

Efectos ambientales de las plantaciones de eucaliptos en Euskadi y la península ibérica.

Environmental effects of eucalyptus plantations in the Basque Country and the Iberian Peninsula.

Arturo Elosegi^{1*}, Carlos Cabido², Aitor Larrañaga¹, Juan Arizaga³



Resumen

Las plantaciones de eucalipto (género *Eucalyptus*) tienen una amplia distribución a escala global y causan preocupación por los efectos que pueden ocasionar sobre el medio ambiente. En este trabajo revisamos la evolución de la superficie cubierta por los eucaliptos en Euskadi y evaluamos sus efectos ambientales a partir de la bibliografía científica existente sobre esta región y sobre la península ibérica. Entre 1986 y 2019, la superficie de plantaciones de eucaliptos se ha cuadruplicado, pasando de 4.866 a 19.643 ha, proceso este que está acelerándose a causa de la plaga de la banda marrón del pino. Los estudios publicados muestran de manera sistemática que las plantaciones de eucaliptos en Euskadi y el resto de la Península tienen un efecto medioambiental negativo si se compara con las plantaciones de pino y, especialmente, con los bosques nativos. Las plantaciones de eucalipto modifican las características del suelo y disminuyen la biodiversidad. Entre los organismos más afectados se encuentran los hongos, líquenes, plantas herbáceas, anfibios, aves e invertebrados acuáticos. También se detectan alteraciones en el funcionamiento del ecosistema, en procesos como la descomposición de hojarasca. Aunque algunas afecciones parecen ser consecuencia de la intensidad con la que se explotan estas plantaciones y podrían reducirse mediante medidas correctoras, otros efectos parecen guardar relación con las características intrínsecas del eucalipto que, en consecuencia, no pueden modificarse. Es previsible que la magnitud de los impactos se agrave conforme se incremente la superficie cubierta por eucaliptales así como el número de rotaciones en sus explotaciones.

Palabras clave: biodiversidad, biología de la conservación, *Eucalyptus*, explotaciones forestales, País Vasco.

¹ UPV/EHU. Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Ciencia y Tecnología.

² Sociedad de Ciencias Aranzadi. Departamento de Herpetología.

³ Sociedad de Ciencias Aranzadi. Departamento de Ornitología.

*Correspondencia: arturo.elosegi@ehu.es



Abstract

Eucalyptus plantations are widely distributed throughout the world, thus creating concern due to their potential environmental effects. In this work we analyse the evolution of the coverage of eucalypts in the Basque Country and assess their environmental effects based on the scientific literature from this region and from the Iberian Peninsula. From 1986 to 2019 the area covered by eucalypt plantations increased fourfold, from 4,866 to 19,643 ha, a process that is accelerating as a consequence of the pine needle blight. The research so far published shows systematically that eucalypt plantations in the Basque Country and in the rest of the peninsula have detrimental environmental effects, compared to pine plantations and, especially, to native forests. Eucalypt plantations alter soil characteristics and reduce biodiversity. Fungi, lichens, herbaceous plants, amphibians, birds and aquatic invertebrates are among the most seriously affected groups of organisms. Ecosystem processes, such as leaf-litter breakdown, are also affected. Some of these effects seem to be a consequence of the intensity of exploitation in these plantations and, thus, could be reduced by means of improved management; other effects seem to relate to the intrinsic characteristics of the eucalypts, which cannot be modified. The magnitude of the impacts will likely increase with the area covered by eucalypt plantations, as well as with the number of crop rotations.

Key words: biodiversity, conservation biology, *Eucalyptus*, forest exploitation, Basque Country.

Laburpena

Eukalipto-landaketak mundu mailan oso hedatuta daude, eta kezka pizten du horrek ingurumenean izan ditzakeen eraginengatik. Lan honetan Euskadin eukaliptoz estalitako azaleraren bilakaera berrikusten dugu eta horien ingurumen-eragina aztertzen dugu, eskualde honetakoaz zein iberiar penintsulakoaz argitaratutako bibliografia zientifikoa oinarrituta. 1986tik 2019ra eukalipto-landaketen azalera laukoiztu egin da, 4.866 ha-tik 19.643 ha-ra; prozesu hau azken aldiak azkartzen ari da, pinuaren xingola marroia deritzon izurriaren eraginez. Argitaratutako ikerlanek modu sistematikoan erakusten dute eukalipto-landaketek Euskadin zein penintsulako beste leku batzuetan ingurumen-eragin kaltegarria dutela pinu-landaketekin alderatzen baditugu, are gehiago bertoko basoekin alderatuta. Eukaliptoek lorzoruaren ezaugarriak aldatu egiten dituzte, arroen hidrologiari eragin, eta biodibertsitatea murrizten dute. Gehien erasandako bizidun-taldeen artean daude onddoak, landare belarkarak, anfibioak, hegaztiak eta ornogabe urtarrak. Era berean, landaketak detektatzen dira ekosistemaren funtzionamenduan, bereziki orbelaren deskonposizioan. Eragin batzuk basoen ustiaketa intentsiboari lotuta daudela dirudien arren eta neurri zuzentzaileen bidez leundu litezkeela, beste batzuk eukaliptoaren berezko ezaugarriak eraginak direla ematen du eta, beraz, leuntzen zailak direla. Eragin horien gero eta handiagoak izango direla aurreikus daiteke, eukaliptoz estalitako azalera zein landaketen errotazio-kopurua handitu ahala.

Gako hitzak: biodibertsitatea, kontserbazio-biologia, *Eucalyptus*, baso-ustiaketak, Euskal Herria.

Introducción

Los eucaliptos engloban varias especies de la familia *Myrtaceae*, cuya distribución natural actual abarca buena parte de Oceanía, incluyendo Tasmania, Australia, Nueva Caledonia, Nueva Guinea, Indonesia y Filipinas (Ladiges *et al.*, 2003). Algunas especies de eucaliptos (e.g., género *Eucalyptus*) han sido introducidas en muchas regiones del mundo por su rápido crecimiento y su valor, en consecuencia, para la industria maderera. Actualmente, se estima que las plantaciones de eucalipto cubren unos 20 millones de hectáreas (Wingfield *et al.*, 2015) en Sudamérica, África, Asia y, en el caso de Europa, en España y Portugal (Whitehead & Beadle, 2004). Esta amplia distribución global se debe a la adaptación de muchas especies de eucaliptos a distintos tipos de suelo y regiones climáticas, junto al hecho de que son especies con elevadas tasas de crecimiento, poco atractivas para herbívoros, insectos fitófagos y patógenos fuera de su ámbito de distribución (Turnbull, 1999). No obstante, el número de plagas que afectan a las plantaciones de eucaliptos se incrementa con el tiempo debido a la importación de patógenos desde su rango de distribución nativo, o porque alguna especie local del nuevo territorio se adapta a atacar al eucalipto (Wingfield *et al.*, 2008).

Las plantaciones de eucaliptos pueden seguir diferentes esquemas de cultivo, desde las zonas en las que predominan las plantaciones “industriales” (esto es, extensas parcelas monoespecíficas explotadas intensivamente para obtener un producto principal, fundamentalmente pulpa para papel), hasta aquellas donde los eucaliptos se plantan en un mosaico agroforestal, en el cual se busca una mayor diversidad de productos (leña, carbón vegetal, madera para construcción, miel, etc.) (Turnbull, 1999). La mayor parte de las plantaciones que hallamos en España y Portugal siguen el primer modelo de explotación (FAO, 1981). Lo habitual en el norte de la península ibérica es plantar a densidades de 2.000 a 2.500 pies/ha y hacer cortas cada 10-12 años, destocoando y replantando tras 3-4 cortas (FAO, 1981). Actualmente, el eucalipto se extrae casi exclusivamente mediante máquinas procesadoras, que por un lado reducen la necesidad de personal para su explotación, pero por otro aumentan la necesidad de vías de saca (Veiras & Soto, 2011), lo cual puede tener unos efectos muy dañinos sobre el suelo y otros componentes medioambientales (e.g., Edeso *et al.*, 1999). Finalmente, los restos de corta que antes se quemaban o dejaban en el terreno, ahora se están aprovechando como biomasa para la producción eléctrica, lo que puede también tener una serie de consecuencias ambientales negativas.

En la segunda mitad del siglo XX, los efectos ambientales de los eucaliptos causaron un intenso debate, especialmente a partir del Programa Forestal Social de la India en la década de 1980 (Raintree, 1996). Un estudio clásico de la FAO (Poore & Fries, 1987) revisó gran número de trabajos sobre los efectos que tales plantaciones generan en materia de hidrología, erosión, fertilidad de suelos y biodiversidad. Sus conclusiones resaltaban que los eucaliptos (1) tienen un fuerte efecto en la hidrología porque

disminuyen el caudal de ríos, (2) no sirven para el control de la erosión, (3) su explotación intensiva en turnos cortos genera un rápido agotamiento de los nutrientes del suelo y (4) albergan menos biodiversidad que los bosques naturales nativos o que las plantaciones de especies autóctonas. Sin embargo, este informe también dejaba claro que los efectos ambientales dependen mucho del contexto climático, geográfico y social, lo que evidenciaba la necesidad de estudios locales para evaluar el impacto potencial de los eucaliptales en cada zona. Un documento posterior (FAO, 1995), aunque ratificaba muchos de los impactos que habían sido identificados antes, hacía hincapié en que la mayor parte de los mismos son comunes a cualquier plantación forestal de rápido crecimiento y recalca los beneficios económicos y sociales de los eucaliptos. Este documento vinculaba la mayor parte de los problemas asociados al eucaliptal a la forma en que se lleve a cabo la reforestación y no a las características intrínsecas de las especies utilizadas. Desde entonces la FAO ha publicado abundante material sobre los efectos ambientales, sociales y económicos de los eucaliptos, sobre todo en Asia y África. Destaca, en este contexto, una bibliografía anotada que recoge lo publicado entre 1985 y 1994 (FAO, 2003). Sin embargo, esta documentación es poco útil a la hora de determinar y evaluar los efectos específicos de las plantaciones de eucaliptos en contextos europeos más concretos, como es el caso de Euskadi.

