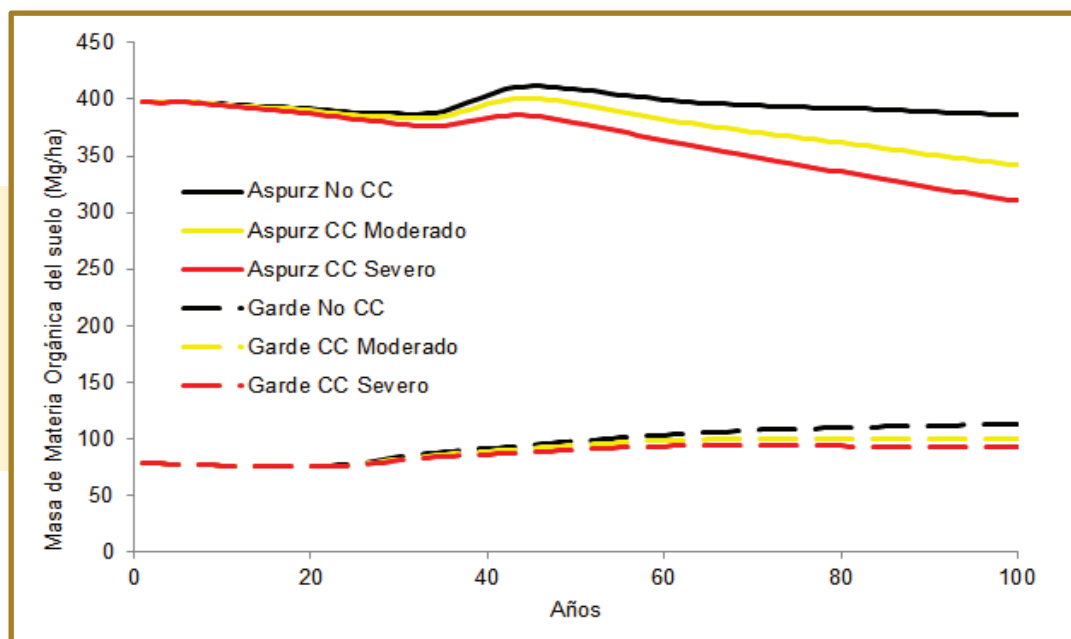
La reducción de las tasas de descomposición de la hojarasca en Aspurz tiene por lo tanto el efecto de reducir las pérdidas de nutrientes, reteniéndolos durante más tiempo en la materia orgánica del suelo. Sin embargo, según avanza el cambio climático, la masa de hojarasca disminuiría en el bosque mediterráneo por una reducción importante en la entrada de hojarasca fresca

debido a la mortalidad y reducción de productividad del dosel arbóreo en Aspurz (Figura 5). En el bosque continental el aumento en las tasas de descomposición se compensaría con una mayor producción de hojarasca, dejando la masa de hojarasca con pocos cambios. Blanco et al. (2005) describieron un posible riesgo de pérdida de fósforo (y en menor medida de nitrógeno a largo plazo) por sobreexplotación, si se realizaban claras muy intensas y frecuentes en Aspurz. Los resultados de nuestras investigaciones indican que este riesgo podría ser incluso mayor en el futuro, si las pérdidas por lixiviación aumentan en Aspurz al reducirse el número de árboles que utilizan nutrientes, y dejándolos más expuesto al lavado. Sin embargo, con menores precipitaciones también disminuyen las pérdidas de nutrientes del ecosistema que pueden ser arrastrados por el agua de lixiviación del suelo en la segunda mitad del turno. Por otro lado, en áreas de los mismos rodales en las que el pino silvestre está presente junto con el haya, estas pérdidas podrían ser menores al haber una mayor interceptación de agua de precipitación en el dosel arbóreo (Primicia et al. 2013). Esto induce a pensar que otra forma de adaptación al cambio climático de los bosques gestionados podría ser favorecer su transformación hacia masas más mixtas, con una estructura del dosel más desarrollada (Lloret 2012). La complejidad de estos procesos de nuevo indica la necesidad de estimar los flujos de nutrientes de forma conjunta a los cambios de precipitación y temperatura.

#### Limitaciones y futuros estudios

Nuestros resultados indican la necesidad de continuar el estudio de estos ecosistemas para mejorar la comprensión de los procesos estudiados así como para solucionar algunas de las limitaciones propias de los métodos utilizados. En primer lugar, es necesario comparar las estimaciones aquí presentadas con datos independientes de campo para evaluar el grado de ajuste

■ **Figura 5.**



▲ **Figura 5.** Evolución de la masa de materia orgánica del suelo en dos rodales de pino silvestre no sometidos a gestión forestal en dos localidades de los Pirineos navarros (Aspurz: clima mediterráneo; Garde: clima continental) bajo tres escenarios climáticos distintos.

