

4. Alertas forestales

BOSQUES HIGROFÍTICOS DE MONTAÑA NUBOSOS O BRUMOSOS

De todas las situaciones forestales, los bosques higrofiticos nubosos o brumosos son los que mantienen una relación más cercana con el agua dulce. Estos bosques están en zonas montañosas o en tierras altas envueltas por una bruma frecuente y persistente, en particular en la intersección directa de las nubes impulsadas por el viento con la superficie. Presentes sobre todo en las zonas tropicales, los bosques higrofiticos son comunes en las grandes montañas del interior, a alturas de 2 000 a 3 000 metros. En las sierras costeras pueden estar a 1 200 metros, y en las islas pequeñas aun a 500 metros (Hamilton, Juvik y Scatena, 1994). Además de la precipitación vertical normal, estos bosques tienen otra fuente de agua: la intercepción y caída de agua de la niebla que se desplaza horizontalmente, la cual puede añadir cientos de milímetros de agua al año al ecosistema y a su cuenca (Bruijnzeel y Hamilton, 2000).

Las estimaciones recientes de la superficie de los bosques higrofiticos de las zonas tropicales varían considerablemente. La estimación oficial del Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación (CMVC), del Programa de las Naciones Unidas para

Los bosques brumosos son importantes para la producción de agua, el control de la erosión y la biodiversidad (Malasia)



el Medio Ambiente (PNUMA) se basa en la cubierta forestal y el margen de altitud, y ofrece una superficie mundial potencial. En 2004, se calculó una superficie de 380 000 km², menos del 2,5% del total de los bosques tropicales (Bubb *et al.*, 2004). Una estimación basada en un modelo de bosques nubosos ofrece una cifra mucho más grande, de 2,2 millones de km² (14,2% del total de los bosques tropicales) (Mulligan y Burke, 2005). Esta diferencia refleja la dificultad para definir y ubicar estos ecosistemas. Una base de datos del CMVC-PUMA señala más de 560 puntos que se sabe que son bosques higrofíticos (Aldrich *et al.*, 1997).

Los árboles de los bosques higrofíticos por lo general son más cortos que los de otros bosques de montaña más bajos, mucho más musgosos y están mucho más cargados de bromelias, orquídeas, helechos, líquenes y hepáticas (epífitas). Los troncos de los árboles se vuelven cada vez más retorcidos y nudosos con la altura, son frecuentes los helechos de árbol y el bambú, y el musgo cubre las rocas y los troncos caídos. Sin embargo, en algunas situaciones llegan a crecer árboles finos, rectos y más altos, como en los bosques nubosos de *Podocarpus* de los Andes y en los de *Quercus* de la Cordillera de Talamanca, en Costa Rica. Todas las superficies epífitas, y el follaje de los árboles, las ramas, los tallos y los arbustos, forman una “red” que captura la precipitación horizontal de la niebla o las nubes, y se suma al caudal de la cuenca como goteo de la bruma o escurrimiento en los troncos. En los bosques envueltos de bruma la transpiración es relativamente poca, por las hojas pequeñas y los suelos muchas veces húmedos y encharcados, lo que hace mínima esta pérdida.

La cantidad de agua “adicional” que obtienen los bosques brumosos varía mucho de acuerdo con las pautas pluviales, la posición topográfica, la frecuencia o persistencia de la niebla y la medida en que el viento impulsa las nubes (Cuadro 2). El aumento puede ser del 15% al 20% en el caso de las lluvias de 2 000 a 3 000 mm al año, y hasta del 50% al 60% en las cumbres de las cordilleras con menos lluvia (Bruijnzeel y Hamilton, 2000). El agua capturada en situaciones de niebla o nubes en zonas de menos lluvia y lluvia estacional puede ser del 100% o más que en los bosques situados más abajo. En zonas de menos lluvia, pero niebla frecuente impulsada por el viento, incluso los árboles solos pueden funcionar como importantes recolectores de agua para la fauna silvestre y las reservas domésticas de la población. Se encontró un ejemplo famoso en El Hierro, una de las Islas Canarias, donde uno de varios “árboles manantiales” (un laurel) se utilizó durante siglos como principal fuente de agua para las personas y sus animales, hasta que lo desarraigó una tormenta (Gioda *et al.*, 1992). Este árbol era tan importante que está representado en el escudo municipal de la isla. En 1945 se plantó otro árbol para sustituirlo, que sigue atrapando cantidades valiosas de agua de niebla hasta hoy en día.

Se pueden plantar árboles en lugares estratégicos de niebla para que capturen la precipitación horizontal a fin de utilizarla. Donde es difícil plantar árboles por falta de lluvia, como en las montañas costeras de Chile y el Perú, se han instalado mallas, como bosque brumoso artificial que proporciona agua potable a comunidades donde ésta escasea.

CUADRO 2

Ejemplos de cantidades de precipitación horizontal en bosques nubosos tropicales de montaña cuantificadas por captadores de niebla

Lugar	Elevación en metros	Precipitación horizontal en % de lluvia	Período
Colombia, Serranía de Maquira	865	63	temporada seca
Costa Rica, Cerro Buenavista	3 500	18	anual
Costa Rica, Balalaica	1 300	33	anual
Costa Rica, Balalaica	1 300	15	temporada húmeda
Hawai, Mauna Loa	1 580	30	anual
Hawai, Mauna Loa	2 530	68	anual
Malasia, Gunung Silam	884	9	anual
México, Sierra Madre	1 330	15	temporada húmeda
México, Sierra Madre	1 330	85	temporada seca
Puerto Rico, Pico del Oeste	1 050	7	anual
Venezuela, Cerro Santa Ana	815	32	anual
Venezuela, Cerro Santa Ana	815	66	temporada seca
Venezuela, Cerro Copey	987	11	anual
Venezuela, Cerro Copey	987	9	temporada seca
Venezuela, Zumbador	3 100	4	anual
Venezuela, Zumbador	3 100	19	temporada seca

Fuente: Nik, 1996.

Si se eliminan los bosques higrofiticos nubosos se pierde gran parte de esta captación adicional. Aunque no se han cuantificado adecuadamente las reducciones producidas después de desmontar terrenos, debería prevalecer el principio de precaución (Bruijnzeel, 2005). Se recomienda determinar las zonas de bosques brumosos o nubosos, hacer su cartografía y protegerlos por los servicios hidrológicos que proporcionan. En Costa Rica y en otras partes se han establecido pagos a los propietarios de tierras por mantener los bosques nubosos (Capítulo 6). Otra respuesta conveniente consiste en darles la condición jurídica de bosques protectores de cuenca, parques nacionales o reservas naturales. Los bosques nubosos tienen un valor en extremo elevado por su biodiversidad, ya que el endemismo que hay en estas franjas forestales de las montañas es extraordinario. Allí viven animales como el gorila de las montañas africano, el oso andino, el tapir de las montañas, el quetzal resplandeciente y numerosos anfibios que están en peligro de extinción (Bruijnzeel y Hamilton, 2000). Estudios realizados por BirdLife International revelan la importancia de los bosques higrofiticos tropicales de montaña en todo el mundo para especies de aves que están amenazadas y viven en zonas restringidas (Long, 1994).

Como se dijo, se estima que estos bosques pueden abarcar menos del 2,5% de la superficie mundial de bosques húmedos (Bubb *et al.*, 2004). Se trata de una estimación generosa, basada en la exclusión en los mapas de los bosques más bajos de montaña, pero incluidos 605 sitios conocidos de bosques higrofiticos. No se incluyen los bosques nubosos de montaña subtropicales. Es interesante señalar

RECUADRO 4

Ejemplos de bosques nubosos y el suministro de agua

Millones de personas dependen del caudal de agua dulce de buena calidad que llega de los bosques nubosos y otros análogos. Los bosques higrofiticos nubosos del parque nacional de La Tigra, en Honduras, mantienen un caudal de agua de buena calidad, bien regulado durante todo el año, que aporta más del 40% del suministro de agua a los 850 000 habitantes de Tegucigalpa, la capital. Los 2,5 millones de habitantes de Dar es Salaam (República Unida de Tanzania) dependen del agua potable de las montañas de Uluguru, y del suministro hidroeléctrico de los bosques nubosos de las montañas de Udzungwa, que hoy son objeto de modestas intervenciones de conservación. Otras poblaciones urbanas que reciben agua de bosques nubosos son 1,3 millones de personas de Quito y 20 millones de personas de la Ciudad de México.

El monte Celaque, del norte de Honduras, es denominado "Caja de Agua" en la lengua lenca, y desde hace milenios la población lenca le rinde culto como montaña divina que suministra agua vital a las tierras y a la gente. Esta montaña, cubierta de un denso bosque nuboso, da origen a nueve ríos importantes e innumerables arroyos, que suministran agua limpia a las ciudades y comunidades próximas. En Guatemala, la Reserva de la Biosfera de Sierra de las Minas contiene el 60% del hábitat de los bosques higrofiticos que quedan en el país. Más del 60% de los ríos permanentes drenan la reserva y la convierten en el recurso hídrico más grande de Guatemala. Esto tiene especial significado en el valle de Motagua, situado al sureste de la sierra, que es un desierto de sombra pluviométrica que depende mucho de la irrigación. En zonas áridas y semiáridas, los terrenos de bosque nuboso son todavía más decisivos para el suministro de agua para las comunidades circundantes, sobre todo en la estación seca, como en el monte Kenya.

Sin el río Chagres, la construcción del Canal de Panamá hubiera sido casi imposible. Su manantial está en la cuenca alta, en una serie de montañas cubiertas de bosques nubosos tropicales. Este ecosistema garantiza el suministro de agua para los lagos Madden y Gatún, que proporciona el calado necesario para los barcos en tránsito.

Fuente: UICN y WWF, 2000.

que la superficie de bosques nubosos potenciales en Asia se estima en 14,6% de la superficie forestal tropical del continente, proporción más elevada que la de los otros continentes.

Si bien los sitios de los bosques nubosos muchas veces no son aptos para conversión a otros usos sostenibles, debido a limitaciones del suelo, al clima y a problemas de acceso, los amenaza la producción de hortalizas, el cultivo de opio o coca, el pastoreo, el cultivo de café e incluso la creación de campos de golf y sitios de esparcimiento. La tala excesiva para producir carbón o leña también es



Los bosques palustres desempeñan una función singular en el equilibrio hidrológico. Son entornos delicados en los que el mantenimiento de la integridad hidrológica es una prioridad de ordenación (Polonia)

un peligro en estas frescas localidades de montaña (estudio de caso 4). El calentamiento del planeta parece estar elevando la capa de nubes en algunos lugares, con posibles graves efectos negativos tanto para el suministro de agua como para la biodiversidad.

Directrices

En vista de su importancia para la producción de agua, el control de la erosión y la biodiversidad, así como por su idoneidad para otros usos sostenibles, los bosques nubosos se deberían mantener como bosques. Es necesario señalarlos en los inventarios locales, regionales y nacionales. Su pérdida es irreversible debido a las complejas relaciones que hay entre su flora, su fauna y sus suelos (Hamilton, 1995). La conservación de los bosques higrofiticos y su designación como zonas protegidas deberían ser prioridades nacionales.

BOSQUES PALUSTRES

Los bosques palustres son un tipo importante de bosque que desempeña una función exclusiva en el equilibrio hidrológico local y en la ecología mundial. Cualquier humedal con vegetación leñosa es un bosque palustre, independientemente del tamaño de las plantas, que pueden tener desde un metro de altura, como el mangle *Rhizophora mangle*, hasta los cipreses de 50 metros de altura *Taxodium distichum* (Lugo, Brinson y Brown, 1990). Los bosques palustres de agua dulce

ESTUDIO DE CASO 4

Peligro de fragmentación del bosque nuboso de Xalapa, Veracruz (México)

En los últimos decenios se ha acelerado considerablemente la destrucción del bosque nuboso tropical de montaña de la región occidental de Xalapa, Veracruz. Para determinar el grado y la pauta de la fragmentación del bosque de esta región se digitalizaron e interpretaron 33 fotografías aéreas (escala 1:20 000) a fin de generar mapas de la vegetación y el uso del suelo. Se incorporó información adicional sobre la pendiente, el aspecto de la misma y los asentamientos humanos en un sistema de información geográfica. En la zona de estudio de 12 843 hectáreas quedan 19 fragmentos de bosque inalterado, que ocupan apenas un 10% de la región. Los usos predominantes de las tierras son pastizales (37%), zonas urbanas (1%), vegetación secundaria (17%) y bosques modificados (17%).

