

T. Carballas Fernández

Los incendios forestales





Los incendios forestales

T. Carballas Fernández. *Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia*
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

1. Introducción

El Plan Forestal de Galicia, elaborado por la Xunta de Galicia en 1992, señala como «objetivo prioritario de cualquier política forestal en Galicia la erradicación de los incendios forestales...». Esta declaración da la medida del problema que representa en esta Comunidad Autónoma el fenómeno de los incendios forestales. Algunas cifras justifican la preocupación de gobernantes y habitantes de esta privilegiada región en cuanto a belleza paisajística y riqueza potencial de sus montes. Galicia, con una superficie total de 2.943.000 ha, contiene, aproximadamente, 2.000.000 ha, es decir, 2/3 de su superficie territorial, con vocación forestal, favorecida por su climatología, que proporciona abundantes lluvias (600-3.000 mm de precipitación anual) y sólo de forma esporádica períodos de sequía severa y prolongada. Bosques, abundantes matorrales y herbáceas cubrían nuestros montes, constituyendo una gran riqueza ecológica y económica por sí misma, pero también por su papel de protección del suelo frente a la erosión que, de esta forma, alcanzaba niveles poco preocu-

pantes. Sin embargo, en los últimos 32 años, cerca de 1.500.000 ha de superficie forestal han sido recorridas por el fuego de cerca de 150.000 incendios. Bosques, matorrales y todo tipo de cubierta vegetal afectada por los incendios es destruida (de forma recurrente en muchos casos), los suelos se degradan en mayor o menor grado y, sobre todo, se desencadena el impacto quizás más negativo de los incendios, la erosión del suelo, que aumenta hasta niveles altamente preocupantes en algunos casos. Ante semejante catástrofe ecológica y medioambiental, el Gobierno de la Comunidad reaccionó poniendo en marcha medidas de prevención, lucha y extinción de los incendios forestales, particularmente con la puesta en marcha, en 1990, del Servicio de Defensa contra Incendios Forestales (SDCIF), encargado de ejecutar cada año el correspondiente Plan integrado para la lucha contra incendios forestales de la Comunidad de Galicia (Plan INFOGA). Y numerosos investigadores han dedicado y dedican sus esfuerzos al estudio de los efectos de los incendios forestales incontrolados y, también, de los incendios forestales prescritos (usados como medida de prevención) sobre los distintos componentes del medio ambiente así como a la búsqueda de métodos o técnicas para la restauración de los ecosistemas afectados. Todo ello con el fin de poner a disposición de los gobernantes una amplia base de conocimientos científicos que les ayuden en la toma de decisiones dirigidas a reducir los incendios a fuegos esporádicos y controlables y que les permitan cumplir el verdadero objetivo de la política forestal: «pretender un equilibrio entre las funciones ambientales del monte y la obtención de rendimientos económicos satisfactorios.»

2. Aspectos generales

Los incendios forestales son la combustión de una considerable cantidad de un material combustible vegetal en presencia de una fuente de calor. Combustible, oxígeno y fuente de calor es lo que se llama triángulo del fuego, aunque actualmente se habla de tetraedro del fuego, añadiendo las reacciones en cadena, que se producen por combinación entre los gases que se liberan por calentamiento del combustible y el aire, el cual proporciona el oxígeno necesario para que el proceso continúe. La vegetación forestal (árboles vivos, sotobosque y matorral), así como los materiales muertos que se encuentran sobre la superficie del suelo en las formaciones vegetales e, incluso, la materia orgánica del suelo, constituyen el combustible que normalmente se encuentra en grandes cantidades en los ecosistemas forestales de la Comunidad gallega. Este com-

bustible, que se clasifica en ligero (hierbas, hojas, acículas y ramitas), pesado (troncos, ramas y raíces) y verde (plantas vivas con su follaje), tiene una determinada organización horizontal y vertical, presentando cada tipo de combustible unas características específicas: temperatura de ignición, combustibilidad, poder calorífico, etc.