Fuente: Elaboración propia.

del modelo con cambios reales en la productividad de los árboles causados por cambios en el clima. Para ello es necesario generar una serie histórica de crecimiento de los árboles, utilizando técnicas dendrocronológicas. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que la calibración de los parámetros para simular los procesos ecológicos que tienen lugar en el suelo es más complicada que los procesos relacionados con los árboles, ya que los datos de campo están sometidos a mayor variabilidad e incertidumbre, por lo que son necesarios muestreos de campo adicionales para reducir esa incertidumbre. De forma similar, la información disponible para calibrar los procesos relacionados con los árboles es mucho más amplia y de mayor exactitud que la disponible para calibrar los procesos ecológicos relacionados con el sotobosque. Además, es necesario resaltar que los valores utilizados para determinar el umbral e intensidad de la mortalidad son provisionales. Estos valores han sido escogidos siguiendo las recomendaciones de Blanco (2012) y Dordel et al. (2011) para calibrar el modelo de simulación de disponibilidad hídrica de FORECAST-Climate. El grupo de Ecología de la UPNA posee algunos datos preliminares de mortalidad que se expandirán con nuevas medidas para modificar las asunciones preliminares utilizadas en este estudio. Además, el presente trabajo presenta la modelización únicamente de rodales puros de pino, y el siguiente paso supondrá la simulación de rodales mixtos pino-haya.

### ■ Recomendaciones para su aplicación

Nuestros resultados indican que habrá reducciones de la productividad en los rodales de pino silvestre con clima mediterráneo como consecuencia del incremento de la frecuencia e intensidad del estrés hídrico que puede reducir el crecimiento de los árboles e incluso provocar su mortalidad. Por lo tanto, serían necesarias medidas silvícolas que palíen en la medida de lo posible el estrés hídrico, como podría ser aclarar las masas pero manteniendo en lo posible el nivel de sombreado. Además, se podrían llevar a cabo medidas de control del sotobosque para reducir su competencia por humedad con los árboles, pero de nuevo con cuidado de mantener la cobertura del suelo para evitar su desecación. Por otro lado, en los rodales situados a mayor altura, con un clima continental más frío y húmedo que el mediterráneo, es posible que la productividad y crecimiento de los árboles aumenten, ya que las temperaturas más altas alargarán el periodo de crecimiento activo de los árboles mientras que la reducción en la precipitación no será suficiente para provocar un incremento en los episodios de estrés hídrico. Por lo tanto, la realización de claras en estos rodales no sería una medida necesaria para facilitar la adaptación de estos bosques al cambio climático. Sin embargo, en bosques boreales se ha recomendado el aumento en la intensidad de clara para aprovechar al máximo el aumento del crecimiento potencial en condiciones de cambio climático (Briceño-Elizondo et al. 2006).

### ■ Material suplementario

El número total de parcelas experimentales utilizadas en nuestras investigaciones es de 18, divididas en dos sitios de ensayo. Las parcelas experimentales están situadas en dos ensayos de claras llevadas a cabo en 1999 y mantenidas por el Gobierno de Navarra

en dos rodales naturales de pino silvestre. El primer sitio (Aspurz) tiene un clima mediterráneo fresco, precipitación anual 912 mm, temperatura media 11.2 °C, 650 m de altitud, 10% de pendiente media y orientación Norte. En este sitio se realizó una segunda clara en 2009. El segundo sitio (Garde) tiene un clima continental fresco, precipitación anual 1268 mm, temperatura media 7.6 °C, 1350 m de altitud, una pendiente media de 45% y orientación Noroeste. En cada sitio, el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Navarra georreferenció las posiciones de todos los pinos y midió algunos de sus atributos (diámetros a la altura de pecho, alturas y clases sociológicas). Los dos sitios han sido extensivamente monitoreados durante más de 14 años por el Grupo de Ecología de la UPNA, con medidas mensuales y estacionales de tasas de descomposición de hojarasca, producción de hojarasca, reabsorción de nutrientes, respiración del suelo, nutrientes en el suelo, deposición atmosférica, tasas de crecimiento y registros meteorológicos.

