

Repercusiones del cambio climático en los bienes y servicios proporcionados por los bosques de montaña de Europa

M. Maroschek, R. Seidl, S. Netherer y M.J. Lexer

Una reseña de las situaciones de probable sensibilidad del ecosistema y sus repercusiones en los productos y servicios forestales, resultantes de los cambios climáticos esperados en los bosques de montaña de Europa, y las posibles opciones de adaptación.

A diferencia de muchas otras regiones montañosas del mundo, las zonas montañosas de Europa tienen una gran densidad de población, y ello determina que las exigencias que gravan sobre el ambiente sean muchas y potencialmente opuestas. Los ecosistemas forestales son elementos clave de la matriz de usos de la tierra de estas zonas y proporcionan a los medios de vida humanos bienes y servicios variados. Sin embargo, el cambio climático anunciado podría hacer peligrar los servicios del ecosistema debido a que los ecosistemas montañosos europeos se encuentran sumamente expuestos.

En los Alpes, por ejemplo, el incremento total observado de la temperatura durante la segunda mitad del siglo XX fue aproximadamente el doble del promedio mundial. Las proyecciones regionales procedentes de los modelos climáticos más avanzados indican que esta tendencia continuará durante el siglo XXI, con un

calentamiento esperado de alrededor de 3,5 a 4 °C en verano y un poco menos en las demás estaciones, entre hoy y el año 2100 (Christensen *et al.*, 2007). Los cambios en los patrones de precipitación y huracanes son aún muy inciertos y se verán influenciados fuertemente por la heterogeneidad de la geomorfología local de los paisajes montañosos. Se presume que en las zonas montañosas de Europa central, los patrones de precipitación se desplazarán determinando condiciones de mayor humedad en invierno y veranos cada vez más secos. Se proyecta que esta tendencia será aún más marcada en el Mediterráneo, donde las francas disminuciones en las precipitaciones durante el período de vegetación se amplificarán por efecto del

Los bosques de montaña proporcionan múltiples bienes y servicios a las comunidades locales, por ejemplo a las del valle de Stubai, en los Alpes centrales (Austria)



Michael Maroschek, Rupert Seidl y Manfred J. Lexer trabajan en el Instituto de Silvicultura, y **Sigrid Netherer** trabaja en Instituto de Entomología Forestal, Patología y Protección Forestales, todos del Departamento de Ciencias Forestales y del Suelo de la Universidad de Recursos Naturales y Ciencias Aplicadas de la Vida (BOKU), Viena (Austria).

M. MAROSCHEK

recalentamiento hasta en 4 °C para finales del siglo XXI. (Christensen *et al.*, 2007).

En este artículo se estudian las situaciones de sensibilidad del ecosistema, las repercusiones futuras en los bienes y servicios y las posibles opciones de adaptación a los cambios climáticos esperados en los bosques de montaña templados y mediterráneos de Europa. El estudio se centra en las principales cadenas montañosas de estas zonas climáticas –los Alpes, Cárpatos y Pirineos– y abarca diversos tipos (actuales) de bosques, que van desde los perennifolios latifoliados termófilos y los de coníferas secas hasta los alpinos de coníferas y los continentales templados caducifolios. Este trabajo forma parte del reciente estudio a fondo paneuropeo de síntesis sobre el cambio climático y las actividades forestales (Lindner *et al.*, 2008).

SITUACIONES DE SENSIBILIDAD DEL ECOSISTEMA FORESTAL

Los cambios en la temperatura, la disponibilidad de agua y el régimen de perturbaciones conducirán probablemente a modificaciones en la productividad de los ecosistemas forestales, y en particular de aquellos que ya padecen limitaciones debidas bien sea a la temperatura o al agua. Un contenido mayor de CO₂ atmosférico influirá también en la productividad, pero tal efecto aún no es plenamente conocido en las diferentes especies de árboles (Körner *et al.*, 2005).