Las pocas superficies planas de la región (3,2%) están ocupadas por zonas urbanas y pastos, mientras que el bosque inalterado está principalmente en laderas empinadas, expuestas al norte y alejadas de la actividad humana. Fragmentos del bosque están rodeados de pastos, bosques modificados y vegetación secundaria, que pueden producir fuertes efectos de bordes y reducir otro 15% a 54% la cubierta forestal inalterada, de acuerdo con la superficie del fragmento de bosque. Los resultados indican que ya se destruyó el 90% del bosque de la región y el resto corre peligro de desaparecer. Es necesario un plan de desarrollo regional que tenga en cuenta la importancia de los bosques higrofiticos nubosos como reservas de biodiversidad y proveedores de servicios ambientales decisivos, que proteja los fragmentos forestales subsistentes y promueva el restablecimiento ecológico del bosque alterado y la creación de corredores que conecten lo que queda del bosque.

Fuente: Tomado de Williams-Linera, Manson e Isunza Vera, 2000.

son una fuente importante de pescado y otros alimentos acuáticos, así como de madera y leña. Interactúan con los ciclos biogeoquímicos y la cadena alimentaria, desempeñan un papel fundamental en la dinámica de la cantidad y calidad del agua local (Maltby, 1997; Maltby y Proctor, 1996) y ofrecen un hábitat distintivo a la biodiversidad. Los bosques palustres continentales protegen las cuencas hidrográficas, mientras que los pantanos costeros protegen las costas de las mareas, la elevación del nivel del mar y los peligros naturales.

En cualquier zona climática la hidrología es el factor determinante primordial para el establecimiento y el mantenimiento de los tipos específicos de pantanos (Lugo, Brinson y Brown, 1990; Mitsch y Gosselink, 1993). También es un factor determinante clave en la distribución de las especies, la productividad de las tierras húmedas (la biomasa producida por unidad de tiempo) y la circulación y disponibilidad de los nutrientes. La hidrología de las tierras húmedas de las cuencas (como las que se encuentran en las depresiones topográficas) es diferente de la de los

pantanos ribereños o marginales. La topografía local también repercute en el agua corriente. Un humedal de una cuenca grande puede contener una mezcla de tipos de humedales de comportamiento diverso (de cuenca o fluvial), de acuerdo con su ubicación y con la temporada. Las cantidades de nutrientes que llegan o salen de un pantano también son importantes para determinar su tipo.

Un modelo mejor de estructura y función potencial del bosque palustre se obtiene cuando se considera la hidrología junto con el contenido de nutrientes y su circulación (eutrófico a diferencia de oligotrófico, o minerotrófico a diferencia de ombrotrofico) (Brown, 1981; Odum, 1984, ambos citados en Lugo, Brinson y Brown, 1990). Estos últimos autores hacen hincapié en la necesidad de considerar los aspectos químicos de los humedales boscosos más integralmente. También mencionan la confusión de la nomenclatura utilizada para designar los humedales boscosos, debido al énfasis en la composición de las especies y el tipo de vegetación, que varía geográficamente, en vez de basarse en la hidrología y la geomorfología, para las cuales la variación geográfica es mucho menor. Por ejemplo, Swain y Kearsley (2001) señalaron 11 clases distintas de bosques palustres templados con base en las especies de árboles predominantes (coníferas, frondosas y vegetación arbustiva).

En los pantanos boscosos se desarrolla una estructura mayor y son más productivos en condiciones fluviales (Lugo, Brinson y Brown, 1990). La modificación de la cubierta vegetal palustre, mediante la explotación de la madera, por ejemplo, repercute en la calidad y cantidad del agua (Immirzi, Maltby y Vijnansorn, 1996; Ensign y Mallin, 2001). Las modificaciones hidrológicas que afectan a la calidad y cantidad del agua en los bosques palustres repercuten en la estructura de la comunidad y las especies constitutivas. El aporte de nutrientes de los usos de las tierras circundantes también repercute en la estructura de la comunidad y permite que especies menos tolerantes desplacen a las especies especialistas que utilizan pocos nutrientes (Swain y Kearsley, 2001; van Andel, 2003). Por ejemplo, en un pantano costero después de talado, el agua muestra una cantidad considerablemente mayor de sólidos en suspensión, total de nitrógeno, total de fósforo, total Kjeldahl de nitrógeno y bacterias fecales coliformes, y una cantidad muy inferior de oxígeno disuelto. Los efectos nocivos de largo plazo incluyen la proliferación recurrente de algas. Incluso una zona de protección sin talar de 10 metros es insuficiente para prevenir estos efectos en la calidad del agua (Ensign y Mallin, 2001).

La hidrología de las turberas es muy compleja y es decisiva para el funcionamiento de sus ecosistemas (estudio de caso 5). Algunos de estos pantanos están sobre una capa impermeable de roca o de suelo que impide el paso del agua entre el acuífero y el pantano. Otros pantanos se han formado por el agua subterránea que aflora a la superficie a través de manantiales, mientras que otros más se forman en suelos permeables situados sobre acuíferos, lo que permite al agua recargar el acuífero directamente. Debido a su gran extensión, las turberas son muy importantes para mantener el equilibrio hidrológico en todo el paisaje. Las zonas centrales de estos pantanos pueden estar saturadas de agua permanentemente, mientras que las zonas marginales tienen regímenes hidrológicos variables y pueden recibir la crecida de los

ESTUDIO DE CASO 5

Conservación y utilización sostenible del bosque palustre de turba de Pahan sudoriental

La cubierta de bosques palustres de turba en Malasia hoy se limita a zonas reducidas en el norte y sureste de Selangor, Tasek Bera (Pahan meridional), un gran complejo en Pahang sudoriental, la península de Kliás en Sabah, el territorio continental del río Baram y la periferia de Loagan Bunut en Sarawak. El bosque palustre de turba de Pahang sudoriental está considerado el último inalterado del continente en Asia que permanece como un complejo forestal único, casi contiguo.

Como uno de los tipos de hábitat de humedales más amenazados del mundo, este bosque es objeto de interés mundial de conservación. Contiene un conjunto singular de biodiversidad de bosque tropical bajo, aporta importantes beneficios y servicios y sustenta los medios de subsistencia de numerosas comunidades locales. A escala nacional ha sido designado como zonas muy amenazadas y ecológicamente delicadas en el proyecto de plan nacional recientemente preparado por el Departamento Federal de Planificación Urbana y Rural. BirdLife International designó esta zona como importante para las aves y es sitio de un programa quinquenal de Conservación y uso sostenible de bosques palustres tropicales de turba y ecosistemas afines de humedales, proyecto conjunto del Instituto de Investigación Forestal de Malasia (FRIM), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM).

El espectro de los hábitats encontrados en el bosque palustre de turba de Pahang sudoriental va desde los acuáticos superficiales próximos a la costa hasta el rico mosaico de hábitats húmedos y de tierras áridas que están más tierra adentro. Los tipos de bosques de este complejo pertenecen a formaciones de clímax climático (como los bosques de dipterocarpaceas de las tierras bajas) y formaciones de clímax edáfico como los manglares, turberas, bosques de playa, bosques palustres de agua dulce, brezales, bosques ribereños y formaciones forestales inestables (como los de vegetación padang).

Los principales ríos que hay en el complejo forestal son el Bebar y el Merchong, que corren hacia occidente desde las montañas orientales. Son ríos negros que drenan la zona palustre de turba y tienen un pH muy bajo y muy poco oxígeno disuelto. También hay una amplia red de canales donde se ha drenado el pantano para extraer madera y cultivar las tierras. La influencia de las mareas en los ríos es muy marcada, sobre todo cuando hay una descarga baja del río, y se extiende a una distancia considerable hacia arriba desde el gradiente bajo, con resaca en las mareas altas. La penetración salina por los cauces fluviales hacia arriba produce una zonificación característica de la vegetación ribereña a lo largo de las partes bajas de los ríos.

La vegetación del fondo de macrofitas es limitada y la más común es de *Utricularia aurea*, presente en las partes donde la corriente fluye con mayor lentitud y en algunos canales fabricados por el hombre. Un hallazgo significativo en el río Bebar es el fondo

de *Cryptocoryne cordata* en algunas de sus zonas más altas. Son una zona importante de desove, alimentación y cría de peces jóvenes. Los *Euryhaline* y otros peces de agua dulce y los camarones se desplazan río arriba y río abajo, por lo general todos los días con las mareas, a fin de alimentarse y en temporada para desovar.

De los 238 taxones de turba registrados en la Malasia peninsular, por lo menos 221 están documentados en el bosque de Pahang sudoriental. Los más significativos son: *Gonostylus bancanus* (ramín), una importante especie maderera de distribución limitada en Malasia y en todas partes; *Durio carinatus*, fuente de alimento para los bucerótidos y otros animales silvestres; *Tetra glabra*, importante especie comercial; *Astonia angustiloba*, donde el marabú menor prefiere hacer su nido; *Leptoptilus javanicus* y *Nageia motlei*, gimnosperma relativamente rara. También hay 17 especies endémicas de árboles de la Malasia peninsular, 62 especies de mamíferos (tres en peligro de extinción, cinco vulnerables y nueve casi amenazadas) (UICN, 2002), 233 especies de aves (ocho endémicas de Sundaland), ocho especies de tortugas, 17 especies de anfibios y 56 especies de peces. De las especies de peces consideradas estenotópicas (tolerantes sólo a una breve variedad de factores ambientales) de los ríos negros en Malasia peninsular, está documentada la presencia del 70% en este bosque; dos de las 17 especies de anfibios (*Pseudobufo subasper* y *Rana baramica*) parecen ser especies exclusivamente de turbera.

Los jakun, principal población autóctona del bosque de Pahang sudoriental, depende de los recursos naturales del complejo para satisfacer el grueso de sus necesidades básicas: alimentos, vivienda y medicamentos. El pescado de la turbera es una fuente importante de proteínas para las comunidades que viven alrededor y a lo largo de las corrientes de agua. Las casas se construyen por completo con productos del bosque palustre. Se utiliza ratán para fabricar herramientas, utensilios domésticos y trampas para pescar, y con las hojas del *Pandanus* spp. se elaboran artesanías.

Los compartimientos forestales de este bosque seguían intactos en 2000, aunque se han talado las zonas circundantes o se han convertido en terrenos agrícolas, lo que amenaza la integridad ecológica. El drenaje de los bosques palustres para destinar el terreno a la agricultura modifica la hidrología local mediante la creación de embalses, presas y válvulas de retención para irrigación. El uso de fuego para abrir tierras en proximidad del bosque también amenaza la integridad ecológica del complejo. El drenaje puede secar la capa superficial de turba y plantear un peligro serio de incendios. Los incendios de turba son difíciles de apagar y arden durante períodos prolongados.

La ordenación de las turberas deberá adoptar un enfoque integrado de ecosistema que tenga en consideración los beneficios económicos, sociales y ambientales que se pueden derivar del bosque palustre. Este enfoque administra el uso de los recursos en forma adaptable a fin de satisfacer el doble objetivo de sostenibilidad y mantenimiento del potencial productivo del complejo. Este es el objetivo general del proyecto FRIM-PNUMA/FMAM.

Fuente: Tomado de FRIM, PNUMA y FMAM, 2004.

ríos, sobre todo en las temporadas húmedas (Rieley, Ahmad-Shah y Brady, 1996).

El agua se almacena en la capa inerte o inactiva (catotelmo) de las turberas, en volúmenes que se han observado relativamente constantes durante períodos largos si el pantano está inalterado. Casi todos los cambios en el almacenamiento de agua se producen por cambios en el nivel freático. Estos cambios de almacenamiento no representan más del 3% al 10% de la capacidad de almacenamiento (Ingram, 1983). El agua se drena libremente en la capa superior, activa (acrotelmo), en la cual es decisivo el almacenamiento para el equilibrio hidrológico de los pantanos y las zonas circundantes, y los efectos de la deforestación, el drenaje o la extracción de turba (y la consiguiente oxidación y degradación de las zonas drenadas de los pantanos) producen fuertes efectos en la hidrología local.