El estudio de desfronde se realizó colocando 81 cestas en cada bosque para recoger la hojarasca caída mensualmente durante 2 años y medio. El estudio de descomposición de la hojarasca se realizó utilizando bolsas de descomposición de PVC perforadas que contenían 10 g de hojas de pino recién caídas. Aproximadamente 425 de estas bolsas se depositaron en cada localidad de estudio, recogiendo de forma periódica durante 5 años, para estimar la pérdida de peso. El estudio de retranslocación se realizó cortando 27 ramas vivas de cada bosque y comparando la concentración de nutrientes en las hojas verdes y secas. Además, se hicieron calicatas en cada bosque y análisis de suelo. Esta base de datos ecológica ha sido de gran valor para calibrar muchos de los parámetros de FORECAST-Climate.

Para estimar los efectos del cambio climático en el crecimiento de los árboles se utilizaron las predicciones para Navarra de dos escenarios climáticos (A2: cambio climático severo, B2: cambio climático moderado). Los escenarios climáticos se han dividido en tres periodos de calentamiento gradual. Para el período final (2080-2100) los escenarios han sido: escenario de no cambio, cambio moderado (aumento de 2° C en verano, descenso de la precipitación de 20 mm en verano), y cambio severo (aumento de 2°C en otoño-invierno, 4°C en primavera y 6°C en verano, descenso de la precipitación en 20 mm en primavera y 40 en verano) (basado en datos de Moreno-Rodríguez 2005).

Para simular el crecimiento de los pinos y la evolución de la materia orgánica del suelo se utilizó FORECAST-Climate, un simulador de la dinámica de los ecosistemas forestales a nivel de rodal orientado al manejo forestal (Kimmins et al. 1999). Es un modelo ecosistémico (simula suelo, sotobosque, clima y árboles), no espacial (no tiene en cuenta las posiciones en el espacio de los árboles), determinístico (no hay simulaciones de eventos generados al azar, sino que todos los eventos los debe describir el usuario del modelo) y que calcula valores a escala de rodal y en periodos anuales. Este modelo ha sido diseñado para simular una amplia variedad de sistemas silvícolas, con el objetivo de comparar y contrastar sus efectos sobre la productividad del bosque, la dinámica del rodal y una amplia serie de indicadores biofísicos y valores alternativos a la madera. El modelo FORECAST ha sido utilizado como una herramienta de evaluación de perturbaciones naturales y

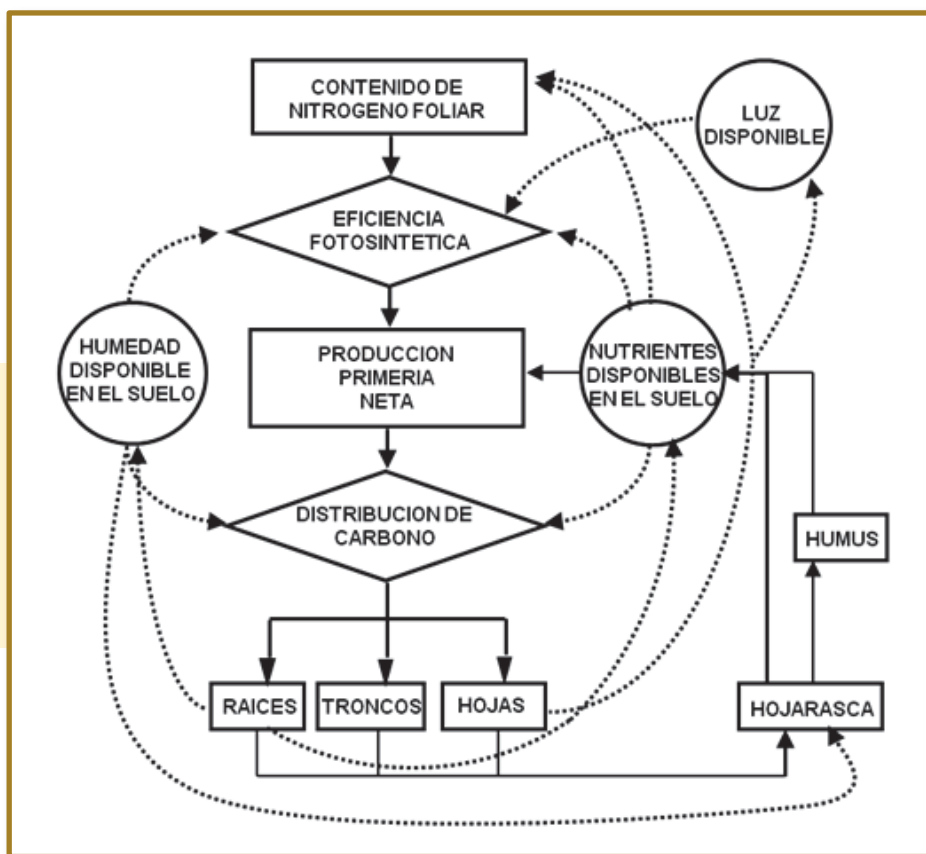
antropogénicas del ecosistema forestal (manejo forestal, contaminación atmosférica, agro-silvicultura, etc.) en bosques tropicales, templados y boreales (ver una lista de sus aplicaciones en Kimmins et al. 2010).

