

Repercusiones del cambio climático en la distribución de los pinos tropicales en Asia sudoriental

M. van Zonneveld, J. Koskela, B. Vinceti y A. Jarvis

*Para predecir las modificaciones en la distribución de *Pinus kesiya* y *P. merkusii* y los eventuales efectos en la conservación y uso de los recursos genéticos de estas especies, se recurre a modelos climáticos de envoltura.*

Los bosques de pino natural de Asia sudoriental se componen de dos especies de gran importancia económica –*Pinus kesiya* y *P. merkusii*– y de dos especies endémicas raras –*P. dalatensis* y *P. krempfii*–. Pese a la realización de diversos proyectos de conservación (por ejemplo, Centro Danida de semillas forestales, 2000; Razal *et al.*, 2005), la deforestación ha sido la causa de que la superficie ocupada por estas especies haya disminuido en las últimas décadas (FAO, 2007). Las prácticas insostenibles de resinación y de recolección de leña han degradado muchos de los rodales remanentes. La regeneración, crecimiento y distribución de estos pinares se verán probablemente amenazados asimismo por los efectos del cambio climático.

Aunque la deforestación ha determinado la erosión de los recursos genéticos de las especies de pino, los pinares remanentes encierran aún recursos genéticos que podrían ser usados para la rehabilitación

de los pinares naturales degradados, el mejoramiento de los árboles y el establecimiento de plantaciones de árboles.

Este artículo describe la aplicación de modelos climáticos de envoltura para la estimación de la presencia potencial de *P. kesiya* y *P. merkusii* en Asia sudoriental en las condiciones climáticas actuales, y analiza las modificaciones en la frecuencia de los individuos que podrían resultar del cambio climático. También se discuten las consecuencias, desveladas por los modelos, de la conservación y uso de los recursos genéticos de ambas especies en Asia sudoriental.

LOS PINOS DE ASIA SUDORIENTAL

Pinus kesiya crece en tierras altas (800 a 1 200 m), y se encuentra desde las colinas de Assam en la India a través de Myanmar, Tailandia, la República Democrática Popular Lao, Viet Nam y Camboya hasta China meridional y Filipinas (Turnbull, Armitage y Burley, 1980).

*El *Pinus kesiya* crece en tierras altas en Asia sudoriental: rodal natural en un montículo (pendiente izquierda) situado a 1 200 a 1 300 m de altitud, provincia de Chiang Mai (Tailandia septentrional)*



Maarten van Zonneveld es experto asociado de la oficina para las Américas de Biodiversity International en Cali (Colombia).

Jarkko Koskela y **Barbara Vinceti** trabajan en la oficina para Europa de Biodiversity International en Maccarese, Roma (Italia).

Andy Jarvis trabaja en Biodiversity International y en el Centro internacional de agricultura tropical (CIAT) en Cali (Colombia).



El *Pinus merkusii* crece en zonas de altitud menor: un rodal natural situado a una altitud de 600 m, provincia de Chiang Mai (Tailandia septentrional)

P. merkusii crece en tierras de altitud menor en los países mencionados, con exclusión de China e India (Cooling, 1968), y también en Indonesia (Sumatra); es por tanto la única especie de pino que crece de forma natural en el hemisferio sur. *P. daltensis* y *P. krempfii* se dan tan sólo en las tierras altas de Viet Nam meridional (Richardson y Rundel, 1998).

P. kesiya es plantada tanto dentro como fuera de su ámbito natural, y se ha convertido, sobre todo en varios países africanos, en una importante especie de silvicultura de poblaciones forestales artificiales. El valor de *P. merkusii* como especie para plantaciones artificiales es menor, porque en Asia sudoriental continental el incremento en altura inicial de los plantones se retrasa varios años (debido a que la especie pasa por una «etapa de pasto» cuando sus agujas forman matas de hierba durante el período de desarrollo de una robusta raíz pivotante; estas características se consideran ventajosas para la selección por regeneración natural en zonas donde los incendios forestales son frecuentes). Como las poblaciones insulares de *P. merkusii* no pasan por la «etapa de pasto», la especie ha sido utilizada para plantación tan sólo en Indonesia.