Las turberas constituyen más de la mitad de la superficie mundial de humedales (Maltby e Immirzi, 1996). En las zonas tropicales, se pueden encontrar turberas en superficies anteriormente cubiertas de manglares. Conforme se acumula la materia orgánica en condiciones anaeróbicas de encharcamiento, se forman diques que reducen la intrusión de agua salada y las especies continentales comienzan a sustituir a los manglares. El suelo es tan anaeróbico que las bacterias no pueden convertir la materia vegetal caída en humus. Estos residuos vegetales se convierten así en turba, que sigue acumulándose con el paso del tiempo, se modifica la capa freática y diferentes especies forestales ganan terreno. En un sitio de Sarawak, en Malasia, en un cúmulo de turba de unos 20 kilómetros de longitud en el pantano se observaron seis diferentes tipos de bosque, formados en círculos concéntricos. Las muestras de perforación del suelo del bosque más antiguo situado en el centro del cúmulo indicaron que los seis tipos se habían seguido sucesivamente. El tipo interior era bosque abierto limitado, mientras que el bosque exterior comprendía especies comerciales de 50 metros de altura. De esta manera, el bosque palustre de turba representa una etapa evolutiva de un bosque palustre de agua dulce caracterizado por suelos con un pH muy bajo, pocos minerales y una descomposición natural muy lenta de los residuos (Jacobs, 1988).

Los bosques palustres naturales de turba funcionan como acuíferos porque absorben y almacenan agua durante los períodos húmedos, liberándola lentamente en los períodos de poca lluvia. Contribuyen de esta manera a un caudal más uniforme de los ríos entre las temporadas seca y húmeda (Rieley, Ahmad-Shah y Brady, 1996; Urapeepatananpong y Pitayakajornwute, 1996), por lo cual pueden ser fuente de agua para irrigación –por ejemplo, la turbera de Selangor del Norte proporciona irrigación a los arrozales durante la estación seca (Prentice y Parish, 1992). En Sarawak, las turberas son fuente de agua potable (Lee y Chai, 1996). Las turberas situadas en las costas sirven de protección entre los sistemas marinos y de aguas dulces, y mantienen el equilibrio entre ambos evitando la intrusión salina a las tierras costeras, a la vez que protegen las pesquerías cercanas a la costa de las fuentes de contaminación procedente de la tierra (FAO, 1988a; Rieley, Ahmad-Shah y Brady, 1996).

En las turberas funcionan varios otros procesos de descarga de aguas además de la evapotranspiración, como la filtración (transporte de líquido en masa a través

de medios porosos), el flujo entubado de erosión subterránea, los escurrimientos y las corrientes en canal abierto (por zanjas, arroyos o ríos). En estos procesos repercuten con fuerza las actividades que reducen los niveles de agua de las turberas, como la construcción de obras de drenaje para conversión en uso agrícola, la canalización para la extracción de madera, la extracción de aguas subterráneas y la construcción de carreteras grandes. Todo esto degrada el ecosistema y se refleja en la descarga irregular de caudales variables del agua fluvial, subsidencia de la superficie de la turbera e incremento de la frecuencia de inundaciones.

El bosque palustre de turba de Selangor Norte es un ejemplo de opciones contrastantes de uso de las tierras en un sistema de humedal (Yusop, Krogh y Kasran, 1999). Allí se excavó extensamente la turbera durante la construcción de canales a fin de facilitar la extracción de troncos. Ha habido una competencia palpable por los recursos hídricos: el agua de la zona se requiere tanto para irrigación como para que el bosque mantenga sus funciones ecológicas. El caudal del río Bernam, que antes proporcionaba la recarga principal al ecosistema, especialmente en la parte noroccidental del bosque, se ha desviado para incrementar el suministro de agua para irrigación. Se calcula que esta turbera aporta el 11% del agua para las 20 000 hectáreas del Plan de irrigación de Tanjung Karang. Ya se percibe el deterioro ecológico, el pH del agua de los canales de extracción se mantiene entre 3,7 y 3,8, en comparación con los promedios de 6,0 y 5,9 de los principales canales de irrigación.

En Asia sudoriental, además de los bosques palustres salobres de turba de las costas también hay bosques palustres de agua dulce periódicamente inundados. Uno de los bosques palustres estacionales más grandes del continente en Asia sudoriental colinda con el lago Tonle Sap de Camboya central. Durante la temporada de los monzones (de mayo a octubre) una leve inclinación de la depresión camboyana central obliga al río Mekong a invertir su corriente hacia arriba por el canal de 80 kilómetros de longitud de Tonle Sap, impulsando el agua hacia los bosques que rodean el lago, que es el más grande de agua dulce de Asia sudoriental. El nivel del lago sube de 10 a 15 metros durante la temporada de lluvias y cubre una circunferencia de 20 a 25 kilómetros de bosques circundantes, o unos 10 500 km² de superficie. Más de 200 especies de peces emigran hacia el bosque inundado para desovar durante las lluvias, y se alimentan de las plantas e insectos que viven en los árboles sumergidos.

Directrices

Los bosques palustres deberían designarse zonas ambientalmente delicadas donde el mantenimiento de la integridad hidrológica es una prioridad de ordenación. Se les debería otorgar protección jurídica y evaluar con gran atención las repercusiones ambientales de los efectos potenciales a largo plazo e inmediatos de toda conversión prevista a gran escala en otro uso de la tierra. La composición y la función del ecosistema se deberían mantener lo más intactas posible y deberían favorecerse las actividades de conservación de la integridad y belleza de los bosques palustres. La ordenación debería tener en cuenta las interrelaciones entre los bosques palustres y los ecosistemas adyacentes, y la situación social y económica



Los bosques costeros mantienen el equilibrio entre los sistemas marino y de agua dulce, y previenen la intrusión salina en las tierras de las costas (Bangladesh)

en que están encuadrados los pantanos. La ordenación de los bosques palustres deberá basarse en:

- apreciación del principio de precaución, de acuerdo con el cual los encargados de tomar las decisiones deben tener cuidado de que las intervenciones forestales propuestas no incurran en costos futuros altos e imprevistos;
- comprensión de la capacidad de carga y el uso sostenible del bosque;
- mantenimiento de los bienes y servicios ambientales de los bosques;
- evitar daños irreversibles imprevistos y pérdida de la capacidad de recuperación de los ecosistemas;
- conciencia de la probabilidad de efectos imprevistos fuera del sitio.

BOSQUES EN SUELOS SUSCEPTIBLES A LA SALINIDAD

La salinización es un problema común, particularmente en paisajes más áridos o en regiones que tienen un estiaje prolongado. Informes recientes indican que en todo el mundo, 77 millones de hectáreas sufren salinización producida por actividades humanas. Esto se denomina salinización secundaria, para distinguirla de la primaria o natural. Una gran parte de la salinización secundaria (el 41%) obedece a modificaciones de la cubierta vegetal, y el resto a un exceso de irrigación. En ambos casos, las modificaciones del ciclo hidrológico que movilizan las sales almacenadas en el suelo inducen la salinización (Ghassemi, Jakeman y Nix, 1995).

Las sales presentes en los suelos tienen dos orígenes principales: las lluvias, que en las zonas costeras tienden a tener concentraciones más elevadas de sal que tierra

adentro; y la intemperización de sedimentos marinos anteriores que están debajo de muchos suelos. La sal puede descargarse del perfil del suelo si las lluvias son abundantes y el suelo tiene una textura arenosa, pero se puede acumular en los suelos si llueve menos o la textura de los suelos es más pesada y se descarga con menos facilidad.

Los cambios de la cubierta vegetal, como la deforestación, modifican el ciclo hidrológico reduciendo la intercepción de la lluvia y la transpiración de las plantas. Esto permite que más agua llegue a las capas subterráneas y se eleve el nivel freático, acarreado las sales presentes en el perfil del suelo. Una vez que el manto freático llega a uno o dos metros de la superficie del suelo, la evaporación hace concentrarse las sales en la zona de las raíces, lo que puede afectar al crecimiento de las plantas (O'Loughlin y Sandanandan Nambiar, 2001).

En condiciones normales se puede formar en los suelos que contienen cantidades sustanciales de sal almacenada una variedad de comunidades de plantas, inclusive bosques. Esto se debe por lo general a que la mayor parte de la sal está en las capas más bajas del perfil del suelo, y la evapotranspiración de las plantas asegura que la recarga de las aguas subterráneas sea lenta y que el nivel freático se mantenga relativamente muy por debajo de la superficie del suelo. Sin embargo, en algunas situaciones los suelos de la superficie pueden tener un contenido de sal mayor y las comunidades forestales contendrán especies adaptadas a estas concentraciones más fuertes.

Consecuencias de la tala o desmonte

Toda forma de perturbación del bosque repercutirá en la tasa de transpiración y, por lo tanto, en el ciclo hidrológico. La pregunta es ¿cuánta perturbación puede haber antes de que se movilicen las sales almacenadas en el perfil del suelo? Las siguientes son tres posibilidades distintas:

Tala selectiva: La información de campo indica que cuando un bosque se tala selectivamente (tala policíclica) y se permite que se regenere de inmediato, el efecto en el ciclo hidrológico será breve. En la tala selectiva por lo general sólo se retiran pocos árboles por hectárea. Las clases de tamaño menor por lo general permanecen en la capa que está por debajo de las copas altas y crecen para llenar el hueco que quedó, utilizando los recursos del suelo que han quedado disponibles (incluida el agua).

Tala rasa: El impacto de la tala rasa (tala monocíclica) es menos claro ya que depende del alcance del hueco creado en la cubierta de copas. Es poco probable que movilicen las sales almacenadas las superficies de corta reducidas, de una o dos hectáreas, que se llenan pronto de árboles jóvenes de crecimiento acelerado. En realidad, mientras más grande es la zona de follaje general la tasa de evapotranspiración puede ser mayor en esos espacios de crecimiento de árboles jóvenes que en el bosque original inalterado. Las superficies de tala más grandes pueden ser más problemáticas, si bien una reposición rápida de todas formas puede minimizar todo posible problema de salinidad.

Desmonte y sustitución con otra cubierta vegetal: Cuando es extenso, este tipo de modificación produce repercusiones muy duraderas en los ciclos hidrológicos y es una causa común de salinidad de las tierras áridas. Donde se desmonta para cultivar las tierras o crear pastizales se suele cambiar de plantas de raíces profundas a otras de raíces superficiales. En el caso de los cultivos también puede variar la duración del crecimiento de las plantas del sitio y la cantidad de lluvia interceptada por los follajes. Esto reduce la tasa de evapotranspiración e incrementa la cantidad de agua que se cuela por el suelo y recarga las aguas subterráneas. En los estudios de caso 6 y 7 se presentan ejemplos de este proceso en una región templada y en otra tropical.

Consecuencias del cambio del ciclo hidrológico

Estos cambios en el ciclo hidrológico hacen subir los niveles freáticos. En algunos casos, las aguas subterráneas salinas llegan a la superficie y aumentan directamente la salinidad de las corrientes. Esto suele suceder en las zonas bajas de las pendientes y puede ser a cierta distancia de donde se produjo el desmonte. El aumento de la infiltración de agua también puede aumentar la presión en los acuíferos confinados o no confinados, causando fugas ascendentes de aguas salinas desde éstos. El agua salina llega después a la superficie del suelo y lo saliniza (Ghassemi, Jakeman y Nix, 1995).

La velocidad con que se producen estos cambios depende de las circunstancias. Datos de pequeños estudios experimentales de cuenca realizados en Australia Occidental revelan que las aguas subterráneas por lo general comienzan a subir a un año, aproximadamente, del desmonte. Sin embargo, puede tomar más tiempo antes de que se hagan evidentes en el paisaje más amplio los efectos negativos de un desmonte extenso. Esto depende de la profundidad de la capa freática original y del alcance del desmonte.

Estos cambios hacen los suelos menos aptos para nuevos usos (no forestales), como la agricultura, y reducen la calidad del drenaje del agua desde las cuencas hacia los usuarios río abajo. En ambos casos, los efectos de la deforestación pueden manifestarse a cierta distancia (ladera abajo o aguas abajo) de la zona deforestada.

Reforestación para superar la salinización

Hay un margen considerable para reducir la extensión de la salinidad e incrementar la productividad de los suelos salinos mediante alguna forma de reforestación o agrosilvicultura para restablecer el ciclo hidrológico e incrementar la evapotranspiración.

Sin embargo, para ello es necesario resolver varias cuestiones. Primero, hay que definir qué lugar de la cuenca se debe reforestar (Farrington y Salama, 1996; Stirzaker, Cook y Knight, 1999). La experiencia indica que muchas veces es mejor reforestar las zonas de recarga no salinas, donde la lluvia penetra en el suelo, e incrementar allí la evapotranspiración, en vez de tratar de reforestar zonas muy salinas de los valles. Éstas a menudo requieren especies más tolerantes y tratamientos especiales, como sembrar en montículos para favorecer el establecimiento de los árboles.