La proyección del crecimiento del rodal y la dinámica del ecosistema está basada en la representación de las tasas de procesos ecológicos clave que regulan la disponibilidad y competición por luz, nutrientes y agua (Figura 6). El modelo utiliza un enfoque híbrido, en el cual se combinan datos locales de crecimiento y producción con simulación de procesos ecológicos. Datos empíricos de curvas de biomasa para distintas edades, obtenidos combinando ecuaciones alométricas con datos de altura y diámetro (provenientes de mediciones de campo y completados con datos de tablas de crecimiento tradicionales o de estudios de cronosecuencias), indican al modelo las pautas de crecimiento esperadas. El crecimiento de la vegetación se lleva a cabo en incrementos anuales. Estos valores de biomasa se combinan con datos empíricos de concentración de nutrientes para calcular estimaciones de las tasas de procesos ecosistémicos clave relacionados con la productividad (absorción de nutrientes, producción fotosintética, descomposición de hojarasca y restos leñosos), y los requerimientos de recursos de las especies seleccionadas asociados a esos procesos. Esta información se combina con datos que describen tasas de descomposición, ciclo de nutrientes, competición por luz y otras propiedades ecosistémicas, permitiendo simular el crecimiento del bosque bajo diferentes alternativas de manejo. La descomposición se simula utilizando un método en el cual componentes específicos de la biomasa aérea son transferidos en el

momento de su abscisión a una serie de tipos de hojarasca independientes. Estos tipos de hojarasca se descomponen y cambian de composición química a unas tasas definidas por datos empíricos, procedentes de trabajos de campo o de la literatura.

Para calcular las tasas de crecimiento anuales del pino silvestre presente en la simulación, se simulan entre otros los siguientes procesos principales: 1) Eficiencia fotosintética por unidad de masa foliar basada en las relaciones entre masa foliar, autosombreado y productividad primaria neta tras estimar la producción de hojarasca y mortalidad; 2) Absorción de nutrientes requeridos para el crecimiento basada en las tasas de crecimiento proporcionadas por datos de campo o bibliográficos de concentración de nutrientes en distintos tejidos de los árboles creciendo en sitios de distinta calidad; 3) Medidas de mortalidad de árboles y ramas relacionadas con la disponibilidad de luz, derivadas de datos de densidad de árboles en el rodal y combinadas con la simulación de luz en el perfil del dosel arbóreo. Los niveles de luz, sombreado y mortalidad de árboles se estiman para cada especie simulada; 4) Estrés hídrico creado por evapotranspiración, representado por medio del índice de deficiencia de transpiración (TDI) (Seely et al. 1997). El valor diario de TDI representa el grado en el que una especie es capaz de cubrir sus demandas de transpiración. Cuando el TDI aumenta, los árboles y plantas reducen su intercambio de gases con la atmósfera para evitar la pérdida de agua y en consecuencia hay una reducción asociada en la producción fotosintética y por lo tanto en el crecimiento.

■ Figura 6.



▲ Figura 6. Representación esquemática de los procesos clave (rombos), interacciones (líneas de puntos), flujos de masa (líneas continuas) y reservorios (rectángulos) de los distintos componentes del ecosistema simulados en FORECAST-Climate.

Fuente: Elaborado a partir de Kimmins et al. (1999).