Unas temperaturas más cálidas y unas condiciones ambientales menos rigurosas ya se han traducido en tasas de crecimiento más altas en las zonas de elevaciones mayores. Este efecto podría intensificarse a causa de la prolongación constante del período de vegetación, que podría asimismo estimular la eclosión temprana de las yemas y a su vez aumentar la susceptibilidad de los árboles a las heladas tardías. Se pronostica no obstante que la tendencia positiva del crecimiento habrá de proseguir, y en especial en los lugares no carentes de agua (Bolli, Rigling y Bugmann, 2007).

En las zonas de baja altitud y en los valles alpinos interiores, los patrones de precipitación cambiantes y las temperaturas en aumento podrían determinar situaciones de estrés ocasionado por la sequía, que podrían reducir la productividad. Este fenómeno ya ha sido observado recientemente, por ejemplo en el valle del Ródano superior en Suiza (Rebetez y Dobbertin, 2004).

Bosque subalpino de *Picea abies* infestado por el barrenillo *Ips typographus* cuyo desarrollo ya se ha visto favorecido por el cambio de la temperatura y el estrés ocasionado por la sequía, condiciones ambientales que aumentan la susceptibilidad de los árboles hospederos (encarte: galerías características de las larvas de *I. typographus*)



R. SEIDL

Al aumentar el estrés por ocasionado por la sequía se exagera también la vulnerabilidad de los bosques montanos a los agentes de perturbación bióticos, y ello tiene consecuencias que van desde una mayor mortalidad de árboles en el rodal hasta efectos drásticos en gran escala cuando los agentes estresantes rebasan la resiliencia del sistema (Raffa *et al.*, 2008).

El clima más cálido y seco acentúa asimismo la propensión de los ecosistemas forestales alpinos a daños abióticos. Los períodos de sequía, especialmente en invierno y primavera, favorecen el estallido de incendios forestales; y se espera que la frecuencia de éstos aumente no solo en los Pirineos, que ya son áridos y han sufrido la influencia del fuego, sino igualmente en los Alpes, donde los incendios de bosque han tenido históricamente una importancia menor (Reinhard, Rebetez y Schlaepfer, 2005; Schumacher y Bugmann, 2006). Aunque la influencia del cambio climático en la frecuencia y gravedad de las tempestades es aún incierta, el incremento del número de tempestades desastrosas en Europa central durante los últimos 20 años (por ejemplo, «Viviane» en 1990, «Lothar» en 1999 y «Kyrill» en 2007) pone de manifiesto una susceptibilidad mayor.

Los daños abióticos son el principal factor que contribuye al riesgo de perturbaciones bióticas, tales como la infestación por defoliadores (por ejemplo, Battisti, 2004) y brotes masivos de especies secundarias que infestan la madera (Nierhaus-Wunderwald y Forster, 2000). Los bosques de abeto rojo (*Picea abies*) de Noruega que han sufrido estrés ocasionado por la sequía o desarraigo por el viento son muy

propensos a ser atacados por los barrenillos del abeto *Ips typographus* y *Pityogenes chalcographus*, que proliferan a causa de las más altas temperaturas estivales e invernales (Wermelinger, 2004). La distribución espacial de las especies de árboles hospederos se extiende más allá de los límites de las zonas térmicas en donde se encuentran los barrenillos, pero con el auge de condiciones climáticas que favorecen la aparición de los insectos es posible que se registren brotes de barrenillos en los bosques de coníferas situados en zonas de altitud más elevada (Seidl *et al.*, 2009).