ESTUDIO DE CASO 6

Deforestación y salinidad en Australia Occidental

La parte sudoccidental de Australia Occidental tiene un clima mediterráneo, con inviernos húmedos y largos veranos secos. Tierra adentro, gran parte de esta región tiene un volumen pluvial anual inferior a 800 mm. Grandes zonas del suroeste tienen problemas de salinización debido al desmonte y sustitución por la agricultura. Estas sales proceden en su mayor parte de la lluvia. Antes de la tala, la evapotranspiración utilizaba gran parte de la precipitación, pero el desmonte ha permitido que aumente la recarga de las aguas subterráneas y que suba el nivel freático. La deforestación ha sido amplia y quedan pocos bosques en muchas de las zonas agrícolas más productivas. Este problema llamó la atención inicialmente en el decenio de 1920, pero la tala prosiguió hasta el decenio de 1980, antes de que fuera demasiado grande para no tenerla en cuenta.

Aparte de la proporción de la cuenca deforestada, los factores que repercuten en el grado de salinización son: la lluvia anual, la cantidad de almacenamiento de sal en el perfil del suelo, la hidrología subterránea y la historia del desmonte. Las previsiones actuales son que la salinidad llegará a afectar a más del 7% de la superficie agrícola de la región. Además, hasta un 50% de los recursos hídricos que se pueden desviar ya no son potables o son de calidad escasa. Se están experimentando respuestas a este problema, incluida la reforestación con diversas plantas leñosas, y soluciones de ingeniería como el bombeo y drenaje de aguas subterráneas para retirar las aguas salinas. Las opciones de reforestación incluyen cultivar *Eucalyptus globulus* en rotaciones cortas para incrementar la evapotranspiración. La madera se puede utilizar para obtener pasta, lo que representa una ganancia de efectivo para los propietarios de las tierras. Este enfoque no es adecuado en todos los casos (como donde hay poca lluvia), y por lo general se necesita una variedad de enfoques. Mientras tanto, los niveles freáticos de las cuencas que siguen teniendo bosques están disminuyendo debido a un período prolongado de lluvias inferiores al promedio.

Fuente: Ghassemi, Jakeman y Nix, 1995.

Otra cuestión es las especies que se van a plantar. Las mejores harán un gran uso del agua, serán tolerantes a las condiciones locales (como la cantidad de lluvia) y tendrán un valor comercial suficiente para que los propietarios de las tierras se puedan permitir plantarlas. Ghassemi, Jakeman y Nix (1995) enumeran especies utilizadas en diversos lugares del mundo. La tercera cuestión es la cantidad de reforestación necesaria en una cuenca salinizada para restablecer lo suficiente el ciclo hidrológico a fin de resolver el problema. Los conocimientos actuales indican que se logra limitar la recarga y reducir los niveles freáticos con mayor rapidez plantando grandes masas de árboles (que cubran más del 50% de la cuenca), en vez de establecer árboles aislados y dispersos o plantar franjas estrechas (Ghassemi,

ESTUDIO DE CASO 7

Deforestación y salinidad en el noreste de Tailandia

En el noreste de Tailandia la lluvia es superior a 1 400 mm, pero hay una prolongada estación seca de octubre a abril. La salinidad es un gran problema que afecta a más de 2,9 millones de hectáreas, o el 17% del total de la superficie. Gran parte de la salinidad procede de la sal mineral que está en el subsuelo de esta región; una gran parte de los pozos de las llanuras dan agua salada. El problema no es nuevo, pero en los últimos años se ha acentuado por la aceleración del desmonte. La cubierta forestal de esta región disminuyó del 42% de 1961 a sólo el 13% en 1985. La mayor parte de las tierras deforestadas se ha utilizado para cultivar plantas de raíces superficiales y no cabe duda de que la sustitución de bosques por cultivos ha aumentado la recarga de los acuíferos, así como la filtración salina en las pendientes bajas y en el fondo de los valles. El nivel freático ha subido de tres a ocho metros en algunos lugares. La erosión de los sedimentos del subsuelo también produce sales que la escorrentía subsuperficial lleva hacia las zonas bajas.

Los programas actuales de tratamiento incluyen reforestación de las zonas de recarga a fin de hacer bajar el nivel freático y reducir la presión en los acuíferos artesianos. También se está probando la reforestación en las zonas de descarga, más abajo en los valles, pero puede ser difícil que los agricultores pobres que tienen parcelas limitadas para cultivar acepten la reforestación. Sólo se puede llevar a cabo una reforestación extensa donde hay grandes superficies de tierras públicas desocupadas. En otras zonas será necesaria alguna forma de agrosilvicultura.

Fuente: Ghassemi, Jakeman y Nix, 1995.

Jakeman y Nix, 1995). En los sistemas agrosilvícolas, el componente de los árboles necesita, por lo tanto, ser sustancial para que sea eficaz. Parece existir una fuerte relación lineal entre la cubierta del follaje de los árboles (la cubierta forestal multiplicada por la densidad de las copas) y la disminución de las capas freáticas.

Una de las razones por las cuales se adopta menos la reforestación de lo que cabría esperar es que muchos propietarios de las tierras consideran demasiado elevado su costo de oportunidad. Resolver el problema requiere que los propietarios reforesten (es decir, dejen la producción agrícola) en una parte de sus tierras aparentemente no salinas, a fin de resolver la salinidad en otra parte, o incluso en las tierras de otro propietario. A corto plazo, puede parecer más racional que los propietarios no reforesten, especialmente cuando los beneficiarios de la reforestación están lejos y no participan en los costos.

Directrices

Debería evitarse la deforestación en zonas forestales con subsuelos o aguas subterráneas salinas. Toda modificación del ciclo hidrológico en esos paisajes puede

movilizar las sales almacenadas. Para las zonas salinizadas, la reforestación con árboles de desarrollo rápido puede contribuir a reducir los niveles freáticos y reducir de esta manera la salinización. Esto se deberá llevar a cabo en las zonas de recarga de las aguas subterráneas (por lo general en la parte superior de las laderas), si bien la siembra de árboles de especies tolerantes a la sal en las partes bajas del paisaje también es posible cuando la salinización no es demasiado grave.

BOSQUES EN SITIOS DE ALTO RIESGO DE DESLIZAMIENTOS

Los bosques –con su sotobosque, hojarasca, residuos forestales y tierras sin compactar– son casi sin duda la cubierta vegetal mejor y más segura para reducir al mínimo todo tipo de erosión de la superficie (Wiersum, 1985; Kellman, 1969). En terrenos con pendiente en cualquier régimen climático, las clasificaciones anteriores de la FAO de la idoneidad de los terrenos para determinar la posibilidad de desmontarlos en forma segura y utilizarlos para agricultura o pastizales se referían a esta función de reducir la erosión al mínimo bajo diversos usos (FAO, 1976). Con sus sistemas de raíces más fuertes y profundas, los bosques también son la mejor cubierta del suelo para reducir al mínimo el peligro de deslizamientos superficiales (Rapp, 1997; O’Loughlin, 1974; Ziemer, 1981). Esos deslizamientos muchas veces son catastróficos y esta sección argumenta las ventajas de mantener la cubierta forestal en los terrenos propensos a los deslizamientos. Las tormentas intensas y de corta duración por lo general producen deslizamientos superficiales, mientras las que son prolongadas y de baja intensidad producen deslizamientos más profundos y grandes, contra los cuales pueden ser ineficaces los bosques, como en el caso de los 20 000 deslizamientos y deslaves aproximadamente que se produjeron en un único día en la zona de Sikkim-Darjeeling en una tormenta de 1968 (Ives, 1970).

Lo que posiblemente fuera, por las bajas humanas, la peor catástrofe del hemisferio occidental en 500 años, se produjo los días 16 y 17 de diciembre de 1999 (el tsunami de diciembre de 2004 de Asia meridional y sudoriental la superó). Cientos de deslizamientos y deslaves costaron la vida de 50 000 personas de los 500 000 habitantes de las faldas costeras y la base de la Cordillera de la Costa de Venezuela (Myers, 2000); se destruyeron 40 000 casas y casi todas las carreteras. El año anterior, el huracán Mitch causó miles de deslizamientos y deslaves en América Central, la peor catástrofe natural de la región en 200 años. Deslizamientos superficiales, deslaves profundos e inundaciones dejaron 6,4 millones de personas damnificadas, murieron 9 976 personas y hubo 11 140 desaparecidos, además de 13 143 heridos y 500 000 personas sin techo (Federación Internacional de la Cruz Roja, 2000).

A fines del decenio de 1980 hubo un gran número de fenómenos de erosión masiva que hicieron noticia internacionalmente: el sur de Tailandia en 1988 después de unas lluvias torrenciales; el ciclón Bola en Nueva Zelanda en ese mismo año; Puerto Rico durante el huracán Hugo en 1989; y Filipinas en 1990. Casi todos los daños obedecieron a problemas en laderas causados por cientos o miles de deslizamientos superficiales, con algunos deslaves grandes. Es interese-



La cubierta forestal estabiliza las laderas frágiles trastornadas por un sismo en la región himalaya del Hindu Kush (Pakistán)

sante señalar que la devastación producida en el sur de Tailandia y Filipinas se atribuyó a la tala, si bien casi todos los problemas se produjeron en tierras desmontadas para la agricultura (Rao, 1988; Hamilton, 1992). Ocurrió lo mismo en la catástrofe de Venezuela de 1999, casi todos los deslizamientos se produjeron en tierras desmontadas. Periódicamente ocurren problemas en las laderas y se producen grandes daños, lo que da lugar a un gran debate e investigación sobre la función de la cubierta forestal en la disminución de la frecuencia o gravedad de estos movimientos masivos. El estudio de caso 8 ofrece un análisis posterior a la catástrofe, de las verdaderas causas de las inundaciones de Tailandia de 1988.

Es difícil distinguir los problemas de laderas causados por el hombre de los de origen natural (Bruijnzeel y Bremmer, 1989). Existe una idea errónea muy difundida de que en los bosques intactos no se producen problemas de laderas, y hay confusión sobre los tipos de movimientos de masas en los que puede influir la vegetación. La siguiente clasificación se elaboró a partir de estudios realizados en la República Unida de Tanzania, y parece susceptible de aplicarse a muchos otros lugares (Rapp, Berry y Temple, 1972):

- Clase 1: numerosos deslizamientos y corrientes de fango, pequeños, de uno a dos metros de profundidad y de cinco a 20 metros de extensión, causados por grandes tormentas, que se producen a intervalos de 10 a 20 años.
- Clase 2: grandes deslizamientos ocasionales de gran profundidad en el basamento erosionado, por debajo del efecto de anclaje de las raíces de los árboles, que se producen a intervalos mucho más grandes.

La ciencia ha estudiado mucho la función de la cubierta forestal de reducir la frecuencia y gravedad de los deslizamientos superficiales (clase 1). Se acepta que una buena cubierta forestal los puede reducir e incluso eliminar. Los movimientos de masas grandes y penetrantes (clase 2) parecen estar fuera del control de la vegetación, pero casi toda la investigación se ha realizado en países templados, especialmente en Japón (bosques de protección), Nueva Zelanda (pastizales y explotación maderera), Taiwan Provincia de China (bosques de protección) y en el occidente de los Estados Unidos de América (asociada a la explotación maderera).

En un estudio sobre la degradación de la tierra en las montañas de Uluguru, en la República Unida de Tanzania, Rapp (1997) examinó numerosos deslizamientos pequeños y corrientes de fango (de uno a dos metros de profundidad y de cinco a 20 metros de extensión) en una superficie de 75 km², ocurridos después de caer más de 100 mm de lluvia en menos de tres horas. Descubrió que de 840 deslizamientos, sólo tres se habían iniciado en laderas cubiertas de bosque, el resto se produjo en zonas cultivadas o de pastoreo en pendientes igualmente empinadas. La importancia de las raíces de los árboles por la resistencia al corte que ofrecen a los suelos propensos a los deslizamientos está demostrada en los estudios de O'Loughlin (1974) y Ziemer (1981). Este trabajo y su confirmación posterior ofrecen las bases de las directrices para este tema.