## ■ Referencias bibliográficas

- Blanco JA (2012) Forests may need centuries to recover their original productivity after continuous intensive management: an example from Douglas-fir. *Science of the Total Environment* 437:91-103
- Blanco JA, Imbert JB, Castillo FJ (2006a) Effects of thinning on nutrient pools in two contrasting *Pinus sylvestris* L. forests in the western Pyrenees. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21:143-150
- Blanco JA, Imbert JB, Castillo FJ (2006b) Influence of site characteristics and thinning intensity on litterfall production in two *Pinus sylvestris* L. forests in the Western Pyrenees. *Forest Ecology and Management* 237:342-352
- Blanco JA, Imbert JB, Castillo FJ (2009) Thinning affects nutrient resorption and nutrient-use efficiency in two *Pinus sylvestris* stands in the Pyrenees. *Ecological Applications* 19:682-698
- Blanco JA, Imbert JB, Castillo FJ (2011) Thinning affects *Pinus sylvestris* needle decomposition rates and chemistry differently depending on site conditions. *Biogeochemistry* 106:397-414
- Blanco JA, Zavala MA, Imbert JB, Castillo FJ (2005) Sustainability of forest management practices: Evaluation through a simulation model of nutrient cycling. *Forest Ecology and Management* 213:209-228
- Bogino S, Fernández Nieto MJ, Bravo F (2009) Climate effect on radial growth of *Pinus sylvestris* at its southern and western distribution limits. *Silva Fennica* 43:609-623
- Briceño-Elizondo E, García-Gonzalo J, Peltola H, Matala J, Kellomäki S (2006) Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to Climate change and forest management in boreal. *Forest Ecology and Management* 232:152-167
- Candel-Pérez D, Lucas-Borja ME, Linares JC (2012) Predicciones del crecimiento en poblaciones de pino laricio (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*) bajo diferentes escenarios futuros de cambio climático. *Ecosistemas* 21:41-49
- D'Amato AW, Bradford JB, Fraver S, Palik BJ (2013) Effect of thinning on drought vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems. *Ecological Applications* 23:1735-1742
- Dordel J, Seely B, Simard SW (2011) Relationships between simulated water stress and mortality and growth rates in underplanted *Toonaciliata* Roem. in subtropical Argentinean plantations. *Ecological Modelling* 222:3226-3235
- Gobierno de Navarra (1998) *Plan forestal de Navarra*. Gobierno de Navarra, Pamplona
- Kimmins JP, Mailly D, Seely B (1999) Modelling forest ecosystem net primary production: the hybrid simulation approach used in FORECAST. *Ecological Modelling* 122:195-224
- Kimmins JP, Blanco JA, Seely B, Welham C, Scoullar K (2010) *Forecasting Forest Futures: a hybrid modelling approach to the assessment of sustainability of forest ecosystems and their values*. Earthscan, London
- Lloret F (2012) Vulnerabilidad y resiliencia de ecosistemas forestales frente a episodios extremos de sequía. *Ecosistemas* 21:85-90
- Loidi J, Bascónes J (1995) *Mapa de series de vegetación de Navarra*. Gobierno de Navarra, Pamplona
- López Moreno JJ, Beniston M, García Ruiz JM (2008) Environmental change and water management in the Pyrenees: futures perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change* 61:300-312
- Martínez-Vilalta J, Aguadé D, Banqué M, Barba J, Curiel Yuste C, Galiano L, García N, Gómez M, Heres AM, López BC, Lloret F, Poyatos R, Retana J, Sus O, Vayreda J, Vilà-Cabrera A (2012) Las poblaciones ibéricas de pino albar ante el cambio climático: con la muerte en los talones. *Ecosistemas* 21:15-21
- Moreno Rodríguez JM (2005). *A Preliminary Assessment of the Impacts in Spain due to the Effects of Climate Change – Final Report*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid
- Prescott CE (2010) Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry* 101:133-149
- Primicia I, Camarero JJ, Imbert JB, Castillo FJ (2013) Effects of thinning and canopy type on growth dynamics of *Pinus sylvestris*: inter-annual variations and intra-annual interactions with microclimate. *European Journal of Forest Research* 132:121-135
- Puertas F (2003) Scots pine in Navarre: Economic importance and production. *Proceedings of the I.U.F.R.O. Meeting "Silviculture and sustainable management in mountain forests in the western Pyrenees"*. Navarra
- Resco De Dios V, Fischer C, Colinas C (2007) Climate change effects on Mediterranean forests and preventive measures. *New Forests* 33:29-40
- Rivas-Martínez S (1987) *Memoria del mapa de series de vegetación de España*. Ministerio de Agricultura, Madrid
- Running SW, Nemani RR, Hungerford RD (1987) Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis. *Canadian Journal of Forest Research* 17:472-483
- Sánchez-Salguero R, Navarro-Cerrillo RM, Camarero JJ, Fernández-Cancio A, Swetman TW, Zavala MA (2012) Vulnerabilidad frente a la sequía de repoblaciones de dos especies de pinos en su límite meridional en Europa. *Ecosistemas* 21:31-40
- Seely B, Arp P, Kimmins JP (1997) A forest hydrology submodel for simulating the effect of management and climate change on stand water stress. En: *Proceedings of IUFRO meeting "Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation"*. Oeiras, Portugal. pp. 463-477
- Vicente AM, Donézar M, Del Barrio F, San Roque M (2004) *Memoria del mapa de Cultivos y Aprovechamientos de Navarra*. Gobierno de Navarra, Pamplona