El objetivo de este artículo es (1) revisar y resumir la situación del eucalipto en Euskadi y (2) evaluar el impacto que pueda representar sobre el medio ambiente, incluyendo el suelo, la biodiversidad, la hidrología y sobre las consecuencias del cambio climático. No analizamos las implicaciones económicas o sociales que puedan tener las plantaciones de eucaliptos.

Metodología

Para describir la evolución de los eucaliptales en Euskadi nos hemos basado en los Inventarios Forestales que el Gobierno Vasco ha publicado en 1986, 1996, 2005, 2016, 2018 y 2019. Para evaluar los efectos ambientales de las plantaciones de eucaliptos hemos recopilado la información publicada por las instituciones de carácter científico-tecnológico de Euskadi (e.g., Universidad del País Vasco -UPV/EHU-, Neiker, Sociedad de Ciencias Aranzadi). Hemos priorizado como fuente de información las publicaciones científicas (sometidas a revisión por pares) recogidas en bases de datos como la Web of Science (WOS) y SCOPUS. La búsqueda en WOS y SCOPUS se ha realizado usando los siguientes términos de búsqueda: *eucalypt**, *biodiversity*, *erosion*, *soil loss*, *wildfire*, *biological invasions*, *invasive*, *exotic*, *competition*, *disturbance*, *Iberian Peninsula*. También hemos realizado búsquedas por grupos de organismos [e.g., *eucalypt* AND fungi AND (Spain OR Portugal)*]. Adicionalmente, hemos incluido también trabajos exentos de la revisión por pares, como es el caso de informes técnicos o tesis doctorales, especialmente cuando han sido realizados en Euskadi.

Hemos tenido cuidado de evaluar los efectos de las plantaciones comerciales de eucaliptos, no otro tipo de plantaciones, como las realizadas con el fin de estabilizar escombros mineros o para descontaminar suelos. El que los eucaliptos puedan estabilizar y mejorar la calidad del suelo en tales circunstancias tiene poco que ver con los efectos que tienen las plantaciones madereras de esta especie sobre la fertilidad o las comunidades microbianas del suelo. Igualmente, a la hora de evaluar los efectos ambientales de las plantaciones de eucalipto, hemos reparado sobre todo en las comparaciones con otros tipos de bosque nativo o plantación (e.g., plantaciones de pino), ya que entendemos que son éstas las alternativas actuales a los eucaliptos en Euskadi, no cultivos agrícolas u otros tipos de uso, que están en regresión en esta zona.

Resultados y discusión

La búsqueda bibliográfica generó un total de 248 artículos científicos publicados entre los años 1982 y 2019 (Fig. 1). Más de la mitad hacía referencia a estudios realizados en la península ibérica y 43 eran estudios realizados en Euskadi o en regiones limítrofes. De Galicia, región en la que abundan los eucaliptos y que tiene una climatología similar a la de Euskadi, encontramos 40 artículos, mientras que otros 25 artículos hacían referencia a otras zonas de España y 67 más, a Portugal. Otros 62 artículos hacían referencia a otras zonas del mundo (principalmente Europa o zonas de clima similar al de Euskadi) o bien se trataba de revisiones de carácter general sobre algún

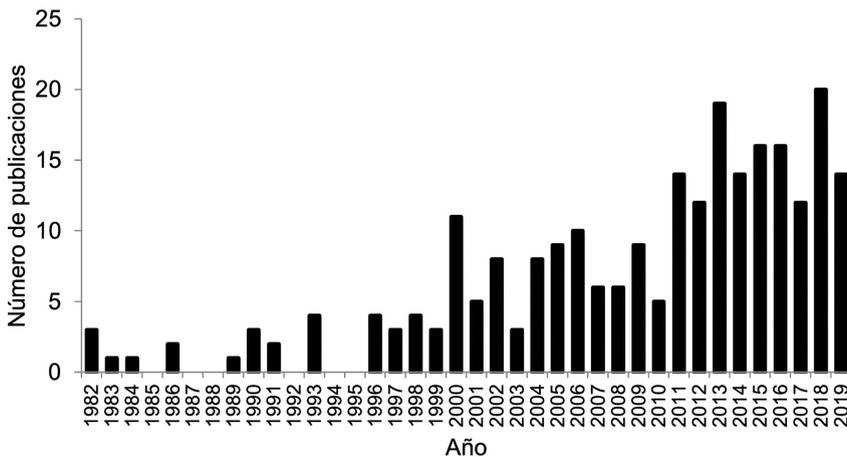


Fig. 1.- Número de artículos científicos revisados publicados durante el periodo 1982-2019 en revistas indexadas en WOS y SCOPUS.

Fig. 1.- Number of reviewed scientific papers, indexed in WOS or SCOPUS, during the period 1982-2019.

aspecto de los efectos de las plantaciones de eucalipto. Por último, tuvimos en cuenta 11 artículos más que, aunque realizados en Australia, trataban efectos de los eucaliptos que son extrapolables a cualquier zona. Por lo que respecta a la fecha, el número de nuevas publicaciones se ha incrementado durante los últimos años (Fig. 1), lo que indica un aumento del interés de la comunidad científica por los efectos ambientales de los eucaliptos.

Evolución de los eucaliptales en Euskadi

Entre 1986 y 2019, la superficie de plantaciones de eucaliptos en Euskadi se ha incrementado en un 303,10% (Fig. 2). Concretamente, se ha pasado de 4.866 ha según el censo recopilado en el Inventario Forestal de 1986 a 19.643 ha en 2019 (Fig. 2). Ésta última supone el 2,7% de la superficie de Euskadi. Nótese, además, que el 91% de los eucaliptales se localiza en Bizkaia (Fig. 2). En cuanto a especies, aproximadamente el 60% de los eucaliptos son de la especie *E. globulus* Labill., el 37% *E. nitens* Maiden y el 3% restante otras especies (fuente: Inventario Forestal de Euskadi). Aunque la mayor parte de los eucaliptales se encuentran en terrenos privados, entre un 14% y un 19% de la superficie cubierta de eucaliptos está en montes públicos (Fig. 3). Además, el porcentaje de suelos cubiertos por eucaliptos se ha incrementado: en 2019 sólo el 0,4% de los montes públicos estaba cubierto de eucaliptos, frente al 3,4% de los terrenos privados (Fig. 4).

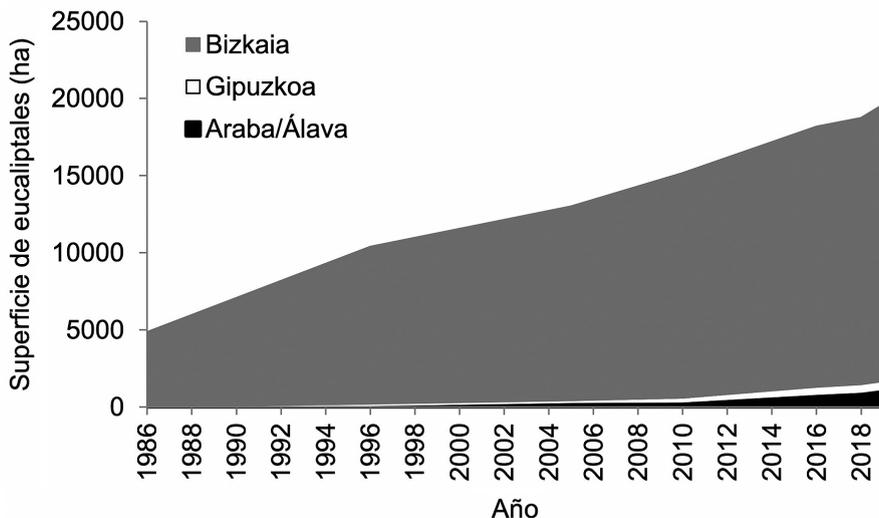


Fig. 2.- Evolución de la superficie de plantaciones de eucalipto en Euskadi, durante el periodo 1986-2019. Fuente: inventario forestal de Euskadi, Gobierno Vasco.

Fig. 2.- Evolution of the area occupied by eucalyptus plantations in Euskadi, during the period 1986-2019. Source: Basque Forestry Inventory.

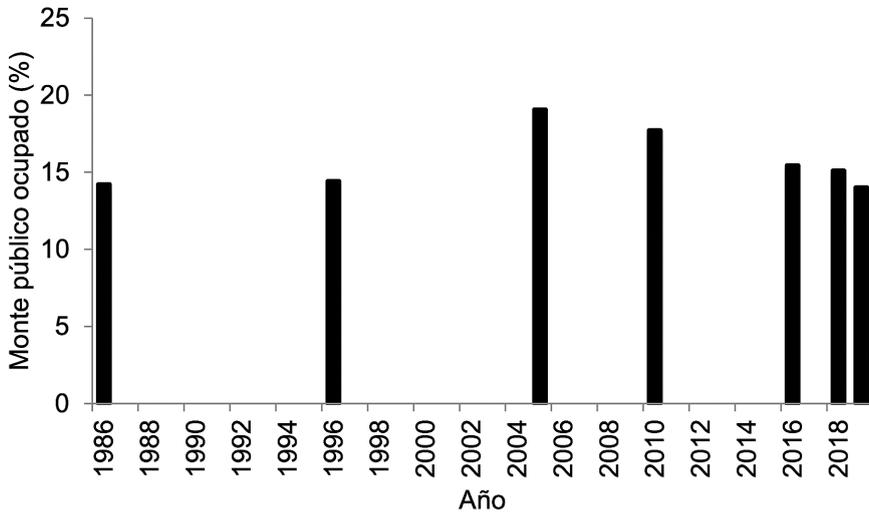


Fig. 3.- Evolución de la superficie (en porcentaje) de eucaliptales situados en terrenos públicos en Euskadi (fuente: Inventario Forestal de Euskadi).

Fig. 3.- Evolution of the area (in percentage) of eucalyptus placed in public land in the Basque Country (source: Basque Forest Inventory).