Aunque el desarrollo de muchos organismos poiquilotérmicos (organismos cuya temperatura corporal varía en consonancia con la temperatura que los rodea, como es el caso de los insectos) manifiesta una correlación positiva respecto al aumento de la temperatura, es posible también esperar efectos negativos para determinadas especies de plagas. Las más altas temperaturas invernales pueden ser perjudiciales para la inhibición o el mantenimiento de la diapausa (un estado de latencia que permite a los artrópodos sobrevivir en condiciones desfavorables), aumentar los índices de mortalidad durante la etapa de hibernación o impedir el sincronismo entre hospederos y herbívoros (Bale *et al.*, 2002; Battisti, 2004). En Suiza, por ejemplo, las densidades de población máximas, y por tanto la incidencia e intensidad de las plagas graves de mosca de las yemas del alerce, *Zeiraphera diniana* (un defoliador cíclico de los rodales de alerce alpinos interiores), han disminuido a lo largo de los últimos 30 años en concomitancia con la tendencia al recalentamiento climático debido proba-

blemente a una mayor mortalidad de los huevos y larvas (Esper *et al.*, 2007).

Los estudios de simulación han indicado por lo general que los nichos de las especies arbóreas forestales son muy sensibles al cambio climático; en consecuencia, la distribución y composición de las especies puede sufrir alteraciones. En los Alpes y Cárpatos se espera que el área potencial ocupada por las especies latifoliadas aumente en relación con la de las coníferas (Lexer *et al.*, 2002; Skvarenina, Krizova y Tomlain, 2004). En los montes Montseny, en España, por ejemplo, las zonas de distribución de *Quercus ilex* y *Fagus sylvatica* ya se han desplazado hacia altitudes mayores en las últimas décadas (Peñuelas *et al.*, 2007). La línea del bosque también se alzarán en los lugares en los se creen micrositios debido a la disminución de la mortalidad de árboles y a mayores procesos de crecimiento y reproducción en lugares en los que la temperatura es actualmente un factor de contención. Se ha observado que en los Alpes las líneas del bosque con *Picea abies* y *Pinus cembra* dominantes ya se han alzado en años recientes. Sin embargo, las líneas del bosque son sensibles no solo a los cambios climáticos sino también al cambio de uso de la tierra, ya que éste puede o bien compensar o amplificar los efectos del clima (Gehrig-Fasel, Guisan y Zimmermann, 2007).

REPERCUSIONES POTENCIALES EN LOS BIENES Y SERVICIOS FORESTALES

Las repercusiones en los bienes y servicios proporcionados por los bosques de montaña, derivadas de las situaciones de sensibilidad del ecosistema forestal descritas más arriba, podrán ser considerables. En especial en los rodales de coníferas en los Alpes y Cárpatos (Seidl *et al.*, 2009), la producción de madera sufrirá alteraciones debidas no solo a cambios en la productividad sino a posibles pérdidas resultantes de perturbaciones abióticas y bióticas. Sin embargo, el cambio climático tendrá como efecto ampliar la cartera silvícola en muchos ecosistemas forestales montanos y restará severidad a factores ecofisiológicos que imponen limitaciones a muchas especies de latifoliadas.

El servicio de secuestro de carbono se relaciona en parte con los cambios en la productividad. Se espera que los Alpes sigan desempeñando una función de sumidero de carbono a lo largo aproximadamente de la primera mitad de este siglo. Posteriormente, una mayor tasa de respiración y perturbaciones más frecuentes podrían determinar una merma en la capacidad de absorción del sumidero, pudiendo los bosques acabar incluso siendo fuente de carbono atmosférico. Será, en última instancia,

el contexto socioeconómico –incluida la demanda de biomasa forestal, el precio de mercado del secuestro de carbono y el cambio en el uso de la tierra– lo que determinará si los bosques de montaña europeos seguirán o no siendo sumideros de carbono (Zierl y Bugmann, 2007).