La cubierta forestal beneficia a todas las tierras muy empinadas, especialmente en las zonas sísmicas. Las presiones para desmontar se producen donde las laderas son intermedias pero propensas a sufrir deslizamientos, y es aquí donde se debe dar la señal de alerta. Un uso prudente de las tierras hubiera podido evitar muchas de las consecuencias catastróficas observadas en Tailandia durante la tormenta de 1988, cuando las tierras forestales desmontadas para establecer plantaciones de caucho cedieron en miles de deslizamientos. Posteriormente se prohibió la tala pero no el desmonte (Hamilton, 1991). En muchas regiones de Nueva Zelanda en las que hubo un desmonte extensivo de bosques autóctonos para abrir las tierras al pastoreo en el decenio de 1870, los terrenos propensos a sufrir deslizamientos se han erosionado seriamente debido a las grandes tormentas. La velocidad de la erosión medida en la región de Wairarapa fue del 2,8% por década en el período de 1938 a 1977, y se tradujo en un 56% de cicatrices de tierras erosionadas en las laderas en 1984 (Trustrum, Thomas y Douglas, 1984). Este material aparece como sedimentación excesiva en las corrientes de agua.

En septiembre de 2004, el huracán Jeanne pasó por la República Dominicana, Puerto Rico y Haití, causando deslizamientos e inundaciones. Aide y Grau (2005) documentan que si bien estos países recibieron volúmenes parecidos de precipitación, en Puerto Rico hubo siete muertes por inundaciones, 24 en la República Dominicana y más de 3 000 en Haití. Hay factores que complican la situación, pero los autores atribuyen la diferencia de los daños producidos por los deslizamientos y las inundaciones a las diferencias de la cubierta vegetal, porque los agentes erosivos produjeron menos daños en las zonas forestales y en las tierras abandonadas cubiertas de arbustos.

La dificultad está en determinar con anticipación estas zonas de alerta y mante-

ESTUDIO DE CASO 8

Inundaciones y deslizamientos en el sur de Tailandia

En noviembre de 1988, después de una tormenta sin precedentes e inundaciones repentinas, bajaron de las montañas que rodean la provincia de Nakhon Si Thammarat, del sur de Tailandia, deslizamientos de lodo. Cientos de deslizamientos cubrieron las laderas casi de la noche a la mañana, cobrándose 200 vidas, enterrando 300 casas bajo la arena y derribando cientos de frutales.

Las inundaciones desarraigaron los árboles a su paso, y los residuos obstruyeron y contuvieron el agua en algunos lugares. Conforme seguía lloviendo, estos obstáculos se reventaron y liberaron el agua contenida para avanzar, arrastrando arena, árboles desgajados y otros detritos. Este caudal sin precedentes erosionó los bordes de las corrientes, inundó las casas y los terrenos y modificó el curso de los ríos. Los damnificados fueron pequeños agricultores productores de caucho, de fruta y personas sin tierras.

Esta superficie originalmente estaba cubierta por un bosque tropical húmedo característico, con una vegetación compleja formada sobre todo por árboles, una cubierta de copas dominante, otras capas de árboles, arbustos, trepadoras y el sotobosque. Algunas zonas se talaron hasta hace algunos años, cuando se desmontaron y convirtieron en plantaciones de caucho, establecidas incluso en laderas empinadas. En general no había cubierta de cultivos y había muy poca vegetación para proteger el terreno, sólo los árboles de caucho, muchos de ellos plantados recientemente.

Diversas noticias atribuyeron los daños causados por las inundaciones a las operaciones de explotación maderera. La protesta se tradujo en un decreto del gobierno para prohibir la tala de árboles. Una explicación menos sensacional pero más realista de los daños causados por las inundaciones es la suma de los diversos factores que unidos resultaron catastróficos:

- Las pendientes donde se produjeron los deslizamientos eran empinadas, muchas veces con ángulos mayores de 25°.
- El substrato geológico de base de la capa superior del suelo eran formaciones de granito muy desgastadas y en extremo fracturadas, que se erosionan con facilidad.
- La capa de suelo no estaba suficientemente anclada por las raíces de los árboles jóvenes de caucho, la vegetación más común en la zona de los deslizamientos.
- La vegetación era escasa, sin cubierta vegetal entre las hileras de árboles de caucho.
- Los registros indican que del 20 al 23 de noviembre de 1988, las zonas montañosas de la provincia recibieron 1 022 mm de lluvias, que saturaron el suelo.
- No fue posible absorber la lluvia intensa, en particular en las laderas empinadas superiores, y el manto de agua resultante fluyó hacia abajo.

- La escorrentía y las fallas de las laderas produjeron deslizamientos en las faldas en general empinadas de las montañas.

Las numerosas cicatrices y cárcavas profundas que hoy marcan el paisaje de la provincia de Nakhon Si Thammarat presentan una oportunidad incomparable de demostrar la forma en que se pueden recuperar los deslizamientos y aprovecharlos productivamente. En respuesta a la petición del Gobierno de Tailandia, la FAO aprobó un proyecto del Programa de Cooperación Técnica que trabajará con silvicultores y agrónomos en Tailandia para restablecer algunos de los deslizamientos.

Fuente: Tomado de Rao, 1988.

nerlas cubiertas de bosques o arboladas. Los factores generales que influyen en los movimientos de masas son consabidos: presencia de agua, tipo de roca o mineral y estado de la erosión, número y densidad de los planos de fractura natural y estructura e inclinación de la ladera. Se necesitan guías prácticas de campo para reconocer las zonas propensas a deslizamientos donde conviene la retención forestal. Las directrices de Megahan y King de 1985 son en particular aptas para esto. Señalan que en las zonas muy propensas a la erosión los peligros más grandes están en las laderas de más del 45% al 55%, con una frecuencia máxima de alrededor del 70%; las pendientes cóncavas, que concentran agua; y los suelos con poca cohesión. Los suelos superficiales que están encima de un basamento de piedra o tienen una discontinuidad pronunciada de textura o estructura pueden saturarse, flotar y ser propensos a los deslizamientos. Megahan y King comentan la capacidad de erosión de la lluvia y la dificultad de obtener datos buenos en las regiones tropicales.

Blaschke, Trustrum y Hicks (2000), con base en investigación documentada de todo el mundo, produjeron un mapa que revela el alcance aproximado de las zonas donde la erosión de movimientos de masas repercute en la productividad de las tierras, así como un cuadro que muestra el uso de la tierra, la lluvia, la forma de las tierras, la superficie interesada, la duración del fenómeno y la tasa de pérdida de suelo, por país o región. Los datos buenos son pocos y están dispersos. Estudios como el de Humphreys y Brookfield (1991) en Papua Nueva Guinea indican que las fallas superficiales de pendientes son, con mucho, la forma de erosión más frecuente en tierras cultivadas en pendiente. El resultado es no sólo la disminución de la productividad, sino también la carga de sedimentos en las corrientes de agua, que dañan la calidad de ésta, repercuten en la vida acuática y propician las inundaciones.

Los sistemas agroforestales y silvopastorales bien organizados, con porcentajes elevados de árboles de raíces profundas, darían más seguridad que los cultivos o los pastos solos, debido a la resistencia de las raíces al esfuerzo cortante. Ninguna investigación indica la densidad de árboles necesaria en los sitios propensos a los deslizamientos, pero a mayor número de árboles, mayor el margen de seguridad.

Las carreteras asociadas a la explotación maderera y a otros usos muchas veces

funcionan como detonador porque el corte y relleno en las laderas desestabiliza todavía más estos sitios problemáticos.

En resumen, los árboles son la cubierta vegetal más segura donde la lluvia de gran intensidad o prolongada es característica de las laderas de un 70% –pero también de apenas 45%–, y que tienen una concavidad a manera de cuchara o superficies de poca profundidad, planas. Cuando no hay raíces de árboles existe un gran riesgo de falla de las laderas. No es aconsejable el desmonte y sólo se debería autorizar si existe la seguridad de:

- restablecimiento rápido de los cultivos de árboles, como las plantaciones de caucho o de otros árboles (aunque hay un largo período vulnerable hasta que las nuevas raíces de los árboles adquieren eficacia);
- construcción inmediata de terrazas para producción agrícola y árboles, en un sistema de agrosilvicultura; garantía de mantenimiento adecuado de las terrazas y capacidad de reparar rápidamente los daños menores causados por deslizamientos; o
- un sistema silvopastoral con abundantes árboles de raíces profundas y gestión de conservación del pastoreo.

La explotación forestal reduce la capacidad de estabilización de las raíces cuando mueren los árboles cortados, y hay un período de vulnerabilidad de varios años, antes de que las nuevas raíces sean eficaces. Si durante este período tiene lugar una tormenta grave se pueden registrar desprendimientos de tierras. Las vías forestales representan otra fuerza desestabilizadora en estos lugares inestables.

Establecido en 2002 con sede en Kyoto (Japón), el Consorcio Internacional sobre Deslaves (ICL) promueve las investigaciones sobre los deslaves en beneficio de la sociedad y el medio ambiente. Elementos importantes de las actividades del ICL son la interfaz entre los bosques y el agua y la función de los bosques en la mitigación de los riesgos de desprendimientos de tierras.

Directrices

Las zonas propensas a deslizamientos probablemente son la forma de erosión más grave que se puede reducir al mínimo mediante políticas y una ordenación firme para el uso de las tierras. Las raíces de los árboles dan un margen de seguridad al mejorar la resistencia de arraigo del suelo. Para reducir la producción y gravedad de los deslizamientos superficiales, es necesario mantener las zonas propensas a éstos bajo cubierta forestal, arboledas o sistemas de agrosilvicultura o silvopastorales, con una cubierta arbórea suficientemente densa. Estas zonas se pueden determinar antes de que se tomen decisiones sobre el uso de la tierra, con base en la erosividad, la pendiente, la forma de la pendiente y la superficialidad y cohesión del suelo. Las carreteras constituyen un problema en particular.

ZONAS DE PROTECCIÓN RIBEREÑA

Las franjas cubiertas de vegetación a lo largo de las orillas de los ríos y de los lagos o estanques desempeñan importantes funciones de protección del agua. Las zonas de protección forestadas desempeñan estas funciones particularmente bien debido



Las zonas forestales de protección ribereña estabilizan los bordes de los ríos, reducen la erosión y filtran el aflujo lateral de sedimentos y contaminantes (Sierra Leona)

a sus sistemas de raíces profundas y fuertes. Los bosques sin tala, inalterados, son los mejores, pero la explotación maderera con buena gestión no parece perjudicar estos servicios naturales de protección de la calidad del agua. Las zonas de protección ribereña forman el nexo vital entre los usos de las tierras de la cuenca y el sistema de corrientes de agua o la masa de agua.

Las zonas forestales de protección ribereña pueden estabilizar los bordes de las masas de agua circulante, reducir la erosión y la cantidad de sedimentos que llega al agua. El piso y el suelo del bosque también pueden atrapar los sedimentos que avanzan hacia la corriente de agua desde las zonas altas externas a la zona de protección. Los bosques que tienen una buena estructura de sotobosque y densidad, a lo largo de los bordes más pequeños de los ríos y durante la elevación de los caudales, pueden dispersar las crestas de la inundación, reducir la velocidad del agua y asimismo la erosión; pueden atrapar los nutrientes nocivos que llegan de río arriba en las escorrentías o en el caudal subterráneo, como los de la aplicación excesiva de fertilizantes y plaguicidas, para prevenir así la contaminación del agua, muchas veces perjudicial para la población y la vida acuática (O'Laughlin y Belt, 1995). También desempeñan esta función de contención las zonas de protección de lagos y estanques. Se piensa que la absorción de las plantas y los árboles, la actividad microbiana y la inmovilización del suelo participan asimismo en el proceso de reducción de los contaminantes. Los hongos micorrizógenos de los árboles absorben nutrientes (sobre todo el nitrógeno y los fosfatos), de los cuales liberan a las aguas adyacentes. Los ríos y las riberas boscosas contienen una población mayor de insectos acuáti-

cos, que transforman más materia orgánica, nitrógeno y fósforo que en los ríos con bordes desnudos, lo que eleva la calidad del agua (Margolis, 2004).

Los árboles y ramas que caen en las franjas forestales ribereñas forman abundantes residuos leñosos que incrementan la variedad del hábitat fluvial para los peces y otros organismos acuáticos. Se acumula toda una serie de beneficios adicionales, como la sombra que influye en la temperatura del agua, la hojarasca y residuos de fruta para la cadena alimenticia de los peces, hábitats para la fauna silvestre aviar y terrestre (una cubierta con acceso al agua y corredores para desplazamiento) y la conservación general de la biodiversidad.