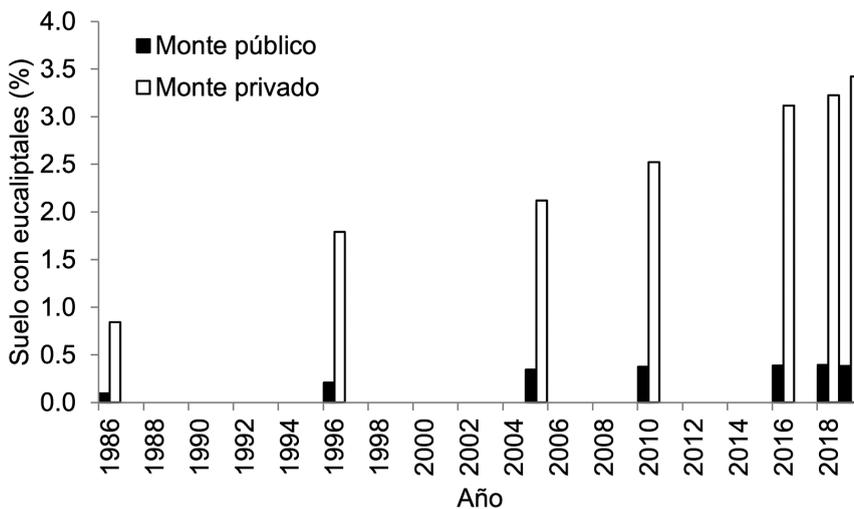


Fig. 4.- Evolución porcentual de la superficie de montes públicos y privados ocupados por eucaliptos en Euskadi (fuente: Inventario Forestal de Euskadi).

Fig. 4.- Evolution of the area (in percentage) of public and private terrain occupied by eucalyptus in the Basque Country (source: Basque Forest Inventory).

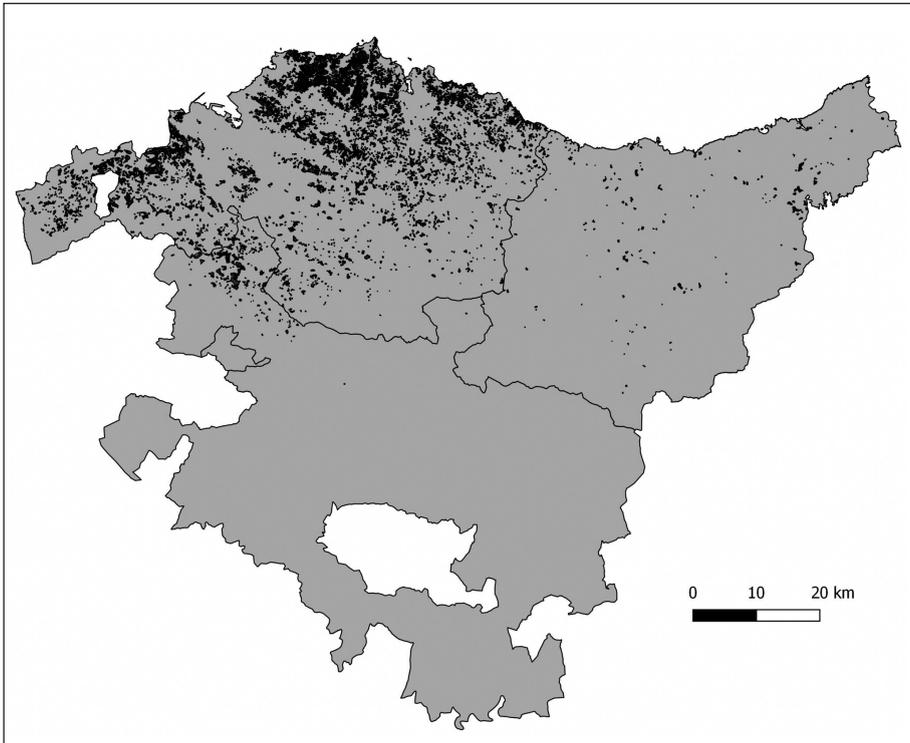


Fig. 5.- Distribución geográfica de eucaliptales en Euskadi (superficie oscura). Fuente: Inventario Forestal de Euskadi de 2019; capa disponible en el portal 'geoeskadi' (www.geo.euskadi.eus).

Fig. 5.- Geographic distribution of eucalyptus plantations in the Basque Country (dark polygons). Source: Basque Forestry Inventory from 2019; available in 'geoeskadi' portal (www.geo.euskadi.eus).

En cuanto a la distribución geográfica, la mayoría de las plantaciones están en la costa de Bizkaia, cuyo clima benigno es más propicio para estos árboles, aunque comienzan a extenderse hacia otros territorios (Fig. 5). Entre los municipios con mayor cobertura de eucaliptos se encuentran Maruri-Jatabe (50% del término municipal), Lemoiz (44%) y Bakio (38%). El mayor cambio en el sector forestal vasco durante los últimos años ha sido la pérdida de unas 20.000 ha de pino de Monterrey *Pinus radiata* D. Don, parcialmente debida a su sustitución por plantaciones de eucalipto y, en menor grado, por bosque mixto atlántico u otras plantaciones forestales (HAZI, 2018).

Efectos sobre el suelo

En general los bosques vascos acumulan una cantidad de materia orgánica muy inferior a su capacidad teórica, lo que se puede deber a procesos históricos intensos de explotación, que potenciaron la erosión y pérdida de suelos (Artetxe et al., 2014).

Las plantaciones de eucaliptos, además, tienden a acumular cantidades de materia orgánica algo inferiores a las de otras masas forestales (Artetxe *et al.*, 2014). El tipo de bosque y, especialmente, el tipo de gestión, afectan a la cantidad de carbono orgánico y de nutrientes presentes en el suelo. Así, la explotación intensiva del eucalipto, con turnos de extracción extremadamente cortos, puede agotar la reserva de nutrientes (FAO, 1995). Conforme crecen los árboles el carbono del suelo se acumula como biomasa, si bien trabajos de modelización realizados en Galicia (Pérez-Cruzado *et al.*, 2011) muestran que en los eucaliptales esta acumulación, estimada en 20-30 T C/ha, es una cantidad moderada para lo que se observa en bosques españoles (Rodríguez-Murillo, 2001). En cualquier caso, el reducido turno de corta de los eucaliptos produce cambios temporales importantes en la acumulación de carbono, tanto a nivel del suelo como de la biomasa (Pérez-Cruzado *et al.*, 2012), lo que hace que sus suelos sean de peor calidad que los de los bosques nativos (Núñez-Regueira *et al.*, 2006, Martín *et al.*, 2011). No obstante, distintos trabajos ofrecen resultados e interpretaciones contradictorios en cuanto a la acumulación de carbono en suelo bajo eucaliptal (Barrocas *et al.*, 1998, Zancada *et al.*, 2003). Así, las plantaciones de eucaliptos en Asturias pueden acumular más materia orgánica que otras formaciones vegetales (Zancada *et al.*, 2003), lo que es interpretado como un efecto de la baja calidad del humus, que no se descompone y acaba afectando la estructura y el funcionamiento de las comunidades microbianas. Por otro lado, estudios en Galicia muestran que las concentraciones de aluminio en eucaliptales son mayores que en robledales autóctonos, pero más reducidas que en plantaciones de pino de Monterrey (Álvarez *et al.*, 2002). Desafortunadamente, estos datos son difícilmente extrapolables a Euskadi, dado que los suelos gallegos tienden a ser más ácidos que los vascos, una característica que facilita la movilización del aluminio.

Los eucaliptales, además, incrementan la hidrofobia de los suelos, lo que puede hacer que la hidrología de las cuencas sea más extrema, con mayores riadas en periodos de lluvia y sequías más prolongadas en periodos de escasas precipitaciones (Abelho & Graça, 1996, Doerr *et al.*, 1996, Doerr *et al.*, 1998, Doerr *et al.*, 2000, Doerr & Thomas, 2000, Ferreira *et al.*, 2000, Rodríguez-Alleres *et al.*, 2007, Zavala *et al.*, 2014). Parece ser que el desarrollo de hidrofobia se reduce en suelos calcáreos (Fernández *et al.*, 2005), por lo que puede que en parte de Euskadi este fenómeno no sea un problema, aunque es algo que debería ser estudiado específicamente.

Como en cualquier explotación forestal, uno de los impactos que producen las plantaciones de eucaliptos es el asociado a las cortas, que son procesos que generan pérdida de suelo (Likens *et al.*, 1970, Beschta, 1978, Croke & Hairsine, 2006). Los turnos de rotación que se dan en los eucaliptales son cortos (cada 10-15 años) y, aunque el tronco vuelve a crecer desde tocón, cada tres cortas, esto es, cada 40 años aproximadamente, se destocona el terreno para volver a plantar. Que sepamos, el efecto de tales cortas sobre el medioambiente no ha sido estudiado para plantaciones de

eucaliptos en Euskadi, pero sí para plantaciones de pino de Monterrey (Merino *et al.*, 1998, Edeso *et al.*, 1999, Merino & Edeso, 1999, Mateos *et al.*, 2017). Estos trabajos detectaron niveles de erosión muy elevados así como pérdidas relevantes de fertilidad tras las cortas más agresivas (corta a hecho seguida de destocoado), que difieren poco de las que se llevan a cabo en eucaliptales. Igualmente, podemos suponer que las cortas en este último tipo de plantaciones generarán también episodios de erosión similares a los que se han descrito en Galicia (Merino *et al.*, 2005). Además, este tipo de cortas también genera pérdida de nutrientes en el suelo, tanto en el caso de plantaciones de pino (Merino *et al.*, 2004) como de eucalipto (Merino *et al.*, 2005). En Portugal, la erosión causada por el destocoado de los restos de plantaciones tras el paso de incendios alcanzaba tasas tan altas que se predecían pérdidas insostenibles de suelo en 50-100 años (Shakesby *et al.*, 2002). La actual tendencia a explotar los bosques mediante procesadora posiblemente agrave el problema de la pérdida de suelo, ya que exige una alta densidad de vías de saca, que son fuentes conocidas de erosión (Reid & Dunne, 1984, Cambi *et al.*, 2015).