La provisión de agua potable cuenta como un servicio forestal importante tanto para las regiones montañas como para las zonas metropolitanas adyacentes. Las grandes perturbaciones podrían hacer aumentar la escorrentía y por consiguiente reducir el agua que se almacena en las cuencas de captación; este trastorno podría comprometer la seguridad hídrica, acrecentar la erosión del suelo e intensificar las inundaciones y el deslizamiento en masa. Además, la descomposición acelerada de la materia orgánica, resultante de la rotura de la espesura (ocasionada por las perturbaciones) y el alza de la temperatura podrían estimular la lixiviación de nitratos y otros nutrientes y desmejorar la calidad del agua (Jandl *et al.*, 2008). El balance hídrico podría verse amenazado en algunas regiones alpinas interiores debido a que el cambio climático impulsa la contracción de los glaciares. Unos glaciares que se retiran ya no conseguirán equilibrar las descargas de los ríos durante los meses de verano calurosos y secos, y ello reducirá la disponibilidad de agua (Zappa y Kan, 2007).

Un importante servicio proporcionado por el ecosistema en zonas de montaña densamente pobladas es la protección contra situaciones de emergencia tales como inundaciones, deslizamientos en masa, corrimientos de tierras, caída de rocas y avalanchas. Los impactos netos del cambio climático en esta función del bosque serán el resultado de los efectos combinados en la dinámica del bosque y en la magnitud y frecuencia de los mencionados fenómenos. En términos generales, el aumento de fenómenos perturbadores como la infestación de la madera, el desarraigo por el viento y el fuego tendrá repercusiones negativas manifiestas en la función protectora del bosque (Schumacher y Bugmann, 2006). En cambio, una línea del bosque más alta podrá ofrecer protección contra las calamidades al favorecer la estabilización de las masas erosionables, reducir la amplitud de las zonas donde se originan las avalanchas, contener la escorrentía ya que la intercepción y el consumo de agua son mayores, y estabilizar el suelo porque el



Los bosques protectores defienden la aldea austriaca de Hallstatt en los Alpes Calcáreos septentrionales contra el desprendimiento de rocas, las avalanchas y los deslizamientos en masa, fenómenos que podrían intensificarse si el bosque padeciese perturbaciones más intensas debidas al cambio climático



La línea del bosque dominada por Picea abies en el monte austriaco de Speikkogel es muy sensible a los cambios climáticos; una línea situada a una altura superior podría dar mayor estabilidad al bosque y permitiría a éste ofrecer una protección mejor en caso de peligros naturales, pero podría también alterar la biodiversidad

enraizamiento de los árboles es más profundo e intenso.

Una línea del bosque más alta puede también repercutir en la conservación de la biodiversidad. El desplazamiento en altura de las comunidades forestales y arbustivas subalpinas, por ejemplo el cinturón del *Pinus mugo* en los Alpes (Theurillat *et al.*, 1998), puede ejercer una influencia perjudicial en la fitodiversidad de las especies en las zonas alpinas y nivales. En cambio, en los bosques sujetos a intervenciones de ordenación, que condicionan fuertemente el perfil de la biodiversidad, la competencia creciente entre comunidades forestales con predominancia de especies caducifolias en zonas de altitud más elevada podría promover la biodiversidad general.

PERSPECTIVAS: NECESIDADES Y OPCIONES RELACIONADAS CON LA ADAPTACIÓN

En muchos ecosistemas forestales montañosos europeos será necesario adoptar medidas de adaptación para contrarrestar el impacto del cambio climático y preservar los bienes y servicios proporcionados por los bosques. Para poner en práctica estas medidas será indispensable tomar en consideración las condiciones biofísicas y socioeconómicas locales. Por consiguiente, solo se discute aquí un conjunto amplio de opciones generales destinadas a adaptar la ordenación forestal al cambio climático.