P. kesiya y *P. merkusii* crecen en suelos pobres y bien drenados, y forman a menudo rodales mixtos conjuntadas con especies

latifoliadas (por ejemplo, *Dipterocarpus*, *Quercus* y *Shorea*). Ambas especies de pino están relativamente bien adaptadas a los incendios forestales, pero los frecuentes fuegos de origen humano impiden la regeneración completa y ocasionan la formación de rodales abiertos que se asemejan a los de sabana. Sin embargo, los fuegos pueden favorecer el establecimiento de los pinos en lugares que de otra manera hubiesen sido ocupados por latifoliadas competidoras (Turakka, Luukkanen y Bhumibhamon, 1982).

PREDICCIÓN DE ÁREAS DE DISTRIBUCIÓN PRESENTES Y FUTURAS

Los modelos climáticos de envoltura son una herramienta práctica que permite evaluar rápidamente el impacto potencial del cambio climático en la distribución de las especies y los ecosistemas. Para realizar la modelación se adquiere documentación geográfica sobre la distribución de la especie con el objeto de predecir su nicho climático, es decir su presencia potencial. Los desplazamientos futuros que sufrirá el nicho se estiman en base a proyecciones climáticas tomadas de modelos de circulación global.

Para los análisis de las especies de *Pinus* en Asia sudoriental se utilizaron datos de procedencias de poblaciones naturales consideradas lugares de origen geográfico de

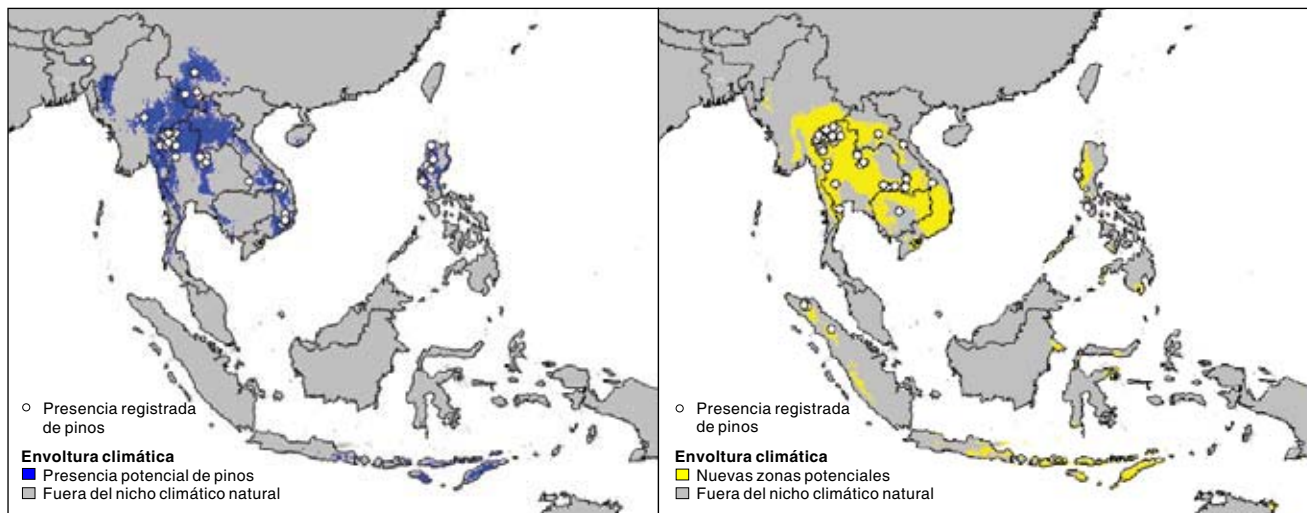
semillas para los programas de recolección (FAO, 1970; Centro danés/FAO de semillas forestales, 1973; Barnes y Keiding, 1989) y rodales boscosos prioritarios para los programas de conservación *in situ* (Centro Danida de semillas forestales, 2000; Razal *et al.*, 2005), así como datos de herbario accesibles libremente en la Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad (véase www.gbif.org). Los datos comprendían procedencias de 46 poblaciones naturales de *P. kesiya* y 50 poblaciones naturales de *P. merkusii*.

Para describir el clima actual en los sitios de las poblaciones naturales de pino se utilizaron 19 variables climáticas Bioclim (Busby, 1991) derivadas de las capas climáticas mundiales de la base de datos WORLDCLIM (Hijmans *et al.*, 2005a). De la base de datos también se extrajeron informaciones sobre el rango de altitudes presente de las especies. Se realizaron proyecciones climáticas para el año 2050 según predicciones promedio de dos modelos de circulación global ampliamente utilizados –el HADCM3 y el CCCMA– con arreglo a una hipótesis de emisiones de CO₂ en la que se estima que todo sigue igual.