Efectos sobre la fauna del suelo, los hongos y la vegetación

Las plantaciones de eucaliptos parecen afectar a las comunidades de organismos edáficos. Experimentos de laboratorio indican que los aceites esenciales de *E. globulus* son tóxicos para muchas especies de hongos e invertebrados y afectan a la calidad de alimento disponible para la fauna del suelo (Martins *et al.*, 2013). También se han destacado las propiedades alelopáticas del eucalipto, con efectos negativos para numerosos microorganismos del suelo y para la germinación de numerosas especies de plantas de sotobosque (Souto *et al.*, 2001). Este efecto también se detecta al añadir hojas de eucalipto al suelo, hasta el punto de que se ha propuesto que las mismas podrían usarse como herbicida (Puig *et al.*, 2017). Por otro lado, se ha constatado que tanto las características físico-químicas como las comunidades de fauna de suelo y la actividad microbiana muestran fuertes diferencias entre robledales y eucaliptales, mayores incluso que las que aparecen entre bosques de cualquier tipo quemados y no quemados (Lombao *et al.*, 2015). Es decir, el efecto de repoblaciones de eucaliptos sobre la biota del suelo es mayor que el de los incendios. Un trabajo sobre fauna edáfica desarrollado en Euskadi mostró que la comunidad de los colémbolos en un eucaliptal no difería de la existente en bosques nativos (robledal y hayedo) y sí, en cambio, respecto a la encontrada en prados y plantaciones de pino (Pozo, 1986). En otro estudio también llevado a cabo en Euskadi se vio que la abundancia y diversidad de ácaros oribátidos eran máximas en bosques autóctonos, intermedias en plantaciones (tanto pinos como eucaliptos) y mínimas en prados (Iturrondobeitia & Saloña, 1990, 1991, Saloña & Iturrondobeitia, 1993), aunque la diversidad en el estrato de hojarasca fue más alta que en otros tipos de vegetación (del Campo & Iturrondobeitia, 1984). Por lo que respecta a otras zonas, en Portugal se vio que la densidad y diversidad de

colémbolos en eucaliptales era menor que en alcornocales y robledales (i.e., bosques nativos) (Barrocas *et al.*, 1998, Sousa *et al.*, 2000). Además, el efecto de los eucaliptales era mayor para los colémbolos que viven sobre las capas más superficiales del suelo. Fuera de la península ibérica, experimentos de laboratorio realizados en Reino Unido, en los que se daba a elegir distintos tipos de hojarasca a lombrices de tierra, mostraban que éstas preferían la hojarasca de árboles autóctonos (aliso, fresno y abedul) a la de *E. nitens*, pero preferían esta última a la de otras especies exóticas tales como *Acer pseudoplatanus* L. y *Castanea sativa* Mill. (Rajapaksha *et al.*, 2013).

Destaca la escasez de estudios que midan los efectos de eucaliptales en hongos, tanto a nivel de Euskadi como en otras regiones ibéricas salvo los que analizan la abundancia o diversidad de hongos patógenos para los eucaliptos desde un punto de vista fitosanitario (Barradas *et al.*, 2016, Lopes *et al.*, 2016, Pérez *et al.*, 2016). Sin embargo los efectos ecológicos de los hongos van mucho más allá del carácter patógeno de determinadas especies. Por ejemplo, la mayor parte de las especies de árboles necesitan establecer simbiosis con hongos a través de procesos de micorrización para captar nutrientes o resistir sequías (Newman & Reddell, 1987, Brundrett, 2000, Wang & Qiu, 2006, van der Heijden *et al.*, 2008). Dada la especificidad de tales simbiosis, puede esperarse que la introducción de una especie forestal exótica tenga efectos sobre los hongos en general. En este contexto, el éxito de plantaciones forestales de especies exóticas a menudo depende de que las mismas sean acompañadas por los hongos que puedan micorrizarlos (Richardson *et al.*, 2000). En un estudio llevado a cabo en Galicia se vio que de 26 especies de hongos que forman micorrizas con eucaliptos, tres tienen origen australiano, mientras que los demás son hongos autóctonos que se han adaptado a formar micorrizas con eucaliptos (Santolamazza-Carbone *et al.*, 2019). Además, una de las especies de origen australiano (*Descolea maculata* Bougher 1986) ha colonizado bosques autóctonos, donde micorriza árboles nativos (Santolamazza-Carbone *et al.*, 2019). Esta expansión de hongos australianos podría promover la invasión de los eucaliptos que, además, podría acelerarse con el tiempo (Díez, 2005).

Por otra parte, los eucaliptos podrían tener un efecto marcado sobre la vegetación del sotobosque ya que, por la posición vertical de sus hojas, tienden a interceptar poco la luz solar (James & Bell, 2000) y el agua de lluvia (Crockford & Richardson, 2000). Así, el régimen de luz en el sotobosque de los eucaliptales es muy diferente del de los bosques autóctonos. En Euskadi, la riqueza de plantas en el sotobosque en eucaliptales era mayor que en plantaciones de pino (Campos & Herrera, 2009); sin embargo ese estudio no comparó la riqueza en relación a bosques nativos. Otro estudio (Onaindia *et al.*, 2013) menciona que los eucaliptales tienen una riqueza más baja que las plantaciones de pino y bosques nativos (<25 especies frente a medias de >60 especies), si bien en el mismo no queda clara la procedencia de estos datos. En cuanto a líquenes epífitos, los eucaliptales de Galicia tienen una abundancia y diversidad más bajas que otros tipos de masas forestales, como robledales autóctonos y plantaciones

de pino marítimo *P. pinaster* Aiton (Calviño-Cancela *et al.*, 2013). En este último trabajo hallaron una ausencia casi total de líquenes en plantaciones de eucaliptos de 6-10 años, y una reducción del 63% en eucaliptos de más de 25 años. La diversidad de líquenes se redujo un 91% en los eucaliptos más jóvenes y un 36% en los más viejos. También en Galicia se vio que la diversidad de especies herbáceas disminuye un 40% respecto a robledales (Calviño-Cancela *et al.*, 2012, Goded *et al.*, 2019). Además de una riqueza más baja, los eucaliptales albergan especies herbáceas ligadas a ambientes de matorral, mientras que los bosques autóctonos albergan especies herbáceas típicamente forestales (Goded *et al.*, 2019). Más allá de albergar una diversidad florística más baja que los robledales autóctonos, las plantaciones de eucaliptos conforman uno de los hábitats más pobres en especies en Galicia (Basanta *et al.*, 1989).

Efectos sobre los vertebrados terrestres

Los anfibios son, posiblemente, el grupo de vertebrados más amenazado globalmente (Stuart *et al.*, 2004). Se trata de especies muy sensibles a cambios en las condiciones del medio, especialmente en sus hábitats reproductores acuáticos, y con frecuencia se encuentran asociadas a ambientes forestales. Los lixivios y sustancias alelopáticas que producen las plantaciones de eucaliptos afectan tanto al suelo como a los hábitats acuáticos, por lo que su efecto sobre los anfibios es, *a priori*, esperable. Por este motivo los anfibios son uno de los grupos de vertebrados en los que el efecto de los eucaliptos más se ha estudiado en Euskadi, tanto a nivel de comunidad (diversidad y abundancia de especies), como en aspectos de la ecología que pueden verse afectados a nivel de especie o individual. Así, el número de especies de anfibios y su densidad son menores en los eucaliptales que en bosques nativos (Iglesias-Carrasco, 2017). Para determinar las causas que pueden explicar estos datos observacionales se llevaron a cabo experimentos en laboratorio con tres especies de anuros: rana verde ibérica *Pelophylax perezi* (López-Seoane 1885), una especie muy común en eucaliptales; rana bermeja *Rana temporaria* L. 1758, escasa en eucaliptales; y sapo partero *Alytes obstetricans* (Laurenti 1768), raro en este tipo de plantación. La exposición a lixivios de hojas de eucalipto disminuía la respuesta inmune, el crecimiento, el tamaño en la metamorfosis y la capacidad de salto, siendo la respuesta más acusada en las especies más raras en eucaliptales (Iglesias-Carrasco, 2017). Un estudio realizado con urodelos produjo resultados similares. La respuesta inmune y el tamaño relativo de las señales sexuales masculinas en el tritón palmeado *Lissotriton helveticus* (Razoumovsky 1789) también eran significativamente peores (hasta un 75% peor) en machos capturados en plantaciones de eucalipto, que en los capturados en bosques nativos (Iglesias-Carrasco *et al.*, 2016). De nuevo, al examinar este efecto en laboratorio, los machos que se mantuvieron en agua y un sustrato de hojas de eucalipto mostraron una respuesta inmune y un desarrollo de las señales sexuales peores que la de los que se mantuvieron en agua con sustrato de hojas de roble (Iglesias-Carrasco *et al.*, 2016), lo que se tradujo en efectos

negativos en los procesos que participan en la selección sexual. Al parecer, los lixiviados del eucalipto son capaces de generar efectos fisiológicos permanentes que afectan los patrones de comportamiento sexual, también a la elección de pareja, aunque la exposición al lixiviado haya cesado (Iglesias-Carrasco *et al.*, 2017b). En otro estudio experimental llevado a cabo en tritones, no se observó que la exposición a los lixiviados de eucalipto alterase la capacidad quimiosensorial de los machos para detectar el alimento, pero sí para detectar charcas con presencia de hembras o señales de alarma de coespecíficos (Iglesias-Carrasco *et al.*, 2017a). Estos trabajos corroboran los resultados de otros autores de la península ibérica, que apuntan a un fuerte impacto de los eucaliptos sobre los anfibios. Así, el seguimiento durante 40 años de dos poblaciones portuguesas contiguas de salamandra rabilarga *Chioglossa lusitanica* Bocage 1864, especie amenazada, mostró que una población que habitaba una cuenca en la que el eucalipto sustituyó la vegetación semi-natural previa cayó casi hasta la extinción. No obstante, en una cuenca cuya vegetación no fue intervenida, el tamaño de la población aumentó durante el mismo periodo (Arntzen, 2015). De forma similar, en el Parque Natural das Fragas do Eume, los eucaliptos han resultado ser, tras los pinos, el hábitat más pobre tanto para los anfibios como para los reptiles (Galán, 2014).