Estos beneficios y su función de conservación de la calidad del agua significan que estas zonas deberían recibir protección jurídica o asignarse como protectoras (Hamilton, 1997). Muchos países ya cuentan con directrices o legislación para las zonas protectoras de diversa extensión, donde no se permite o se limita el uso de las tierras y los bosques. Gregory *et al.* (1991) examinaron las ideas recientes sobre los servicios proporcionados por el ecosistema. Casi todas las directrices oficiales para la explotación forestal incluyen el mantenimiento de franjas en las que no está permitida la tala, de por lo menos 20 metros en cada orilla del río (mayores conforme aumenta la pendiente), como las de Malasia (Mok, 1986) o la zona tropical de Queensland (Australia) (Cassells y Bonell, 1986). En los bosques nacionales de los Estados Unidos de América, el Grupo de Evaluación de la Ordenación del Ecosistema Forestal (FEMAT) consideró posible la gestión del caudal superficial portador de sedimentos de las vías forestales mediante zonas de protección de 65 metros (FEMAT, 1993). Muchos estados de este país tienen reglamentos para reducir la contaminación de origen difuso (sobre todo sedimentos) mediante mejores prácticas de ordenación, centradas en zonas de protección ribereña sin talas. En 1996, el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos estableció la Iniciativa Nacional de Zonas de Conservación, en el que participan más de 100 organismos de conservación, agroempresas y organizaciones agrícolas y ambientales, y promueve el uso de zonas de conservación (Randolph, 2004).

El Recuadro 5 ofrece un ejemplo de código de prácticas para la tala de árboles de Papua Nueva Guinea.

¿Qué extensión debe tener una zona forestal de protección? Esto depende en parte de los objetivos del propietario de la tierra o del que elabora el reglamento. La extensión recomendada para las franjas de protección ribereña se reevalúa científicamente en continuación, y por lo general aumenta conforme se adquiere información sobre su influencia en la calidad del agua: de 20 a 30 metros (Bosch y Hewlett, 1982), hasta un mínimo de 25 metros (Megahan y Schweithelm, 1983) y hasta 50 metros (O’Laughlin y Belt, 1995). La extensión también debe tener en cuenta la pendiente y el uso previsto, como se indica en el código de Papua Nueva Guinea y en el informe del FEMAT. En vista de los numerosos valores adicionales de las zonas de protección ribereña, es prudente pecar por exceso de extensión, no obstante la pérdida económica de corto plazo por los productos forestales a los que se renunciaría (por lo general no madereros).

RECUADRO 5
Código de Papua Nueva Guinea para la tala forestal¹

Este código exige que se determinen las zonas de protección, se delimiten y que las respeten las partes interesadas, en particular la industria de la madera, a fin de garantizar que la extracción de madera se lleve a cabo en consonancia con la conservación de los recursos hídricos:

- Para los lagos, lagunas, las costas marinas y los pantanos, la zona de protección mínima es de 100 metros, a partir de la masa de agua, marca de la marea alta o borde de los manglares.
- La zona de protección para los ríos permanentes, grandes, considerados de la clase 1, es de 50 metros de cada lado de la corriente de agua.
- La zona de protección para los arroyos o riachuelos pequeños permanentes, considerados de la clase 2, es de 10 metros de cada lado de la corriente de agua.
- La zona de protección para las corrientes (permanentes o no permanentes) de cualquier dimensión, utilizados por la comunidad, es de 50 metros de cada lado de la corriente de agua. Las zonas de protección para manantiales de importancia cultural requieren una consideración atenta, incluida la exclusión de la tala a fin de proteger la zona de captación del manantial.
- Los aguaderos y desembarcaderos no necesitan zonas de protección, sino un espacio máximo de costa de 100 metros.

Todas las zonas de protección se señalan en el terreno antes de que se aprueben las actividades de explotación maderera. La zona de protección y los puentes de las vías forestales también figuran en los planes aprobados sobre el terreno por los oficiales forestales.

¹ El 97% de la superficie de Papua Nueva Guinea está bajo régimen de propiedad tradicional. La explotación sostenible de los bosques requiere acuerdos de ordenación forestal entre los propietarios y el Estado. En estos acuerdos, que contienen directrices para las zonas de protección ribereña, las zonas boscosas con pendientes de más del 30% se consideran zonas de captación de aguas y no está permitida la tala en las mismas.

Fuente: Kaip, 2002.

Para la otra categoría de tierras forestadas, incluidos casi todos los sistemas de agrosilvicultura, se informa que una zona de protección de árboles, arbustos, hierbas y pastos, de 25 metros, puede eliminar del 80% al 90% del nitrógeno, del 85% al 95% de los sedimentos y más del 90% de los herbicidas que escurren desde los terrenos agrícolas (Schultz, 1996). En esta mezcla tienen especial importancia los árboles porque su rizosfera por lo general sustenta a numerosos microorganismos que pueden degradar los herbicidas, insecticidas y algunos otros compuestos tóxicos (Haselwander y Bowen, 1996). Para los ríos y arroyos de sinuosidad natural, la zona de protección debe seguir el cauce. Las zonas de protección no deberán limitar los principales meandros, de modo que la extensión inicial de la zona de

protección en ese tipo de corrientes de agua tiene que ser sustancialmente más ancha de lo indicado. Estudios recientes realizados en Canadá revelaron que el fósforo y el potasio de los fertilizantes aplicados hasta de dos a cuatro kilómetros de distancia pueden repercutir en los humedales que no estén debidamente protegidos (Houlahan y Findlay, 2004), lo que conduce la recomendación de zonas de protección mucho más extensas en los paisajes no forestales.

Directrices

Establecer vegetación (una mezcla de árboles, arbustos y pastos) a lo largo de las corrientes de agua es uno de los métodos menos costos y más eficaces para proteger la calidad del agua, en particular del aflujo de sedimentos y nutrientes. Las zonas boscosas de protección ribereña que protegen las corrientes de agua perennes y otras masas de agua de daños a la calidad, deberían identificarse y designarse oficialmente para recibir un tratamiento especial en materia de uso del suelo. La política debería ser de mantener la zona lo más intacta que sea posible, a fin de que pueda cumplir su función de reducir al mínimo los sedimentos y la contaminación. Esto muchas veces acarreará una prohibición total de deforestación y explotación maderera. Los productos forestales no madereros por lo general se pueden obtener sin causar daños. La zona de protección deberá tener por lo menos unos 30 metros de extensión y ser más ancha en las pendientes empinadas propensas a la erosión superficial o a deslizamientos, o donde predomina el uso agrícola. Las zonas de protección cumplen muchos otros propósitos, relacionados con los hábitats acuáticos y terrestres buenos para la fauna silvestre, la biodiversidad, valores estéticos y el esparcimiento. Para la mejor calidad del agua es aconsejable restablecer los bosques degradados o ausentes en las zonas de protección ribereña.

BOSQUES PROVEEDORES DE AGUA PARA LOS MUNICIPIOS

La falta de agua potable y sanidad adecuada reduce la calidad de la vida de alrededor de un millardo de habitantes urbanos de todo el mundo, así como de muchas personas de las zonas rurales, principalmente en África, Asia y América Latina. Todos los años se atribuyen 2,2 millones de muertes –el 4% de las bajas mundiales– a enfermedades contraídas por falta de agua pura (Programa de las Naciones para los Asentamientos Humanos, 2003). Suministrar agua potable en forma estable es uno de los objetivos más apremiantes en las estrategias de desarrollo y reducción de la pobreza. Sin embargo, los sistemas de purificación del agua requieren una gran intensidad de capital y su mantenimiento es costoso, lo que convierte al agua potable en un producto de valor elevado que está fuera del alcance de muchas autoridades locales y consumidores. Los ricos compran agua embotellada y los pobres se enferman.

La necesidad de proporcionar agua limpia con un presupuesto limitado está obligando a muchos municipios a estudiar enfoques innovadores a fin de mantener suministros de agua pura. Esto comprende cada vez más examinar la función potencial de las cuencas forestadas en el suministro de agua potable a los asentamientos urbanos.



C. CARLINO

Alrededor del 85 % del agua potable de San Francisco procede de la cuenca hidrográfica de Hetch Hetchy, del parque nacional de Yosemite (Estados Unidos de América)

Cómo pueden contribuir los bosques

La relación entre los bosques y el agua es compleja y es objeto de fantasías e interpretaciones erróneas. Contrariamente a una opinión popular, la mayoría de los bosques no incrementa el caudal en las cuencas. En realidad, es más bien al contrario ya que un bosque joven y vigoroso por lo general devuelve más agua a la atmósfera a través de la evapotranspiración que los pastizales o los matorrales, lo cual reduce el caudal que llega a las corrientes de agua y los ríos (Calder, 2000). Reducir la densidad de la cubierta de copas mediante una extracción cuidadosa puede rendir más agua, pero su calidad puede reducirse en cierta medida (Hamilton y King, 1983; Bruijnzeel, 1990) (véase el Capítulo 2). Una excepción importante es el bosque nuboso tropical de montaña, donde los árboles y sus epifitas pueden “cosechar” horizontalmente la niebla en movimiento, lo que se suma a la precipitación vertical (Hamilton, Juvik y Scatena, 1994).

También está poco demostrado que los bosques puedan prevenir las inundaciones catastróficas, si bien reducen con efectos positivos el caudal máximo y retrasan los caudales máximos localmente (Hamilton y King, 1983). No obstante esto, muchos gobiernos han introducido prohibiciones de tala después de fenómenos extremos de inundación en las principales ramas de los grandes sistemas fluviales.

Si bien casi todos los bosques suministran menos del total de la cantidad de agua, casi siempre incrementan la calidad del agua, en comparación con casi todos los demás usos de la tierra (Capítulo 3). El agua que se drena de los bosques naturales muchas veces es de una pureza excepcional, lo que reduce radicalmente

los costos de purificación para el uso doméstico. En gran medida esto se debe a que muchas de las actividades que contaminan no están en los bosques naturales. La hojarasca, la vegetación del suelo, las capas de arbustos y los residuos que hay en el piso del bosque mantienen al mínimo la erosión de la superficie (y por tanto los sedimentos), y la densa capa de humus de los bosques también puede participar en la filtración del agua.

La relación positiva entre los bosques y la calidad del agua ya se está explotando para ayudar a suministrar agua potable a millones de personas en todo el mundo. Un estudio de las 105 ciudades más grandes del mundo, realizado en 2003 para el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y el Banco Mundial, reveló que una tercera parte de las mismas obtiene una cantidad sustancial de su agua potable de cuencas de captación forestales protegidas (Dudley y Stolton, 2003). Incontables ciudades y pueblos más pequeños hacen lo mismo, y las industrias que necesitan agua limpia muchas veces están deliberadamente situadas en las zonas de captación de los bosques naturales.

¿Qué tipo de bosques protegidos?

Muchos de los bosques que suministran agua potable a las ciudades y que figuran en la investigación del WWF y el Banco Mundial son zonas protegidas jurídicamente establecidas, reconocidas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y el Convenio sobre la Diversidad Biológica: parques nacionales, reservas naturales y zonas silvestres. La UICN divide las zonas protegidas en seis categorías, de acuerdo con los objetivos de ordenación y desde las reservas estrictamente protegidas, donde están muy controladas las visitas, hasta los paisajes culturales, donde la protección se lleva a cabo con las comunidades residentes. En muchos casos la protección jurídica se concedió por motivos estéticos o para conservar las características naturales de la biodiversidad, y los beneficios del suministro de agua fueron secundarios o se reconocieron posteriormente. Otros bosques se administran con planes múltiples o para obtener madera, pero haciendo énfasis en la protección de sus servicios hídricos. Algunos bosques siguen existiendo en gran medida por accidente, o porque los usuarios del agua hacen pagos oficiales o no oficiales.

Algunos ejemplos

Los siguientes ejemplos exponen una variedad de formas en que los bosques protegen (o no) el suministro municipal de agua.

Quito (Ecuador): Alrededor del 80% de la población de 1,5 millones de personas recibe agua potable de las reservas ecológicas Antisana (120 000 hectáreas) y Cayambe Coca (403 103 hectáreas). Las empresas locales de agua contribuyen al pago de la gestión de estas reservas a cambio del agua potable. El gobierno municipal y una organización no gubernamental (ONG) local están elaborando planes de ordenación para proteger las cuencas hidrográficas, que incluyen una protección más estricta de la cuenca alta, prevención de la erosión y estabilización de las riberas y las pendientes (Echeverría, 2001).

São Paulo (Brasil): El agua potable para los 18 millones de habitantes de la ciudad procede de los bosques de seis zonas protegidas. La más importante es el parque estatal de Cantareira (categoría II de la UICN, 7 900 hectáreas), que suministra la mitad del agua para la zona metropolitana y está en lo que queda del bosque atlántico, en gran peligro de extinción (Dudley y Stolton, 2003).