Para elaborar la envoltura climática presente y futura respecto a la frecuencia natural de las dos especies de pino se aplicó el programa Maxent de modelos climáticos de envoltura (Phillips, Anderson y Schapire, 2006). A continuación se cartografiaron las envolturas, y se observaron los cambios o desplazamientos de las zonas de distribución.

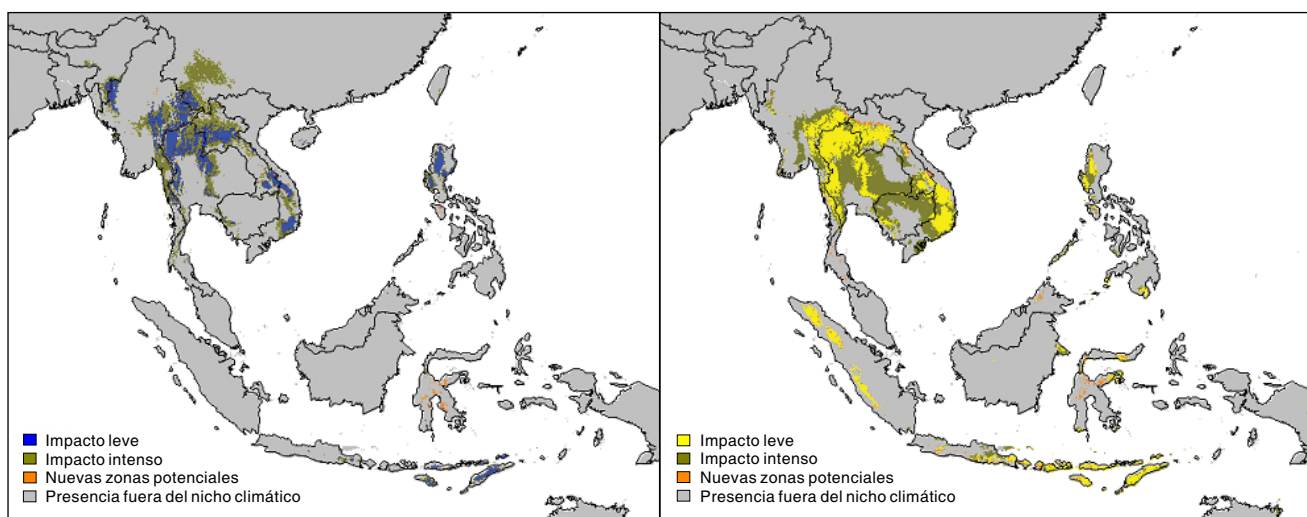
DISTRIBUCIÓN DE PINOS ACTUAL Y POTENCIAL BAJO LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS PRESENTES

La envoltura climática diseñada para *P. kesiya* (Figura 1) muestra que, además de las zonas en las que se ha registrado la existencia de poblaciones naturales, la especie podría también estar presente potencialmente en diversos otros lugares de Myanmar, Tailandia nororiental y meridional, la República Democrática Popular Lao y Camboya sudoccidental. Si bien en Myanmar se ha registrado la existencia de tan sólo una población, es probable que *P. kesiya* esté presente más abundantemente en ese país de lo que pareciera indicar la información disponible. Las provincias indonesias de Java y Nusa Tenggara quedan fuera de la zona de distribución natural de *P. kesiya*, pero, según se ha constatado, tienen un clima apropiado para el desarrollo de la especie.



1
Presencia registrada y potencial de Pinus kesiya

2
Presencia registrada y potencial de Pinus merkusii



3
Predicción del impacto del cambio climático respecto a la presencia de Pinus kesiya natural

4
Predicción del impacto del cambio climático respecto a la presencia de Pinus merkusii natural

La envoltura climática delineada para *P. merkusii* (Figura 2) coincide con la pauta de distribución de las especies observada en Asia sudoriental continental y en Sumatra. Los resultados del modelo indican que el clima es apropiado para el desarrollo de *P. merkusii* fuera de su zona de distribución geográfica natural en diversos lugares de archipiélago malasio y en Australia septentrional.

IMPACTOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN DE LOS PINOS

En términos generales, pocas son las zonas de Asia sudoriental continental que, de resultas del cambio climático, ofrecerán condiciones propicias para el desarrollo de

las dos especies de pino (Figuras 3 y 4). Se ha anticipado que los rodales de *P. merkusii* de las tierras bajas de Camboya y Tailandia puedan ser los más amenazados por las alteraciones climáticas (Figura 4). En cambio, se predice que en varias partes del archipiélago malasio el clima será más favorable para las plantaciones de *P. merkusii* y que lo será algo menos para las de *P. kesiya*.

La mayor parte de las poblaciones de *P. kesiya* registradas se encuentran en zonas de altitud mayor, por lo general a 1 022 m sobre el nivel del mar, y no se espera que el cambio climático las afecte mayormente. Las poblaciones de *P. kesiya* presentes en zonas caracterizadas por variaciones de los

valores estacionales de temperaturas altas serán las más amenazadas (Cuadro 1), y especialmente las que se encuentran en China meridional (Figura 3). Sin embargo, el impacto del cambio climático sufrido por estas poblaciones podría no ser tan drástico como lo predicen los modelos de envoltura. Las proveniencias chinas de *P. kesiya* establecidas en terrenos de ensayo en África sudoriental y Viet Nam fuera del ámbito climático natural de la especie han mostrado rendimientos moderadamente buenos (Costa e Silva, 2007); esto indica que bien podrían adaptarse a condiciones climáticas nuevas.

Se pronostica que los bosques de *P. merkusii* que ya se encuentran en zonas

de temperaturas elevadas serán los más vulnerables a los efectos del cambio climático (Cuadro 2). Las proveniencias de tierras bajas en Tailandia oriental y Camboya septentrional en particular serán las que más sufrirán los efectos del aumento pronunciado de la temperatura (Figura 4). Se espera que en varios de estos rodales se registren temperaturas que podrían superar el rango de tolerancia de la especie, con máximas en el mes más cálido del año 2050 por encima de los 36 °C (Cuadro 2), un valor que, según la base de datos Ecocrop de la FAO (véase Hijmans *et al.*, 2005b), matará los árboles adultos. Las proveniencias locales de *P. merkusii* existentes en estas zonas podrían sufrir degradación y terminar extinguiéndose.

CONSECUENCIAS

La amplitud de las zonas de distribución potencial de las dos especies de pino no implica necesariamente que los pinares puedan sobrevivir sin mayores dificultades. De hecho, los sitios de distribución actual comprenden un pequeño número de bosques que han quedado después de las cortas y de las actividades de explotación con fines de obtención de leña. En consecuencia, y según criterios de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2008), la conservación *P. merkusii* se caracteriza ya por una situación de vulnerabilidad. El cambio climático representa una amenaza adicional, puesto que las poblaciones naturales de estas especies están aún más expuestas a degradación y corren el riesgo de extinguirse.

Como se indicó anteriormente, se pronostica que las proveniencias de *P. merkusii* de tierras bajas hayan de ser las más afectadas por el cambio climático. La degradación y extinción de estas proveniencias podría traducirse en una pérdida importante de recursos genéticos para la silvicultura de poblaciones forestales artificiales y para las actividades de reforestación relacionadas con estas especies. Como muchos rodales de *P. merkusii* de tierras bajas están en lugares aislados, es probable que la migración de las proveniencias de tierras bajas hacia tierras de altura donde el clima es más favorable se vea limitada. Por lo tanto, el trasplante de las proveniencias de *P. merkusii* de tierras bajas a zonas climáticamente más apropiadas pareciera ser la única alternativa que permitiese conservar

los recursos genéticos *in situ*. En Michoacán (México), para conservar las proveniencias de *P. oocarpa* se ha recomendado adoptar medidas análogas (Sáenz-Romero, Guzmán-Reyna y Rehfeldt, 2006).