En cuanto a avifauna, hay pocos estudios sobre este grupo en eucaliptales vascos. En uno de los primeros estudios (Tellería & Galarza, 1990), desarrollado en parcelas de hábitats diferentes (una por tipo: bosque caducifolio nativo, campiña, plantación de pino y de eucalipto), se vio que la abundancia y la diversidad de aves en eucaliptal eran inferiores a las del resto de hábitats (frente a bosque caducifolio: abundancia, 38% menor; diversidad, 45% menor). Estas diferencias se registraban también durante el invierno y las especies más afectadas fueron las más arborícolas (Tellería & Galarza, 1990). Estudios realizados en Galicia también sitúan a los eucaliptales, especialmente los más jóvenes, como los tipos de vegetación con menor densidad y diversidad de aves (Bongiorno, 1982). También en Euskadi, tras el ámbito urbano, las planifolias exóticas (que incluye al eucalipto y a *Quercus rubra* L., entre otros) acumulan menor riqueza y abundancia de aves (35 y 64% menos, respectivamente) que los bosques nativos, siendo la riqueza similar en especies exóticas de planifolios y coníferas (IHOBE, 2011). Se ha comprobado que las aves apenas usan los troncos y la hojarasca del eucalipto, lo que se atribuye a la baja biomasa de invertebrados en este tipo de microhábitats (Tellería & Galarza, 1991). Tampoco parece que las flores de eucalipto produzcan un efecto beneficioso para las aves (Tellería & Galarza, 1991). Adicionalmente, cabe mencionar que los eucaliptales tienen poca madera muerta y escasos árboles con oquedades (Tellería & Galarza, 1991), lo cual es esencial para muchas especies forestales (Jonsson *et al.*, 2005, McElhinny *et al.*, 2005). De hecho, las especies que utilizan las cavidades de los árboles parecen ser las más perjudicadas por las plantaciones de eucaliptos (Goded *et al.*, 2019). Recientemente, también se observó en Bizkaia que la baja densidad de orugas (recurso trófico clave para muchas aves) en

eucaliptales era menor que en plantaciones de pino y robledal nativo (De la Hera *et al.*, 2013), lo cual podría explicar, al menos en parte, la baja diversidad de aves asociada a eucaliptales (Tellería & Galarza, 1990, 1991). En cuanto a la reproducción, aunque la fecha y el tamaño de puesta de los carboneros comunes *Parus major* L. 1758 no varía entre masas de eucaliptal y otro tipo de bosques (De la Hera *et al.*, 2013), se constata que especies como el busardo ratonero *Buteo buteo* (L. 1758) evitan ubicar su nido en plantaciones de eucalipto frente a otro tipo de masas forestales (Zuberogoitia *et al.*, 2006). Además, los pocos nidos hallados en eucaliptales (4 nidos de un total de 61) se situaron en eucaliptos viejos. Algo similar se observa en Galicia, donde los azores *Accipiter gentilis* (L. 1758) anidan en eucaliptos que sobresalen por gran porte (García-Salgado *et al.*, 2018). En Euskadi y en la mayor parte de la península ibérica la mayor parte de las plantaciones son jóvenes y, en consecuencia, inadecuadas para la reproducción de rapaces. En general, todos estos trabajos sugieren que los eucaliptales vascos acogen comunidades empobrecidas de la avifauna forestal nativa, una conclusión que se aplica para otras zonas peninsulares (Santos & Álvarez, 1990, Goded *et al.*, 2019). Un análisis a escala de toda la cornisa cantábrica muestra que la abundancia y la riqueza se reducen cuando el bosque nativo es sustituido por eucaliptales (Santos *et al.*, 2013). Aunque la abundancia de aves se recupera durante el periodo invernal debido a la llegada de aves migratorias y de individuos que descienden de los bosques que están a mayor altitud, en los eucaliptales los números son todavía bajos, hecho que lleva a afirmar que el abandono de la campiña cantábrica y la expansión de los eucaliptales son las amenazas más importantes a día de hoy para la conservación de pequeñas aves en la región cantábrica (Tellería *et al.*, 2008, Santos *et al.*, 2013).

En lo concerniente a mamíferos, no hemos encontrado información para Euskadi, mientras que la que existe en otras zonas de la Península es escasa. Los datos publicados sobre una zona costera próxima a Aveiro (Portugal) mostraron que el eucaliptal es el hábitat con menos densidad y riqueza de micromamíferos (Marques *et al.*, 2015). Sin embargo, un trabajo llevado a cabo en una zona cerca de Lisboa no halló diferencias significativas en la densidad de micromamíferos entre eucaliptos y dehesa, ya que esta densidad respondía fundamentalmente a la densidad del sotobosque, también escaso en la dehesa (Teixeira *et al.*, 2017). En este último trabajo, el ratón de campo *Apodemus sylvaticus* (L. 1758) resultó ser la única especie cuya densidad poblacional era afectada negativamente por el eucalipto. Más recientemente, los mismos autores han mostrado que aunque la condición corporal de los micromamíferos no mostraba diferencias entre la dehesa y el eucaliptal (Teixeira *et al.*, 2019), los animales del eucaliptal mostraban una mayor tasa de infestación por garrapatas y pulgas. La importancia de la cobertura del sotobosque sobre los micromamíferos también se ha puesto de relieve en otro trabajo limitado a eucaliptales (Carrilho *et al.*, 2017), lo que hace pensar que los detalles de gestión de los mismos tienen gran importancia para roedores y

musarañas (Teixeira *et al.*, 2017). Los patrones en carnívoros son aún menos claros, posiblemente porque éstos tienen territorios muy grandes que, a menudo, engloban diferentes hábitats, por lo que discernir el efecto de un único hábitat sobre su biología y ecología es complicado. El uso del territorio puede variar entre especies; mientras que los zorros *Vulpes vulpes* (L. 1758) seleccionan los pinares, las garduñas *Martes foina* (Erxleben 1777) prefieren el bosque natural maduro y evitan el eucaliptal. Por último, las ginetas *Genetta genetta* (L. 1758) prefieren el eucaliptal y evitan el bosque autóctono maduro (Pereira *et al.*, 2012). Por otra parte, inventarios de huellas y excrementos en el sur de Portugal sugieren que la densidad de gato, zorro y tejón se ven afectados favorablemente por la existencia de plantaciones de eucalipto y pino (Pita *et al.*, 2009). Sin embargo, hay que recalcar que este último estudio se realizó en una zona sin apenas bosque nativo, por lo que, posiblemente, las plantaciones se convierten en esos casos en el único refugio posible para animales forestales.

Aunque la mayoría de los trabajos que se han citado hasta ahora se centran en taxones concretos, Silva *et al.* (2019) estudiaron la abundancia, riqueza y composición de varias especies de flora y fauna, desde macromicetos hasta carnívoros, en diferentes tipos de masas forestales (robleales, plantaciones de pino y eucaliptos y bosque de acacia). Los robleales resultaron tener mayor abundancia, diversidad y más especies que el resto de hábitats forestales, principalmente que las zonas cubiertas por eucalipto y acacia.

Efectos sobre la hidrología

La alta productividad de determinados eucaliptos se ha asociado a tasas altas de transpiración, lo que podría hacer disminuir el nivel freático y reducir el caudal de los ríos (Whitehead & Beadle, 2004). Numerosos trabajos muestran que las plantaciones forestales disminuyen el caudal de los ríos por el aumento de la evapotranspiración, mientras que la tala lo aumenta (Bosch & Hewlett, 1982, Robinson *et al.*, 2003, Farley *et al.*, 2005). No obstante, el nivel de respuesta puede variar según regiones y tipo de bosque (Sahin & Hall, 1996, Zhang *et al.*, 2017). Una revisión clásica concluía que tanto eucaliptales como pinares causaban una reducción de la producción de agua de las cuencas un 60% mayor que las masas forestales de frondosas (Bosch & Hewlett, 1982). Posteriormente, un estudio llevado a cabo a escala global, donde se combinó trabajo de campo y modelización (Jackson *et al.*, 2005), sugirió que los eucaliptales tenían un impacto hidrológico mayor que las masas forestales de pino. Sin embargo, como hemos mencionado antes, estos efectos pueden cambiar entre regiones climáticas (Farley *et al.*, 2005), siendo la respuesta más acentuada en zonas donde la disponibilidad de agua es baja (Zhang *et al.*, 2017). En Europa, las masas forestales donde los efectos hidrológicos son más acentuados son las plantaciones de coníferas del noroeste y las de eucaliptos del sur del continente (Robinson *et al.*, 2003). Según estos

autores, las talas en eucaliptales producen un fuerte aumento en los picos de crecidas y cierto aumento en el caudal basal, aunque los efectos se reducen pocos años tras la tala.

Para Euskadi, éste es un tema poco estudiado. Existe un estudio de modelización de la cuenca del Oka en el cual no se deja claro cómo se utilizan los datos sobre los eucaliptos (Peraza-Castro *et al.*, 2018), por lo que su efecto en la hidrología, en consecuencia, queda poco claro. En otro estudio se analizó el efecto sobre caudal tras la tala de un eucaliptal en Guriezo (Santiago, 2006), pero no los cambios debidos a la plantación en periodo de crecimiento.

Los trabajos realizados en otras zonas de la Península (Gras *et al.*, 1993, David *et al.*, 1994, Fernández *et al.*, 2006, Fernández *et al.*, 2011) muestran que tanto la quema como la tala o la defoliación de eucaliptales producen un aumento significativo (hasta 68-73%) de caudal en las cuencas que, no obstante, dura pocos años debido a la rápida regeneración de este tipo de plantaciones. La modelización de escenarios de cambio climático indica que las plantaciones de eucaliptos provocarán un descenso de los caudales de estiaje en un 17%, a la vez que se incrementará la erosión de suelos y la concentración de nitrato en el agua (62% más de días con valores muy elevados) (Carvalho-Santos *et al.*, 2016).