Singapur: La mitad del agua de la isla procede del parque nacional Bukit Timah (que es el 3% que queda de la cubierta forestal original) y de las zonas de captación centrales, restablecidas como bosque natural (ambas son de la categoría IV de la UICN y cubren un total de 2 796 hectáreas). Originalmente los bosques estaban protegidos para mantener el agua, pero hoy también están reconocidos como depósitos de extrema importancia de biodiversidad (Bugna, 2002).

Tokio (Japón): La ciudad toma casi toda su agua de dos paisajes protegidos: el parque nacional de Nikko (categoría V de la UICN, 140 698 hectáreas) y el parque nacional de Chichibu-Tama (Titibu Tama) (categoría V, 121 600 hectáreas). En estas zonas, la conservación y el esparcimiento están equilibrados en la ordenación forestal que compete al Despacho de Obras Hidráulicas del Gobierno Metropolitano de Tokio, que tiene el objetivo específico de mantener la calidad del agua (Dudley y Stolton, 2003).

Nairobi (Kenya): Gran parte del agua de la ciudad procede de ríos que nacen en los Aberdares (incluido el parque nacional de Aberdares, categoría II de la UICN, 76 619 hectáreas) y la cuenca de captación del parque nacional del monte Kenya. Desafortunadamente, si bien existe una protección nominal, la invasión ilegal y la tala siguen degradando esta zona, con repercusiones negativas en el suministro de agua para la ciudad. Se estima que todos los bosques de la zona protegida del monte Kenya se han talado por lo menos una vez (Nakagawa *et al.*, 1994).

Ciudad de Nueva York (Estados Unidos de América) (Estudio de caso 12 del Capítulo 6): En vez de financiar, a través de impuestos, la construcción de una nueva central de purificación del agua, los ciudadanos de Nueva York votaron por subsidiar la protección forestal como la forma más económica y aceptable para mantener un suministro de agua potable. La ordenación aplica un conjunto de enfoques diversos, como la protección completa, facilidades para los propietarios y tala selectiva, de bajo impacto, en algunas tierras. El parque estatal Catskill (categoría V de la UICN, 99 788 hectáreas) protege gran parte de las cuencas hidrográficas de Catskill y Delaware y Croton, principales fuentes de abastecimiento de agua de la ciudad (Perrot-Maître y Davis, 2001).

Estocolmo (Suecia): Los lagos Mälaren y Bornsjön suministran el agua potable para Estocolmo. La empresa del agua, la Stockholm Vatten, controla la mayor parte de la cuenca hidrográfica de 5 543 hectáreas del lago Bornsjön, de cuya superficie,

unas 2 323 hectáreas, en torno al 40%, son un bosque productivo certificado por el Consejo de Manejo Forestal. Si bien se extrae madera y se comercializa, la ordenación se concentra principalmente en la protección de la calidad del agua, y se designan zonas de conservación y restablecimiento (Soil Association, 1998).

Potencial económico

En todos los casos expuestos, los bosques desempeñan numerosas funciones. La protección del suelo y el agua por lo general también brinda conservación de la biodiversidad, y viceversa. En casos como los de Nueva York y Estocolmo (y la situación es análoga en Beijing), un conjunto de usos diferentes suministra agua potable de buena calidad y a la vez sustenta actividades comerciales en las zonas protegidas, así como el turismo. Es evidente que el valor añadido que proporciona el agua potable puede contribuir a las actividades de ordenación de la tierra que de otra forma no serían económicas, incluidas las de muchas zonas protegidas.

Un grupo de investigadores de Argentina, los Países Bajos y los Estados Unidos de América puso una etiqueta de precio promedio de 33 billones de USD al año a los servicios fundamentales del ecosistema, casi el doble del valor del producto interno bruto (PIB) de 18 billones de USD, con un cálculo del valor de la regulación y suministro del agua de 2,3 billones de USD (Costanza *et al.*, 1997). La experiencia de los planes de pago por servicios ambientales (PSA) ha crecido, como en el caso de Quito, antes mencionado. Los PSA se refieren a cualquier sistema para garantizar que quienes se benefician de los servicios ambientales, como el agua limpia y la fijación de carbono, paguen a los que hacen sacrificios económicos o sociales para mantener los ecosistemas naturales.

Los PSA funcionan mejor cuando hay pocos receptores (por ejemplo, una empresa de agua, una fábrica o una autoridad municipal) y un grupo claramente identificado de proveedores (como los titulares de los derechos a las tierras que mantienen un bosque de alta calidad) (Pagiola, Bishop y Landell-Mills, 2002). Muchos países latinoamericanos han creado estos sistemas, como los usuarios de hidroelectricidad en pequeña escala en Costa Rica que pagan a los propietarios de las tierras para que mantengan los bosques en sus cuencas de captación. Este tema se desarrolla en el Capítulo 6.

Falta de conciencia sobre los beneficios de los bosques

Unos cuantos estudios de casos de éxito no constituyen un reconocimiento general de que los bosques protegidos o sujetos a una ordenación cuidadosa pueden ayudar a financiarse mediante el suministro de agua potable. Los planes de PSA tienen una trayectoria irregular y no siempre tienen éxito. El estudio del WWF y el Banco Mundial reveló que muchas empresas de agua y autoridades de las ciudades entienden poco de las ventajas y desventajas de utilizar los bosques para proteger el agua. Algunos proveedores de agua tienen ideas por completo no realistas sobre la escala de los beneficios que se suman de tener bosques en buenas condiciones, mientras que otros ni siquiera reconocen que habría beneficios. Las decisiones muchas veces se basan en información de segunda mano o parcial. Sin embargo,

hay excepciones en las que las estrategias de ordenación forestal se elaboraron con la mejor información disponible, como las empresas de agua de la ciudad de Nueva York y Melbourne (Australia).

Directrices

Si bien cada vez se considera más a los bosques como proveedores de agua, queda mucho por aprender y aplicar para sacar el provecho máximo de estos beneficios. Diversos grupos de intereses, como las empresas de agua, los propietarios de los bosques, los responsables de las zonas protegidas y todos los que participan en los planes de PSA, requieren orientación técnica que explique las cuestiones y garantice las opciones mejores que sea posible en materia de uso de la tierra. Además, deberá haber buenos materiales de instrucción y divulgación sobre los beneficios, en los que se destaque la conexión entre la protección forestal, una buena ordenación y el agua potable. Es preciso disponer de incentivos financieros y normativos racionales (y, cuando fuera necesario, eliminar los incentivos perniciosos) para alentar la buena ordenación con la que se persigue obtener un agua de calidad.

ESTANQUES VERNALES

Cada vez se reconoce más la importancia de los estanques vernaless en las zonas forestales, debido a su contribución al restablecimiento y conservación de la biodiversidad de los anfibios. Los estanques vernaless de los bosques son una depresión relativamente pequeña y de poca profundidad que contiene una masa de agua aislada que se llena anualmente en una zona boscosa. El período hídrico dura por lo menos hasta terminar la primavera antes de secarse (Thompson y Sorenson, 2000). Estos estanques no tienen entrada ni salida que permita la llegada de peces. Los humedales efímeros por lo general tienen una superficie no mayor de 0,2 hectáreas y menos de un metro de profundidad. Estos atributos impiden que vivan peces en ellos y que se alimenten de los huevos y larvas de los anfibios, las dos etapas en que éstos son más vulnerables.

Los anfibios de los hábitats vernaless son salamandras, ranas y sapos. Muchos de ellos están amenazados o en peligro de extinción y en todo el mundo sus poblaciones han disminuido en el último decenio. Esta disminución repercute en los anfibios que viven en todos los medios y no sólo en los estanques vernaless. De las 5 743 especies conocidas, 1 856 (casi una tercera parte) corre peligro de extinción (Stolzenburg, 2005). Las causas señaladas son: pérdida de hábitats, los plaguicidas y otros contaminantes del agua, la lluvia ácida y otros contaminantes atmosféricos, el incremento de la radiación ultravioleta, el calentamiento del planeta, patógenos fúngicos y de otros tipos y la combinación de varios de éstos. El calentamiento del planeta, por ejemplo, parece repercutir en la desaparición de varias especies de ranas y sapos, como el sapo dorado endémico de los bosques de Costa Rica (Pounds, Fogden y Campbell, 1999). Se piensa que los anfibios son uno de los indicadores más sensibles del ecosistema e incluso de la salud humana, como antes lo fueron los canarios en las minas.



VERNAL POOL ASSOCIATION/L.P. KENNEY

La importancia de los estanques vernales en las zonas forestales cada vez es más reconocida, especialmente por su contribución al restablecimiento y conservación de los anfibios (Estados Unidos de América)

Los estanques vernales han sido poco estudiados y están poco reglamentados debido a su carácter efímero. Además, su escasa extensión hace difícil detectarlos en las fotografías aéreas, incluso cuando se toman en el momento culminante de la temporada húmeda.

Los países desarrollados industrializados son los más interesados en la conservación de los estanques vernales, pero aun allí hay pocos reglamentos para protegerlos, a menos que alguna especie figure en la lista oficial de especies en peligro de extinción. Algunos estanques vernales más grandes pueden estar clasificados como humedales y contar con protección reglamentaria. Massachusetts, en los Estados Unidos de América, tiene una disposición para designar y certificar los estanques vernales, que los protege de sufrir modificaciones e incluye una franja de protección forestal (Westing, 2003). Dado que en todo el mundo la ordenación forestal contempla diversos bienes y servicios, los relacionados con los recursos hídricos y la biodiversidad adquirirán más importancia. Por ello convendría que los gobiernos y los responsables de la ordenación forestal tengan en cuenta los estanques vernales.

Las principales medidas de ordenación necesarias son evitar la destrucción o daños a los estanques vernales y suministro de zonas de protección de dos niveles. Puede ser difícil identificar estos estanques efímeros una vez que han retrocedido los niveles del agua, pero la cuenca cóncava, la falta general de vegetación y la capa más gruesa de materia orgánica pueden indicar su ubicación. Es necesario identificar estas zonas, marcarlas y señalarlas en los mapas en la primavera. Los sistemas mundiales de ubicación son útiles para la cartografía. Los estanques vernales aparecen con mayor frecuencia y tienen mayor capacidad de carga para los anfibios

en los bosques de frondosas que en los de coníferas (Westing, 2003). A partir de 16 estudios de campo recopilados por Westing, se recomienda una zona central de protección que contenga la superficie inundada más 15 metros, a fin de proteger las 0,5 hectáreas aproximadamente de los estanques más grandes. En esta zona no deberá haber tala, arrastre ni construcción de carreteras. Los árboles de la zona de protección ofrecen sombra y defienden del viento para impedir que se seque el estanque. Si bien un estanque vernal sin árboles podría parecer ideal como patio para la acumulación de troncos durante los períodos secos, también esto deberá evitarse. También es conveniente tener otra zona de protección forestal secundaria de unos 15 metros de extensión que se explote o modifique poco, para proteger de la sequía y ampliar el hábitat de alimentación.

Directrices

Las prácticas de ordenación mejores y aceptables y los sistemas de certificación forestal deberán reconocer estos importantes elementos efímeros de humedal de las tierras forestales y establecer los criterios para la zona eficaz de protección.

BOSQUES DE PROTECCIÓN CONTRA ALUDES

La protección contra aludes representa un desafío existencial para la población de las regiones montañosas altas de todo el mundo (Recuadro 6). Es uno de los muchos y considerables riesgos de vivir y realizar actividades en estas zonas. En el período de 1953 a 1988, tres de los principales diarios (el *New York Times*, el *Toronto Globe and Mail* y *The Times* de Londres) informaron sobre 18 aludes grandes, cada uno con por lo menos 10 muertes, 50 heridos y más de un millón de USD de daños y ayuda de emergencia de fuera de la zona damnificada (Hewitt, 1997). Esos aludes se produjeron en muchas partes: siete en América Central y América del sur, dos en Asia oriental, dos en Asia sudoccidental y meridional y uno en Asia sudoriental. Muchos otros sucesos de gran impacto local, que no registraron los rotativos mencionados, afectaron a aldeas pequeñas, algunos esquiadores o alpinistas y a carreteras rurales de las montañas o vías férreas. A pesar de esto, los aludes recibieron poca atención en el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (de 1990 a 2000), y la significativa contribución de los bosques de cierta protección contra las catástrofes se pasó por alto en gran medida. La cartografía de los peligros que hay en las zonas montañosas, por lo tanto, debería incluir los desplazamientos de masas de nieve, que son específicos de los lugares, y todos los bosques protectores designados para recibir tratamiento especial.