Los modelos de envoltura para la predicción del cambio climático toman en consideración los rangos climáticos en los cuales las especies existen naturalmente en la actualidad. Los modelos podrían arrojar sobreestimaciones acerca del impacto del cambio climático, ya que las especies podrían manifestar una capacidad de adaptación a una gama climática más amplia. Por lo demás, diversas especies de pino subtropicales y tropicales, entre las que está *P. kesiya*, ostentan un alto grado de variación genética y toleran un amplio rango de climas. Los ensayos llevados a cabo con especímenes provenientes de

múltiples lugares han mostrado que éstos se adaptan bien a un amplio rango de climas, y que podrían por consiguiente también amoldarse a condiciones climáticas nuevas en su propio hábitat natural, pese a que en los estudios realizados con modelos de envoltura se pronostique que tales condiciones son inadecuadas (van Zonneveld *et al.*, 2009).

Además del clima, las condiciones del suelo, la competencia entre las plantas y otros factores influyen también en la frecuencia de las especies y representan otros tantos elementos que limitan su distribución presente y el desplazamiento futuro de las zonas de distribución. Sin embargo, como se considera que el clima es el motor principal de los futuros cambios que afectan a las zonas de distribución, en los modelos de predicción climática no se han tenido

CUADRO 1. Cambios promedio pronosticados respecto a cinco variables del clima para poblaciones de *Pinus kesiya* en zonas de impacto leve e intenso

Variables del clima	Poblaciones en zonas de impacto leve			Poblaciones en zonas de impacto intenso		
	Presente	2050	Variación	Presente	2050	Variación
Temperatura media anual (°C)	21,7	23,3	1,6	22,9	24,3	1,3
Temperatura máxima en el mes más cálido (°C)	30,4	32,7	2,3	32,0	33,9	1,9
Variaciones estacionales de la temperatura (desviación estándar respecto a la temperatura media anual x 100)	197,0	188,9	-8,1	271,3	259,3	-12,0
Precipitaciones anuales (mm)	1754,1	1974,3	220,2			176,7
Precipitaciones en el trimestre más seco (mm)	53,6	48,3	-5,3	60,4	56,5	-3,9

CUADRO 2. Cambios promedio pronosticados respecto a cinco variables del clima para poblaciones de *Pinus merkusii* en zonas de impacto leve e intenso

Variables del clima	Poblaciones en zonas de impacto leve			Poblaciones en zonas de impacto intenso		
	Presente	2050	Variación	Presente	2050	Variación
Temperatura media anual (°C)	22,9	24,3	1,3	26,7	28,4	1,7
Temperatura máxima en el mes más cálido (°C)	32,0	33,9	1,9	34,3	36,7	2,5
Variaciones estacionales de la temperatura (desviación estándar respecto a la temperatura media anual x 100)	271,3	259,3	-12,0	161,2	170,8	9,6
Precipitaciones anuales (mm)	1511,0	1687,7	176,7	1721,7	1862,7	141,0
Precipitaciones en el trimestre más seco (mm)	60,4	56,5	-3,9	35,6	32,1	-3,5



Bibliografía

en cuenta tales otros factores. Es más, las proyecciones de los modelos de circulación global varían considerablemente, y por consiguiente los modelos de predicción climática tienen un margen de incertidumbre. No obstante, a pesar de sus limitaciones, los modelos de envoltura se consideran una herramienta eficaz para lograr una primera aproximación del impacto climático potencial en la frecuencia de las especies (Pearson y Dawson, 2003).

Este enfoque también podría aplicarse a otras especies y a otras regiones. Por ejemplo, se han usado métodos similares para predecir los efectos del cambio climático en el pino y especies de roble (*Quercus*) en México (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007) y numerosas especies de árboles en los Estados Unidos de América (Iverson *et al.*, 2008).

CONCLUSIONES

Los modelos climáticos de envoltura han ayudado a predecir qué bosques de pino se verán afectados con mayor probabilidad por efecto del cambio climático, y han permitido poner en práctica programas de conservación forestal y de ordenación no solo para anunciar cuáles serán los impactos, sino también para determinar oportunidades. Se espera que el cambio climático tenga repercusiones favorables en la silvicultura de poblaciones forestales artificiales de pino en el archipiélago malasio conforme aparezcan nuevas zonas dotadas de un clima idóneo para el establecimiento de *P. merkusii*, o algo menos idóneo para el establecimiento de *P. kesiya*.