Efectos sobre los ríos

Uno de los aspectos más estudiados sobre los eucaliptales de Euskadi son sus efectos sobre los ríos. Hay múltiples razones por las que las actividades forestales en general, y las plantaciones de eucalipto en particular, podrían afectar a los ecosistemas fluviales. Éstos dependen íntimamente de la cuenca circundante, por lo que son muy sensibles a cambios en los usos del suelo, especialmente si afectan a grandes superficies (Richardson, 2019). Por ejemplo, los cambios en la vegetación afectan la capacidad de infiltración de agua en los suelos así como la evapotranspiración e, indirectamente, el régimen de caudales que circula por los ríos (Brown *et al.*, 2005). Adicionalmente, a menudo el manejo forestal conlleva la apertura de pistas y vías de saca, que modifican la circulación del agua en las cuencas y pueden acelerar la erosión, lo que se traduce en aumento de deposición de sedimentos en los cauces (Madej, 2001). La corta a hecho (esto es, la extracción simultánea de la totalidad de los pies que forman un rodal) es una técnica que genera una fuerte reducción de la entrada de materia orgánica en los ríos que, no obstante, podría llegar a ser transitoria y recuperarse conforme se desarrolla el bosque de ribera (Santiago *et al.*, 2011). Otros efectos de este tipo de cortas son una reducción de la calidad del agua así como un aumento de la temperatura y las partículas en suspensión -esto es, la turbidez- (Santiago, 2006). Como ya se ha mencionado, los trabajos de Edeso y colaboradores (e.g., Edeso *et al.*, 1999, Merino & Edeso, 1999, Mateos *et al.*, 2017) mostraron que las cortas a hecho en pinares en

Bizkaia generan fuertes niveles de pérdidas de suelo. Dado que los eucaliptales se talan con elevada frecuencia, es de suponer que también se registrarán niveles de erosión considerables y que se producirá la deposición de sedimentos finos en los arroyos cercanos, aunque este aspecto no se ha estudiado en Euskadi.

La alimentación de los organismos que habitan los arroyos se basa en buena parte en la hojarasca que cae de la vegetación circundante, por lo que los cambios en la composición de la masa forestal influyen en la cantidad y calidad del alimento disponible para este tipo de organismos (Wallace *et al.*, 1997, Marks, 2019). Trabajos realizados en la cuenca del río Agüera (un río que nace en Burgueño, Cantabria, y desemboca en la ría de Oriñón, Cantabria; su caudal anual medio es de 112 hm³ y su longitud es de 21 km), en la cual se comparó un arroyo en bosque autóctono (robleal) con otro que discurría por un eucaliptal, mostraron una reducción de la abundancia (13-32%), diversidad y contenido en nutrientes (44-66%) de la hojarasca (Pozo *et al.*, 1997, Molinero & Pozo, 2004). Existe, en consecuencia, un efecto negativo en la cantidad de materia orgánica y de nutrientes que se acumulan en los lechos fluviales (Molinero & Pozo, 2003, 2006). Como se ha mencionado, las hojas del eucalipto son pobres en nutrientes, tienen una fuerte cutícula cérea que dificulta su ataque por hongos (Canhoto & Graça, 1995) y contienen aceites esenciales que tienen un efecto antimicrobiano y anti-herbívoro (Morrow *et al.*, 1976). Todo ello las hace un alimento de poco valor para los consumidores acuáticos fuera de su lugar de origen (Canhoto & Graça, 1995), especialmente para los invertebrados más grandes, que no pueden evitar la ingestión de glándulas de aceite cuando consumen estas hojas (Canhoto & Graça, 1999). Esta baja calidad alimenticia fue confirmada para los invertebrados más comunes en los ríos vascos mediante experimentos de laboratorio (Larrañaga *et al.*, 2014). De forma similar, la comparación de arroyos rodeados de bosque autóctono con arroyos rodeados de eucaliptal ha mostrado algunas diferencias importantes en las comunidades biológicas, que detallamos a continuación. Las comunidades de hongos (hifomicetos) acuáticos, organismos que juegan un papel clave en el reciclado de nutrientes, difieren poco entre eucaliptales y robleales en el río Agüera (Molinero *et al.*, 1996, Chauvet *et al.*, 1997, Pozo *et al.*, 1998, Díez *et al.*, 2002), mientras que las diferencias son mayores en el centro de Portugal (Bärlocher & Graça, 2002, Canhoto *et al.*, 2002, Ferreira *et al.*, 2006). El contraste entre regiones puede deberse a razones climáticas: la región cantábrica es más húmeda que el centro de Portugal, lo que favorece que en las plantaciones de eucaliptos y, especialmente, en los márgenes de los arroyos, crezca un sotobosque más diverso de especies autóctonas, cuya hojarasca reduce el efecto de la sustitución de las especies arbóreas dominantes sobre los hongos acuáticos. Sin embargo, las comunidades de invertebrados acuáticos indican un claro impacto de las plantaciones de eucaliptos en los arroyos vascos. Bajo los eucaliptales se detecta una densidad 23% menor y una diversidad 11% menor de invertebrados, y el tamaño corporal es un 37% menor, lo que sugiere un crecimiento

menor (Larrañaga *et al.*, 2009a, Larrañaga *et al.*, 2009b), que podría comprometer la reproducción de algunas especies. En los arroyos bajo eucaliptal dominan las especies adaptadas a alimentarse de hojarasca de baja calidad, y el tamaño de los que consumen este tipo de hojas es menor (Larrañaga *et al.*, 2009a, Larrañaga *et al.*, 2009b). También se ha comprobado que las comunidades de invertebrados bajo eucaliptal tienen una menor capacidad de recuperación frente a perturbaciones (sequía) que las comunidades bajo robleal o pinar (Monroy *et al.*, 2017). Estos impactos son consistentes con los hallados en Galicia, donde un estudio comparando 16 ríos sugiere que la riqueza específica y la diversidad de las comunidades de invertebrados fluviales disminuyen con la proporción de la cuenca cubierta por eucaliptos (Cordero-Rivera *et al.*, 2017). También se ha descrito en Portugal que los ríos que atraviesan eucaliptales tienen una comunidad de peces empobrecida, aunque el efecto disminuye mucho en ríos en los que se mantienen franjas de bosque de ribera natural entre las plantaciones de eucalipto y el cauce (Morrongiello *et al.*, 2013). No sabemos hasta qué punto estas diferencias reflejan efectos indirectos causados por la baja calidad alimenticia de la hojarasca de eucalipto para los invertebrados fluviales, o si los lixiviados del eucalipto pueden acabar inhibiendo directamente la reproducción de los peces también en la península ibérica, como se ha descrito en Australia (Morrongiello *et al.*, 2011, 2013).

Los cambios en las comunidades tienen un gran efecto sobre el funcionamiento del ecosistema fluvial, en especial sobre la capacidad de descomposición de hojarasca (Gessner & Chauvet, 2002, Chauvet *et al.*, 2016). La hojarasca de eucalipto se descompone a tasas hasta un 50% más bajas que las hojas de aliso *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn (Mesquita *et al.*, 2007), diferencia que puede ser más reducida entre ambas especies cuando existe exceso de nutrientes en el agua (Pozo, 1993). Sin embargo los efectos de los eucaliptales van más allá de la sustitución de hojarasca, ya que bajo los eucaliptos las hojas de otras especies también se descomponen más lento (e.g., un 25% y 58% más lento para hojas de roble y aliso, respectivamente) (Ferreira *et al.*, 2015, von Schiller *et al.*, 2017). Una vez más, las diferencias son más marcadas en el centro de Portugal que en el área cantábrica (Graça *et al.*, 2002, Ferreira *et al.*, 2015), posiblemente como consecuencia de una pluviosidad más baja en el caso de Portugal. En promedio, a escala global la tasa de descomposición de hojarasca disminuye un 23% por las plantaciones de eucaliptos (Ferreira *et al.*, 2018). Trabajos experimentales demostraron cómo al sustituir hojarasca de robleal por hojarasca de eucalipto en arroyos se reducía la tasa de descomposición de la hojarasca (Larrañaga *et al.*, 2014), aunque al ser más gruesas y tener menos movilidad, las hojas del eucalipto permanecían en el tramo por más tiempo y acababan siendo descompuestas (Bañuelos *et al.*, 2004), supuestamente por microorganismos y no por un consumo causado por los invertebrados. Las entradas de hojarasca de eucalipto redujeron un 20% la diversidad, un 37% la abundancia y un 50% la biomasa de invertebrados (Larrañaga *et al.*, 2006). En conjunto, la hojarasca que generan las plantaciones de eucaliptos puede tener

fuertes efectos sobre el medio acuático, a nivel de redes tróficas o funcionamiento del ecosistema así como en la estructura de comunidades.

Las plantaciones de eucaliptos en Euskadi también producen menor cantidad de madera muerta en los cauces (Díez *et al.*, 2001). La madera muerta es un componente muy importante en los ríos que controla la forma del cauce, aumenta la diversidad de hábitats y la retención de materia orgánica (Larrañaga *et al.*, 2003), proporciona refugio a peces y otros organismos y mejora el funcionamiento del ecosistema fluvial (Harmon *et al.*, 2004). Mediante manipulaciones de campo se ha demostrado que la eliminación de los restos de madera provoca la pérdida de sedimentos y materia orgánica y simplifica el hábitat fluvial (Díez *et al.*, 2000). La escasez de madera en ríos que discurren por eucaliptales tiene fuerte efecto sobre el flujo de carbono en los mismos, reduciendo su utilización por los seres vivos (Elosegi *et al.*, 2007).

En resumen, las plantaciones de eucaliptos tienen un efecto significativo sobre la mayor parte de las variables que se han estudiado en ríos vascos, aunque algún trabajo reciente llevado a cabo en Portugal sugiere que los eucaliptales certificados pueden mantener componentes de biodiversidad interesantes (Oliveira *et al.*, 2019). En general, los impactos son menores que los producidos por la contaminación urbana o industrial, pero mayores que los producidos por plantaciones de pino (Ferreira *et al.*, 2016). Sin embargo, al concentrarse en arroyos de cabecera, que son los menos afectados por otras actividades humanas, su efecto acumulado sobre la biodiversidad puede ser mayor.