Es muy importante elegir un material reproductivo forestal apropiado (proveniencias y genotipos) y especies que puedan adaptarse a las condiciones que se pronostica prevale-

cerán en el futuro. Será posible mitigar los efectos de la sequía si los rodales se establecen con un espaciado mayor y si los planes de cuidados culturales y de raleo se ajustan a las necesidades (Spiecker, 2003). En una época de regímenes de disturbio cambiantes, es menester poner en ejecución acciones de protección forestal preventivas (por ejemplo, vigilancia de plagas) y correctivas (por ejemplo, cortas de saneamiento, control de plagas) con el objeto de reducir al mínimo los efectos adversos de las perturbaciones en la provisión de bienes y servicios forestales. Una cubierta forestal continua es importante para mantener la función protectora del bosque; y para garantizar la máxima estabilidad de los rodales e intensificar la regeneración es necesario que la cubierta sea objeto de cuidados culturales y de raleo. Además, un dosel bien estructurado y libre de interrupciones favorece el suministro de agua potable. Una infraestructura forestal mejorada (por ejemplo, gracias a la planificación de una red de carreteras) ayudará a la puesta en ejecución de estas medidas en los terrenos alpinos complejos. Asimismo, cuando se reduce la presión ejercida por otros factores, tales como el ramoneo de rumiantes y la deposición de sustancias contaminantes en los ecosistemas de montaña, se favorece la adopción de medidas de adaptación alternativas en materia de ordenación. En general, en las regiones montañosas de Europa es necesario poner en práctica una ordenación medioambiental integrada, y en especial en aquellas donde el cambio de uso de la tierra (por ejemplo, el abandono de las pasturas alpinas altas) haya alterado profundamente la estructura del paisaje.

La eficacia de las medidas de adaptación depende mucho de la disponibilidad de recursos humanos y de los conocimientos técnicos. Sin embargo, la base de conocimientos sobre los bosques de montaña europeos presenta aspectos de asimetría en cuanto a

temas y lugares: las investigaciones llevadas a cabo en los Alpes, por ejemplo, han sido más numerosas que las que han tenido por objeto los Cárpatos o los Pirineos. El servicio forestal más profusamente estudiado ha sido la producción de madera; en cambio, pocas monografías han tratado directamente el impacto del cambio climático en un suministro de agua potable de buena calidad, el esparcimiento y los productos forestales no madereros. Los resultados de una ordenación adaptativa dependerán de la medida en que se colmen los grandes vacíos que existen aún en la comprensión del impacto del cambio climático en los bosques de montaña que cumplen propósitos múltiples.

La investigación debe concentrarse con urgencia en las estrategias de adaptación. Un mecanismo de aplicación de decisiones racionales y la participación de las partes interesadas pueden ayudar en esta tarea así como en la de transferir los frutos de la investigación a los procedimientos prácticos de adaptación. Se hace pues un llamamiento a investigadores, responsables del diseño de políticas y profesionales para que conjuntamente creen la capacidad necesaria para hacer frente a los retos que plantea la ordenación sostenible de los bosques de montaña en las condiciones de un clima cambiante. ♦



Bibliografía

Bale, J.S., Masters, G.J., Hodkinson, I.D., Awmack, C., Bezemer, T.M., Brown, V.K., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J.C., Farrar, J., Good, J.E.G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T.H., Lindroth, R.L., Press, M.C., Symrnioudis, I., Watt, A.D. y Whittaker, J.B. 2002. Herbivory in global

- climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8: 1–16.
- Battisti, A.** 2004. Forests and climate change – lessons from insects. *Forest*, 1(1): 17–24.
- Bolli, J.C., Rigling, A. y Bugmann, H.** 2007. The influence of changes in climate and land-use on regeneration dynamics of Norway spruce at the treeline in the Swiss Alps. *Silva Fennica*, 41(1): 55–70.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioic, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. y Whetton, P.** 2007. Regional climate projections. In *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EE.UU., Cambridge University Press.
- Esper, J., Büntgen, U., Frank, D.C., Nievergelt, D. y Liebhold, A.** 2007. 1200 years of regular outbreaks in alpine insects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274: 671–679.
- Gehrig-Fasel, J., Guisan, A. y Zimmermann, N.E.** 2007. Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *Journal of Vegetation Science*, 18(4): 571–582.
- Jandl, R., Herman, F., Smidt, S., Butterbach-Bahl, K., Englisch, M., Katzensteiner, K., Lexer, M., Strebl, F. y Zechmeister-Boltenstern, S.** 2008. Nitrogen dynamics of a mountain forest on dolomitic limestone – a scenario-based risk assessment. *Environmental Pollution*, 155: 512–516.
- Körner, C., Asshoff, R., Bignucolo, O., Hättenschwiler, S., Keel, S.G., Peláez-Riedl, S., Pepin, S., Siegwolf, R.T.W. y Zotz, G.** 2005. Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. *Science*, 309: 1360–1362.
- Lexer, M.J., Hönninger, K., Scheffinger, H., Matulla, C., Groll, N., Kromp-Kolb, H., Schadauer, K., Starlinger, F. y Englisch, M.** 2002. The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 162(1): 53–72.
- Lindner, M., Garcia-Gonzalo, J., Kolström, M., Geen, T., Reguera, R., Maroschek, M., Seidl, R., Lexer, M.J., Netherer, S., Schopf, A., Kremer, A., Delzon, S., Barbati, A., Marchetti, M., y Corona, P.** 2008. *Impacts of climate change on European forests and options for adaptation*. Report to the European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development. AGRI-2007-G4-06. Bruselas, Bélgica.
- Nierhaus-Wunderwald, D. y Forster, B.** 2000. *Rindenbrütende Käfer an Föhren*. Merkblatt für die Praxis No. 31. Birmensdorf, Suiza, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL).
- Peñuelas, J., Ogaya, R., Boada, M. y Jump, A.S.** 2007. Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, 30(6): 829–837.
- Raffa, K.F., Aukema, B.H., Bentz, B.J., Carroll, A.L., Hicke, J.A., Turner, M.G. y Romme, W.H.** 2008. Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions. *BioScience*, 58(6): 501–517.
- Rebetz, M. y Dobbertin, M.** 2004. Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. *Theoretical and Applied Climatology*, 79(1–2): 1–9.
- Reinhard, M., Rebetz, M. y Schlaepfer, R.** 2005. Recent climate change: rethinking drought in the context of forest fire research in Ticino, south of Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 82(1–2): 17–25.
- Schumacher, S. y Bugmann, H.** 2006. The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. *Global Change Biology*, 12: 1435–1450.
- Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lindner, M. y Lexer, M.J.** 2009. Modelling bark beetle disturbances in a large scale forest scenario model to assess climate change impacts and evaluate adaptive management strategies. *Regional Environmental Change*. (En prensa; disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s10113-008-0068-2>)
- Skvarenina, J., Krizova, E. y Tomlain, J.** 2004. Impact of the climate change on the water balance of altitudinal vegetation stages in Slovakia. *Ekologia Bratislava*, 23(Suppl. 2): 13–29.
- Spiecker, H.** 2003. Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe – temperate zone. *Journal of Environmental Management*, 67(1): 55–65.
- Theurillat, J.-P., Felber, F., Geissler, P., Gobat, J.-M., Fierz, M., Fischlin, A., Küpfer, P., Schüssel, A., Velluti, C., Zaho, G.-F. y Williams, J.** 1998. Sensitivity of plant and soil ecosystems of the Alps to climate change. En P. Cebon, U. Dahinden, H.C. Davies, D. Imboden y C.C. Jaeger, eds. *Views from the Alps: regional perspectives on climate change*, pp. 225–308. Cambridge, Massachusetts, EE.UU., MIT Press.
- Wermelinger, B.** 2004. Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* – a review of recent research. *Forest Ecology and Management*, 202: 67–82.
- Zappa, M. y Kan, C.** 2007. Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(3): 375–389.
- Zierl, B. y Bugmann, H.** 2007. Sensitivity of carbon cycling in the European Alps to changes of climate and land cover. *Climatic Change*, 85(1–2): 195–212. ♦