Formación de los aludes

Las laderas cubiertas de nieve están compuestas de capas de nieve que tienen límites reconocibles. De acuerdo con las propiedades de las capas limítrofes, se pueden producir movimientos de deslizamiento, que también pueden obedecer a las propiedades de la superficie del suelo y la cubierta de nieve. Cuando hay una carga excesiva, toda la cubierta de nieve se puede deslizar. Estos movimientos dependen de los siguientes factores locales:



Una franja forestal protege una central hidroeléctrica y las vías férreas transalpinas de posibles aludes (Suiza)

- el gradiente de la ladera;
- la densidad de la nieve;
- el tipo de nieve;
- las propiedades de las capas limítrofes.

Los aludes en placas se asocian a:

- gradientes de la ladera de más del 85%;
- capas débiles y zonas de deslizamiento;
- una cubierta de nieve con capas homogéneas;
- nieve compacta (cohesiva).

Se pueden producir aludes de nieve suelta en:

- laderas con gradientes del 85% al 170%;
- nieve con poca cohesión.

Los aludes forestales son aquellos cuya zona de liberación está en un bosque. Se producen cuando hay grandes claros en el bosque, cuya dimensión es decisiva en la escala de los desplazamientos de nieve. En las zonas subalpinas y de alta montaña, en particular, los claros grandes y pequeños de los bosques forman parte de la estructura forestal casi natural, esencial para la regeneración. Por lo tanto, es imposible controlar del todo el movimiento de la nieve en los bosques.

Reducción integrada de riesgos de aludes

Los planes de protección contra aludes deberían aunar una serie de medidas complementarias:

- evitar las zonas de riesgo de aludes, teniendo en cuenta los peligros naturales

RECUADRO 6
**Experiencias internacionales: el invierno de aludes
de 1999 en la región alpina de Europa**

El invierno de 1999 se cobró un total de 70 vidas en Austria, Francia, Italia y Suiza, principalmente en zonas residenciales y, en menor grado, en las carreteras. Evolène, una aldea de las montañas del cantón suizo de Valais, sufrió daños particularmente, con la pérdida de 12 vidas; en Chamonix, en los Alpes de Saboya en Francia, hubo otras 12 víctimas; en las aldeas de Ischgl/Valzur y Galtür en el valle de Paznau, en el Tirol austriaco, se perdió un total de 38 vidas; en Morgex, en el valle de Aosta italiano, murió una persona. Sólo en Suiza hubo cerca de 1 000 aludes devastadores (Nothiger y Elsasser, 2004).

Los problemas para retirar la nieve y el riesgo de aludes dieron lugar a cierres temporales de los ejes internacionales de tránsito que atraviesan los Alpes, como la carretera y las vías férreas de San Gotardo, la carretera y las vías férreas de Tauern, el túnel de Arlberg y los pasos de San Bernardino y el Gran San Bernardo.

En los cientos de zonas de la región alpina afectadas por los aludes, muchas localidades y valles enteros quedaron completamente aislados durante varios días. En algunos lugares hubo que evacuar a la población local y los turistas, lo que hizo que algunos de éstos, que no corrían riesgo directo de estar expuestos a aludes pero se vieron aislados en los lugares donde transcurrían sus vacaciones, percibieran el paisaje de montaña como peligroso, anteriormente considerado un paraíso para el esparcimiento. Algunos turistas no pudieron afrontar la situación, que duró un tiempo considerable. Querían ser rescatados y, en muchos casos, los pocos helicópteros que había disponibles representaban su única esperanza de escape.

Además de las vidas perdidas, hubo alrededor de un millardo de francos suizos de daños en construcciones residenciales e industriales, graneros alpinos y establos, estructuras de protección contra aludes, cableado eléctrico, infraestructura de comunicaciones y transporte (incluidos los teleféricos) y bosques de montaña. Las pérdidas económicas indirectas debidas al trastorno del transporte y los suministros se estimaron en 500 millones de francos suizos, la mitad del costo de los daños materiales.

Exacerbó esta emergencia la presencia de cientos de miles de turistas que pasaban las vacaciones en los Alpes en febrero, lo que suscitó una solidaridad espontánea entre los turistas aislados en la zona y la población local, ya que ambos se hicieron cada vez más dependientes unos de otros conforme avanzaba la situación de emergencia.

Fuente: Greminger, 2005.

en la planificación de los espacios (para esto son una ayuda indispensable los registros y mapas de los peligros);

- medidas de bioingeniería para prevenir la formación de aludes, como la reforestación o forestación y el mantenimiento de los bosques protectores;
- medidas técnicas y de organización para dar la alerta precoz cuando hay fenómenos de aludes, que incluya previsión de aludes y alerta precoz sobre la acumulación de grandes volúmenes de nieve, como base para organizar la evacuación y el cierre de las rutas de transporte;
- verificación periódica, mantenimiento y reparación de las estructuras presentes, incluidas las de protección de objetos y las barreras de liberación de aludes.

El centro de esquí de Vail, Colorado, en los Estados Unidos de América, tiene una estrategia bien planificada de prevención que incluye la señalación y cartografía de zonas de peligro de aludes y la elaboración y aplicación de reglamentos de zonificación para el uso de las tierras (Oaks y Dexter, 1987).

Bosques protectores

Los bosques también influyen en la formación de la cubierta de nieve, y de aludes por lo tanto, en virtud de la intercepción, los climas más frescos de las masas de árboles y la rugosidad del terreno causada por los árboles en pie y los troncos y ramas que hay sobre el terreno.

Los árboles reducen significativamente la probabilidad de que se produzcan aludes (estudio de caso 9). En las laderas boscosas se pueden producir aludes sólo en gradientes de por lo menos 70%, en comparación con el 58% de las laderas expuestas o con masas de alerces. Se pueden producir menos aludes en las zonas con abundantes masas de árboles que en las zonas abiertas, pero si un alud comienza en una zona de ese tipo será mayor de lo que hubiera sido en una zona sin bosque.

Los árboles de una altura por lo menos del doble que la profundidad de la nieve contribuyen a prevenir los aludes de nieve. Los árboles bajos completamente cubiertos de nieve (como el pino suizo de montaña y el aliso verde) en realidad pueden promover la formación de aludes mediante el movimiento elástico de las ramas. Las especies de árboles caducifolios, que en el invierno están desnudos, sólo son eficaces cuando el nivel de la nieve es bajo; su efecto es limitado cuando las nevadas son grandes. En los límites de los cursos de los aludes muchas veces se plantan especies caducifolias porque aquéllos se llevan las especies de árboles perennes debido a que tienen una mayor resistencia al aire.

Cuando la nieve tiene de uno a dos metros de profundidad, que afecta sólo a los troncos de los árboles, un bosque puede desacelerar la precipitación del alud. Cuando la profundidad del caudal es mayor y la velocidad más elevada, como en los aludes de nieve suelta, se destruye el bosque, pero se puede producir un efecto de freno en la zona de desprendimiento si la velocidad de la nieve que se desplaza no es demasiado elevada, lo que reduce el alcance del alud.

En muchos países desarrollados, la recolección de madera en zonas donde sopla mucho viento ya no resulta viable económicamente, por lo cual se deja sobre el suelo. Esta práctica no se recomienda por muchas razones, incluido el riesgo de

ESTUDIO DE CASO 9

Protección forestal contra los aludes en Suiza

La vida y las actividades humanas en la región alpina de Suiza no serían posibles si las montañas no estuvieran cubiertas de bosque, que protegen de los peligros naturales más de 7 000 hectáreas de zonas residenciales e industriales ubicadas más abajo, así como numerosas rutas de transporte. Unos 130 000 edificios aproximadamente y varios cientos de kilómetros de vías férreas y carreteras también se benefician. Los bosques protectores tienen particular importancia en las laderas que corren riesgo de sufrir aludes, en las zonas directas de cuenca de los torrentes de las montañas y en las laderas empinadas vulnerables a la erosión del suelo. Un 30% de las 700 000 hectáreas aproximadamente de bosques de montaña ofrecen una protección directa contra los aludes y desprendimientos de rocas.

Alrededor de una tercera parte de la región alpina de Suiza tiene cubierta forestal. A alturas elevadas, hasta la línea natural de árboles de 2 000 metros sobre el nivel del mar, el bosque perenne de coníferas ofrece la protección mayor contra aludes, desde el punto de vista de la superficie. En los últimos 120 años se han reforestado muchas laderas en las que hay riesgo de aludes. Millones de árboles recientemente plantados ya están arraigados en las laderas empinadas de entre 28% y 45%, que serían zonas desde las cuales podrían desprenderse aludes si no hubiera estos bosques. Un bosque de montaña que no tenga claros grandes entre los árboles previene la formación de una placa uniforme de nieve, y de esta manera estabiliza el manto de nieve. En esta región, los bosques de montaña protegen contra la precipitación de aludes en varios cientos de kilómetros cuadrados.

Después de los inviernos de aludes extremos de principios del decenio de 1950, las regiones alpinas de Alemania, Austria, Francia, Italia y Suiza han realizado actividades intensivas de protección contra aludes, en las que desempeña una función importante el mantenimiento de eficaces bosques protectores. Se aplican estrategias análogas de protección en Austria, Baviera, Liechtenstein y Suiza. El devastador invierno de 1950-1951 se cobró 98 víctimas de los aludes en la región alpina suiza y destruyó casi 1 500 edificios. La mayoría de estas personas fueron tomadas por sorpresa y aplastadas hasta morir cuando sus casas quedaron sumergidas por la nieve.

Debido al auge del turismo de invierno y al enorme crecimiento del transporte de personas y bienes a través de los Alpes, la zona de peligro potencial hoy se utiliza mucho más intensamente que en el decenio de 1950. De esta manera, con un nivel comparable de frecuencia de aludes, en 1998/1999 había cinco veces más personas que en el invierno de 1950/1951 en zonas particularmente riesgosas de montaña. Sin embargo, la pérdida de vidas y los daños causados por los aludes de esa temporada fueron significativamente menores que en 1950/1951. La suerte no basta para explicar que este invierno de aludes extremos no cobrara más vidas y causara más daños a las propiedades, sino que cabe pensar que la intensificación de las medidas de prevención establecidas desde el decenio de 1950 ofreció una protección excelente, que dio buenos resultados.

Fuente: Greminger, 2005.

infestación de gorgojos de la madera, pero el viento que sopla ofrece una protección muy eficaz contra los movimientos de la nieve. La madera muerta, los tocones de árbol, las masas de raíces y los troncos caídos crean una estructura de la superficie que ejerce una influencia positiva en los depósitos de nieve, anclándola con eficacia al suelo. Esta madera ofrece una buena protección en las situaciones comunes de inicio de un alud, es decir, en gradientes del 58% al 84% de las laderas. En los lugares muy empinados y cuando hay volúmenes de nieve excepcionalmente grandes, la madera puede no resistir la carga y la nieve se desplazará arrastrándola. El riesgo aumenta gradualmente debido a la descomposición biológica de la madera y se debe tener en cuenta en las situaciones donde hay un gran riesgo de que se produzcan daños.

Directrices

La cartografía de los peligros naturales en los entornos montañosos se está convirtiendo gradualmente en una política y procedimiento comunes en muchos países. Las zonas con riesgo de aludes deben incorporarse en este esfuerzo.

Los bosques situados a alturas elevadas de más del 58% de pendiente, en zonas donde cae suficiente nieve para dar lugar a aludes de placa o de nieve suelta, pueden ser bosques de protección contra aludes. Éstas son zonas de alerta, pero proteger estos bosques sólo es una parte de la tarea necesaria. Establecer una cubierta de árboles en zonas abiertas donde se originan aludes por encima de la línea de los árboles también puede contribuir a la protección. Con el cambio climático, la línea de los árboles está ascendiendo naturalmente, haciendo esto cada vez más factible. La explotación maderera se debe realizar con el máximo cuidado. La ordenación de estos bosques es compleja y es recomendable consultar bibliografía especializada y a expertos antes de hacer cualquier modificación a los bosques. Una utilización de los bosques no informada e inadecuada puede incrementar los riesgos en las zonas propensas que están por debajo de los bosques, los que es necesario regenerar conforme envejecen y se hacen más propensos a degradarse y pierden funciones. La fauna silvestre repercute en la regeneración porque muchas de sus formas encuentran una parte de sus necesidades de hábitat en las zonas de caída de los aludes. Supervisar y mantener no sólo los bosques sino también las zonas cambiantes de interés (nuevas zonas propensas a los aludes) ha cobrado una mayor urgencia debido al cambio climático.

Los programas integrados de protección contra aludes deberán dar prioridad a las medidas biológicas para la función protectora y opciones técnicas para los sistemas de alerta precoz.