Efectos sobre el régimen de incendios y las consecuencias de los mismos

No hallamos trabajos que evalúen los efectos de los eucaliptales en el régimen de incendios en Euskadi o en regiones limítrofes. Muchas especies, como *E. globulus*, están adaptadas al fuego y tienen gran capacidad de rebrote tras los incendios (Catry *et al.*, 2010, Catry *et al.*, 2013). Además, el eucalipto en Portugal muestra gran capacidad de colonización de parcelas quemadas, especialmente en las zonas más productivas (Águas *et al.*, 2014), cuyas características ambientales son parecidas a las de Euskadi. Las plantaciones de pino o de eucalipto arden con mayor frecuencia que los bosques nativos, tanto en España (Vázquez *et al.*, 2015, Calviño-Cancela *et al.*, 2016, Ponte *et al.*, 2019) como en Portugal (Moreira *et al.*, 2009, Silva *et al.*, 2009), donde el 3-4% de dichas plantaciones se queman anualmente (Rego *et al.*, 2013). Aunque *E. globulus* tiene un poder calórico y una inflamabilidad más baja que el pino marítimo (Núñez-Regueira *et al.*, 1996), su corteza es especialmente propensa a desgajarse y volar con el calor, transmitiendo el fuego a otros materiales (Ganteaume *et al.*, 2009). Esto incrementa el rol del eucalipto como catalizador de incendios.

Por otra parte, el riesgo de incendio no sólo se debe al tipo de vegetación, sino que también depende del escenario económico y social de cada zona. Por ejemplo, los

incendios forestales son mucho más frecuentes en Cantabria que en Euskadi, pese a unas condiciones ambientales comparables. El análisis de series temporales de incendios y vegetación en Portugal mostró que el incremento de superficie cubierta por las plantaciones de eucaliptos no produjo un aumento en la superficie incendiada y que los incendios en eucaliptales no son más severos que en otros tipos de vegetación (Fernandes *et al.*, 2011). En Galicia, también, parece que la probabilidad de los incendios queda explicada en buena parte por factores socio-económicos, como el precio de la madera de eucalipto, la población en el sector primario o la existencia o no de periodos electorales (Álvarez-Díaz *et al.*, 2015). Además, la influencia de la vegetación pierde importancia en caso de grandes incendios (Barros & Pereira, 2014), que dependen más de variables a escala de paisaje, como la conectividad entre las parcelas más inflamables (Fernandes *et al.*, 2016). Todo esto hace extremadamente difícil evaluar el efecto de los eucaliptos en los incendios forestales en Euskadi.

Sea cual sea su prevalencia y frecuencia, los incendios provocan un aumento en la exportación de solutos y sedimentos, que puede afectar de forma negativa al suministro de agua en ríos y embalses (Smith *et al.*, 2011). Además, trabajos realizados en Portugal demuestran que la ceniza que queda tras los incendios, tanto de pinar como de eucaliptal, es tóxica para los organismos acuáticos (Silva *et al.*, 2014), aunque sus efectos dependen del tipo de bosque (Carvalho *et al.*, 2019). Los incendios también aumentan la concentración de elementos tóxicos como el plomo en los suelos, tanto de eucaliptales como de pinares (Campos *et al.*, 2016), siendo la movilización de mercurio dos veces mayor en los eucaliptales (Campos *et al.*, 2015). Adicionalmente, estudios realizados en Galicia demuestran que los incendios potencian en más de 40 veces la supervivencia de plántulas de eucalipto, incrementando el potencial invasor de este género (Calviño-Cancela *et al.*, 2018).

Efectos sobre las consecuencias del cambio climático

Los bosques están entre los ecosistemas que más materia orgánica acumulan, por lo que pueden jugar un papel importante para luchar contra el calentamiento global como sumideros de carbono (Pan *et al.*, 2011). En este contexto, se plantea el rol de las plantaciones de eucaliptos como sumideros. Debe destacarse aquí que buena parte del carbono que se acumula en un bosque no lo hace en la madera en pie, sino en la hojarasca, mantillo y humus (Lal, 2005), por lo que un análisis riguroso sobre el papel de un bosque/plantación en la fijación de carbono exige también cuantificar estos componentes y su relación con la gestión del terreno (Post & Kwon, 2000, Schulze *et al.*, 2000). Por otro lado, el efecto de la fijación de carbono en la madera depende del destino de ésta. Hay, además, más factores que deben tenerse en cuenta. Así, la reforestación en Europa, pese a convertir 386.000 km² de terreno agrícola en arbolado desde 1850, no ha mitigado el calentamiento global si se tienen en cuenta también los cam-

bios en la reflectividad del terreno que son consecuencia de las especies forestales elegidas (Naudts *et al.*, 2016). De hecho, algunos estudios muestran que, en contra de lo que se pensaba, los bosques maduros son importantes sumideros de carbono (Luysaert *et al.*, 2008). Por esto, la estrategia forestal más adecuada para luchar contra el calentamiento global no es aumentar la superficie forestal sino promover bosques muy maduros en la superficie forestal ya existente (Lewis *et al.*, 2019, Moomaw *et al.*, 2019).

En el caso de los eucaliptos hay que destacar que, pese a su alta productividad (que podría ser interesante para la fijación de carbono), el tipo de gestión aplicada podría disminuir su valor para fijar carbono: las frecuentes cortas a hecho producen arrastres de suelo y aumentan la degradación de materia orgánica, mientras que la madera se destina fundamentalmente a papel, uno de los productos forestales con ciclo de vida más corto. La tendencia actual a utilizar los restos de cortas (hojas, ramas, cortezas...) en plantas de biomasa, aunque en parte puede compensar el uso de otras fuentes de energía no renovables, reduce aún más el efecto sumidero de carbono de este tipo de plantaciones, (Mateos *et al.*, 2016). En conclusión, el efecto de las plantaciones de eucaliptos sobre el calentamiento global depende de múltiples factores, climáticos, de gestión forestal y de mercado (Díaz-Balteiro & Rodríguez, 2006, Pérez-Cruzado *et al.*, 2011, García-Gonzalo *et al.*, 2014), tanto de los productos forestales como de las alternativas energéticas, así como de los métodos de contabilidad que se utilicen (Arroja *et al.*, 2006, Caparrós *et al.*, 2010).

En cuanto a Euskadi, existe potencial tanto para fijar carbono en biomasa como para aumentar la cantidad de carbono en suelos forestales, particularmente en plantaciones de pino y eucalipto (Artetxe *et al.*, 2014). Así, los trabajos que han abordado esta temática muestran que la fijación de carbono en biomasa puede aumentar entre un 50% y 200%, y la de carbono en el suelo entre un 70% y 250% (Artetxe *et al.*, 2014). Pero los eucaliptales, en este contexto, están entre las masas forestales que menos carbono acumulan. Un estudio de modelización sugiere que la sustitución de las plantaciones de pino por eucaliptales reduciría el secuestro de carbono en Bizkaia, mientras que si lo es por vegetación autóctona lo aumentaría (Rodríguez-Loinaz *et al.*, 2013). Así pues, los modelos sugieren que las plantaciones de eucaliptos no contribuyen a mitigar o reducir el problema del calentamiento global sino, tal vez, a agravarlo. Para impulsar la fijación de carbono en biomasa y suelos forestales habría que favorecer las especies autóctonas y la madurez de los bosques.

Valoración final

En conjunto, las referencias halladas sobre los efectos ambientales de los eucaliptos en Euskadi abarcan un amplio abanico de campos, aunque el nivel de evidencia que presentan es variable y quedan cuestiones que apenas han sido abordadas.

Por un lado, dado el valor del suelo como capital natural, sorprende que tan pocos trabajos hayan analizado los efectos del eucalipto sobre el suelo (cuantitativa y cualitativamente) y su variabilidad según factores tanto forestales (e.g, fases del ciclo productivo de la plantación) como locales (sustrato geológico, pendiente, precipitación...). Asimismo, faltan estudios sobre pérdidas de suelo en momentos críticos, como cortas e incendios; también sobre efectos hidrológicos, esenciales en un contexto de cambio global donde el papel de los recursos hídricos es fundamental. También hay todavía una ausencia casi total de datos sobre las consecuencias que tienen las plantaciones de eucaliptos en determinados componentes de la biodiversidad, como vegetación, invertebrados terrestres no edáficos, reptiles y micromamíferos.

Sin embargo, hay bastantes trabajos sobre algunos grupos taxonómicos, tanto en Euskadi como en zonas de características ambientales comparables. Éstos ofrecen un nivel de evidencia suficiente para evaluar algunos efectos ambientales de los eucaliptos. El número de trabajos publicados es importante y ha sido publicado en revistas de diversas disciplinas, lo que sugiere que en conjunto la información científica disponible es exhaustiva y adecuada. Por todo ello, consideramos que la revisión obtenida ofrece una visión no sesgada de los efectos medioambientales que generan las plantaciones de eucaliptos.

Para lograr una imagen de conjunto, se han resumido las conclusiones del análisis bibliográfico en la Tabla 1. Como puede verse, los resultados son claros y muestran, sistemáticamente, que las plantaciones de eucaliptos tienen un efecto medioambiental negativo. De casi 30 variables, apenas hay casos donde los eucaliptos muestren un

Tabla 1.- Tabla resumen de efectos ambientales de eucaliptales, en Euskadi y otras zonas de la península ibérica, frente a otros tipos de masas forestales (bosque nativo o plantaciones de otras especies exóticas, generalmente pino de Monterrey o pino marítimo). La coloración de los símbolos se asocia a la intensidad y dirección del efecto: ● fuerte mejora, ● mejora moderada, ● no efecto, ● empeoramiento moderado, ● fuerte empeoramiento, X resultados inconsistentes. El número de símbolos indica el nivel de evidencia científica: 3 símbolos, si varios trabajos o todos muestran efectos en la misma dirección; 2 símbolos, cuando es un trabajo con comparaciones múltiples; 1 símbolo, cuando la evidencia se basa en un sólo trabajo con una parcela única por tipo de bosque. Los conceptos de mejora o empeoramiento se refieren a la biodiversidad o al funcionamiento natural de los ecosistemas, independientemente de consideraciones económicas o sociales. ►

Table 1.- Summary table showing the environmental effects of eucalyptus in the Basque Country and other areas of the Iberian peninsula, versus other types of forests (native forest, other exotic trees -normally Monterey or maritime pine-). The colours of the symbols relate to the intensity and direction of an effect: ● strong improvement, ● moderate improvement, ● no effect, ● moderate deterioration, ● strong deterioration, X inconsistent data. The number of symbols shows the level of scientific evidence: 3 symbols, when several or all the studies show similar results, all in the same direction; 2 symbols, in studies based on multiple comparisons; 1 symbol, when the evidence is based on a single study with a single experimental parcel per forest type. The concepts of 'improvement' or 'deterioration' refer to the biodiversity and functioning of the ecosystems, irrespective of the economic and social considerations.