A pesar de que las especies de este estudio pueden adaptarse de formas no previstas en los modelos a las nuevas condiciones climáticas, la situación de las proveniencias de tierras bajas de *P. merkusii* en Asia sudoriental continental parece ser crítica a la luz del aumento esperado de unas temperaturas que estarán por encima de la capacidad de tolerancia de las especies. Es probable que, de no tomarse medidas de conservación adecuadas, estas proveniencias terminen degradándose o extinguiéndose en las próximas décadas en aquellos lugares donde hoy se presentan de forma natural. ♦

- Barnes, R.D. y Keiding, H.** 1989. *Ensayos internacionales de procedencias de Pinus kesiya*. Recursos Genéticos Forestales., 17: 26-29. Roma, FAO.
- Busby, J.R.** 1991. BIOCLIM – a bioclimatic analysis and prediction system. En C.R. Margules y M.P. Austin, eds. *Nature conservation: cost effective biological surveys and data analysis*, pp. 64–68. Canberra, Australia, Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO).
- Cooling, E.N.** 1968. *Pinus merkusii*. Fast Growing Timber Trees of the Lowland Tropics No. 4. Oxford, Reino Unido, Commonwealth Forestry Institute.
- Costa e Silva, J.** 2007. *Evaluation of an international series of Pinus kesiya provenance trials for adaptive, growth and wood quality traits*. Forest & Landscape Working Papers No. 22. Copenhagen, Dinamarca, Forest & Landscape Denmark.
- Danida Forest Seed Centre.** 2000. *Conservation of genetic resources of Pinus merkusii in Thailand*. Technical Note No. 58. Humlebaek, Dinamarca.
- Danish/FAO Forest Tree Seed Centre.** 1973. *Pinus merkusii* provenance collections 1972. *Forest Genetic Resources Information*, 2: 62–63.
- FAO.** 1970. Nota sobre existencias de semillas de árboles de determinadas procedencias. *Unasylva*, 97/98: 130–132.
- FAO.** 2007. *Situación de los Bosques del Mundo 2007*. Roma.
- Gómez-Mendoza, L. y Arriaga, L.** 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology*, 21: 1545–1555.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. y Jarvis, A.** 2005a. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965–1978.
- Hijmans, R.J., Guarino, L., Jarvis, A., O'Brien, R., Mathur, P., Bussink, C., Cruz, M., Barrantes, I. y Rojas, E.** 2005b. *DIVA-GIS Version 5.2 manual*. Disponible en: www.diva-gis.org
- Iverson, L.R., Prasad, A.M., Matthews, S.N. y Peters, M.** 2008. Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios. *Forest Ecology and Management*, 254: 390–406.
- Pearson, R.G. y Dawson, T.E.** 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12: 361–371.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. y Schapire, R.E.** 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*, 190: 231–259.
- Razal, R.A., Tolentino, E.L.T. Jr., Carandang, W.M., Nghia, N.H., Hao, P.S. y Luoma-Aho, T.** 2005. Status of genetic resources of *Pinus merkusii* (Jungh et De Vriese) and *Pinus kesiya* (Royle ex Gordon) in Southeast Asia. Los Baños, Filipinas y Serdang, Malasia, Colegio de Silvicultura y Recursos Naturales de la Universidad de Filipinas, Los Baños y Oficina Regional para Asia, el Pacífico y Oceanía del Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI)
- Richardson, D.M. y Rundel, P.W.** 1998. Ecology and biogeography of *Pinus*: an introduction. En D.M. Richardson, ed. *Ecology and biogeography of Pinus*, pp. 3–46. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press.
- Sáenz-Romero, C., Guzmán-Reyna, R.R. y Rehfeldt, G.E.** 2006. Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, Mexico – implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management*, 229: 340–350.
- Turakka, A., Luukkanen, O. y Bhumibhamon, S.** 1982. Notes on *Pinus kesiya* and *P. merkusii* and their natural regeneration in watershed areas of northern Thailand. *Acta Forestalia Fennica*, No. 178.
- Turnbull, J.W., Armitage, F.B. y Burley, J.** 1980. Distribution and ecology of the *Pinus kesiya* complex. En F.B. Armitage y J. Burley, eds. *Pinus kesiya*, pp. 13–45. Tropical Forestry Paper 9. Oxford, Reino Unido, Commonwealth Forestry Institute.
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).** 2008. *2008 IUCN Red List of Threatened Species*. Disponible en: www.iucnredlist.org.
- van Zonneveld, M., Jarvis, A., Dvorak, W., Lema, G. y Leibing, C.** 2009. Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumanii* populations in Mexico and Central America. (Presentado para publicación.) ♦