Ambiente/Variable	Euskadi		Península	
	Frente a autóctono	Frente a plantación	Frente a autóctono	Frente a plantación
Suelos				
Materia orgánica	●●	●●	XX	XX
Hidrofobia			●●●	●●●
Concentración de aluminio			●●	●●
Efectos alelopáticos			●	●
Comunidades microbianas			●●	
Fertilidad del suelo			●	●
Fauna del suelo: colémbolos	●	●	●●●	
Fauna del suelo: oribátidos	●●	●●		
Vegetación				
Diversidad hongos terrestres			●●	●●
Líquenes			●	●
Plantas	●	XX	●●●	●●●
Vertebrados terrestres				
Anfibios	●●●	●●●	●●●	●
Aves	●●●	●●●	●●●	●●●
Micromamíferos			●●●	●●
Carnívoros			XX	XX
Hidrología				
Caudales de estiaje			●●●	●●●
Caudales de crecida			●●	●●
Ríos				
Calidad de hojarasca	●●●	●●	●●●	
Materia orgánica y nutrientes	●●●		●●	
Hongos acuáticos	●●●		●●●	
Invertebrados acuáticos	●●●	●	●●●	
Peces			●●	
Descomposición hojarasca	●●●		●●●	
Madera muerta	●●	●●		
Incendios				
Inflamabilidad			●●●	●●●
Cenizas tóxicas				●
Calentamiento global				
Acumulación de carbono en suelo	●●	●●		
Sumidero de carbono	●●●	●●●		

efecto ambiental positivo (Tabla 1). Algunas de las afecciones, como la pérdida de materia orgánica del suelo así como las alteraciones en la hidrología de las cuencas parecen ser consecuencia de la intensidad con la que se explotan estas masas forestales; en consecuencia, pueden reducirse mediante medidas correctoras. Sin embargo, otros de los efectos, como veremos a continuación, parecen guardar relación con las características intrínsecas al eucaliptal (componentes químicos de partes verdes, estructura de la plantación, etc.).

Los suelos bajo eucaliptal tienden a ser más impermeables o hidrófobos y la hojarasca del eucalipto tiene sustancias alelopáticas que frenan el crecimiento de otras especies de plantas. Posiblemente relacionado con esto, las comunidades microbianas del suelo parecen verse seriamente afectadas, se observa una disminución en la diversidad de invertebrados del suelo y una fuerte reducción en la diversidad de hongos terrestres, líquenes y plantas. Por lo que respecta a los vertebrados terrestres, los anfibios muestran una reducción en la abundancia y diversidad bajo los eucaliptos, posiblemente causada por los efectos directos de los lixiviados de eucalipto en distintos aspectos ecológicos, comportamentales y fisiológicos de dicho grupo. La expansión de los eucaliptos afectaría, así, a especies que están incluidas en el Catálogo Vasco de Especies Amenazadas, como algunos anfibios. La abundancia y diversidad de aves también se reduce, posiblemente como consecuencia de una menor cantidad de alimento, así como falta de lugares propicios de nidificación, debido a las características intrínsecas de las plantaciones de eucaliptos: falta de oquedades, árboles maduros... En cuanto a los mamíferos terrestres, hay evidencia de algunos efectos negativos sobre roedores y musarañas, pero la evidencia es equívoca en el caso de los carnívoros, lo que posiblemente se deba al gran tamaño del área de campeo de estos animales (Gittleman & Harvey, 1982), en general mayor que las parcelas forestales, lo que dificulta detectar patrones entre vegetación y densidad o diversidad para este tipo de mamíferos.

Las plantaciones de eucaliptos también afectan a la mayor parte de las variables estudiadas en relación con los ríos. La hojarasca de eucalipto es un alimento de baja calidad y pobre en nutrientes, lo que acaba repercutiendo en la abundancia y diversidad de hongos, de invertebrados acuáticos y de peces, allá donde se han estudiado. Estos cambios, a su vez, afectan al funcionamiento del ecosistema fluvial, en este caso a su capacidad de descomponer la hojarasca que le llega. Los ríos bajo eucalipto también tienen menos madera muerta, lo que reduce la calidad del hábitat físico de sus cauces. En general, los impactos sobre los ríos parecen más acusados en zonas más secas de la península ibérica, como el centro de Portugal que en zonas más húmedas como Euskadi, pero aquí también son importantes.

Finalmente, aunque tanto los incendios forestales como la lucha contra el cambio climático son aspectos complejos en los que no sólo juegan factores biofísicos, parece que en ambos campos las plantaciones de eucaliptos aumentan los riesgos de dichos efectos, comparado con otro tipo de alternativas forestales.

Comparados con los pinares, los eucaliptales parecen causar peores efectos ambientales, salvo para algunas pocas variables, como la concentración de aluminio en el suelo o la diversidad de hongos terrestres, para las que parecen ser similares o incluso algo mejores. Sin embargo, comparados con los bosques nativos, los efectos ambientales de los eucaliptales parecen ser invariablemente peores.

En la tabla también se aprecia que conforme aumenta el número de estudios sobre una variable, lo hace la evidencia del impacto negativo, lo que sugiere que, en conjunto, los eucaliptos causan afecciones ambientales considerables. Esto sugiere que, en contra de lo que afirmaba la FAO (1995), los efectos de los eucaliptales son bastante generales, al menos si nos circunscribimos a un área geográfica relativamente limitada. Las afecciones ambientales de los eucaliptos son menos intensas que las de otros usos del suelo, como los industriales, pero dada la extensión espacial que pueden alcanzar, el impacto global de las plantaciones de eucaliptos puede ser notable. Además, hay que tener en cuenta que las plantaciones de eucaliptos se están realizando en zonas rurales y remotas, que en general tienen gran valor para la conservación de la biodiversidad (Scherr & McNeely, 2008, Navarro & Pereira, 2012), pero que están siendo especialmente afectadas por los eucaliptos.

A la hora de evaluar la información disponible y de extrapolar los resultados al futuro de Euskadi hay que tener en cuenta los aspectos espaciales y temporales. Desde el punto de vista espacial, es previsible que el impacto de los eucaliptos aumente al hacerlo la proporción de territorio cubierto por los mismos. Una parcela pequeña de eucaliptos rodeada de bosques autóctonos tendrá más opciones que una grande a la hora de ser colonizada por organismos que proceden del bosque nativo, por lo que su diversidad no se verá tan empobrecida. No obstante, la presencia de este tipo de parcelas de eucaliptal sí podría tener efectos sobre la diversidad de los bosques nativos del entorno, e.g. si actuara como trampa ecológica o sumidero demográfico de determinadas especies. Este es el caso de los anfibios que, como hemos visto, pueden ocupar los eucaliptales aunque eso les afecta negativamente. Para otro tipo de variables (e.g., hidrológicas), se ha visto en otras regiones que el efecto de los eucaliptos aumenta al hacerlo el nivel de ocupación del territorio (Álvarez-Garretón *et al.*, 2019), lo que también es esperable que ocurra en Euskadi, aunque no hay información suficiente para determinar cuál es la relación entre superficie y efectos en nuestro caso.

Desde el punto de vista temporal, es previsible que los impactos de los eucaliptales tiendan a aumentar. Las características del suelo de una nueva plantación vienen determinadas por los usos anteriores, pero irán cambiando conforme se incrementa el número de rotaciones. Por ejemplo, la progresiva pérdida de los nutrientes puede provocar pérdidas de fertilidad en las plantaciones de eucalipto. Igualmente, los cambios a largo plazo sobre la biodiversidad son seguramente mayores que los detectados en eucaliptales de primera o segunda generación, al irse agotando el banco de semillas de las especies que no consigan adaptarse a las nuevas condiciones. En general, el

impacto de las actividades humanas no es inmediato, sino que hay desfases temporales entre la fecha de comienzo de la actividad y los efectos que ésta va produciendo en el ecosistema. Este fenómeno genera lo que se llama “deuda de extinción”, esto es, que la biodiversidad continúe cayendo aun cuando las actividades humanas se mantienen, conforme se ajustan las relaciones biológicas entre las especies que sobreviven (Tilman *et al.*, 1994, Kuussaari *et al.*, 2009). La vía contraria, de que especies locales se adapten a vivir en ambientes nuevos, evidentemente existe (Calviño-Cancela & Neumann, 2015), pero el balance general de las actividades humanas suele ser de disminución de la biodiversidad de especies, favoreciendo sólo a determinadas especies generalistas o, a veces, las invasiones biológicas. Entre éstas se incluyen plagas exóticas que afectan a la propia plantación, reduciendo su rentabilidad (Wingfield *et al.*, 2008). Dado que los eucaliptales son relativamente recientes en Euskadi, cabe esperar que los niveles de biodiversidad dentro y, posiblemente, en torno a estas plantaciones, sigan descendiendo, más aún si la superficie que ocupan continúa aumentando al ritmo registrado durante los últimos años (Fig. 2).

Agradecimientos

Esta revisión proviene de un encargo original de Gobierno Vasco a los autores que firman este artículo. El trabajo llevado a cabo en éste fue financiado por Gobierno Vasco. Agradecemos los comentarios del editor asociado (R. Ibáñez), T. E. Gimeno y S. Goded, que nos permitieron mejorar una primera versión del trabajo.

Bibliografía



Las bibliografía del artículo se puede consultar en el link:

<http://www.aranzadi.eus/fileadmin/docs/Munibe/mcn.2020.68.20.pdf>

Fecha de recepción/ Date of reception: 14/04/2020

Fecha de aceptación / Date of acceptance: 23/07/2020

Editor Asociado / Associate editor: Ricardo Ibáñez