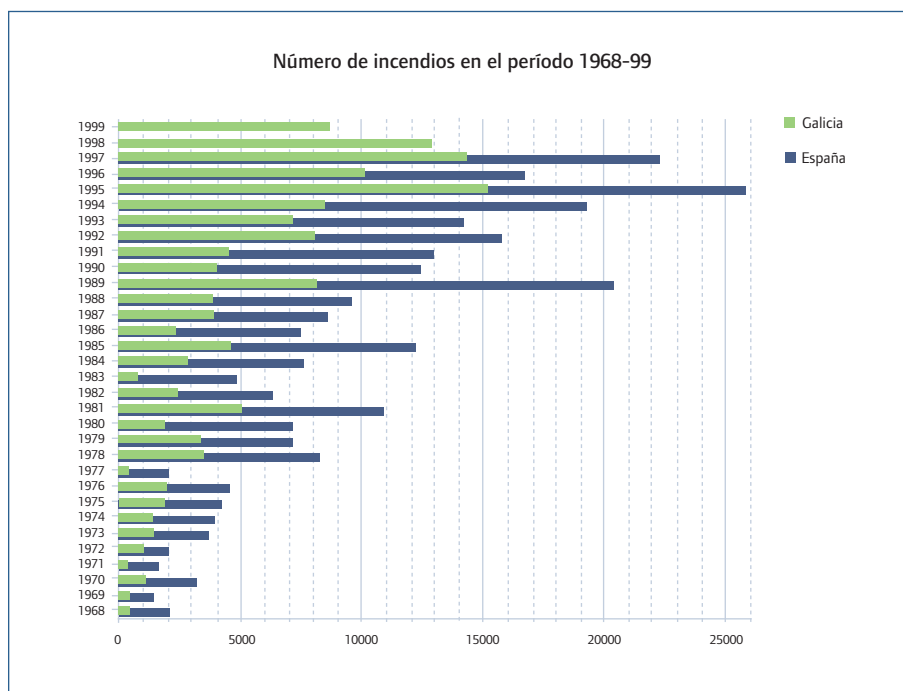
Según el material afectado, los incendios forestales pueden ser:

- a) Fuegos de superficie o de suelo, cuando afectan a las masas más bajas y menos compactas de la vegetación, situadas en la superficie del suelo, que es lo más inflamable del bosque.
- b) Fuegos de copas, que se producen cuando el bosque es muy denso y con árboles suficientemente altos.
- c) Fuegos de humus o subsuelo, que afectan a la materia orgánica del suelo sin producir llamas y su propagación es muy lenta.

Los incendios se agrupan en:

- a) Incendios incontrolados. A su vez, distinguimos:
 - I. Incendios de baja intensidad, caracterizados por la presencia de cenizas negras (restos vegetales chamuscados) en el horizonte superficial del suelo, en cuya superficie la temperatura puede variar entre 100 y 250 °C y la temperatura a 1-2 cm de profundidad es menor de 100 °C.
 - II. Incendios de intensidad moderada, en los que se produce una combustión parcial de la materia orgánica, desapareciendo la mayoría de los restos vegetales de la superficie del suelo, en la cual la temperatura alcanzada oscila entre 300 y 400 °C, con temperaturas de 200-300 °C a 1 cm de profundidad, 60-80 °C a 3 cm y 40-50 °C a 5 cm.
 - III. Incendios de alta intensidad, cuando aparecen cenizas blancas en la superficie del suelo, lo que indica una combustión total de los combustibles, alcanzándose en superficie temperaturas comprendidas entre 500 y 700 °C, muy por encima de la temperatura de ignición de los materiales orgánicos; la penetración del calor en el perfil del suelo depende de la duración del incendio, aunque pueden alcanzarse temperaturas de 350-450 °C a 2 cm, 150-300 °C a 3 cm y 100 °C o menos a 5 cm. En general, el calentamiento no afecta al suelo a más de 7-10 cm de profundidad.
- b) Incendios planificados, usados, por ejemplo, en la destrucción de bosques con fines agrícolas.
- c) Fuegos prescritos o controlados, usados para el manejo de los ecosistemas forestales; por ejemplo, para control del combustible.

El fuego fue siempre una herramienta de trabajo utilizada por los agricultores gallegos, particularmente el quemado superficial del monte para el cultivo de cereales (aprovechando el aumento efímero de la fertilidad química como consecuencia de la acumulación de cenizas y, por lo tanto, de nutrientes, procedentes de la vegetación quemada) la quema de broza, etc. Sin embargo, desde el año 1968 los incendios incontrolados (148.231 hasta 1999) han ido aumentando poco a poco hasta alcanzar valores no conocidos históricamente [figura 1] y conver-



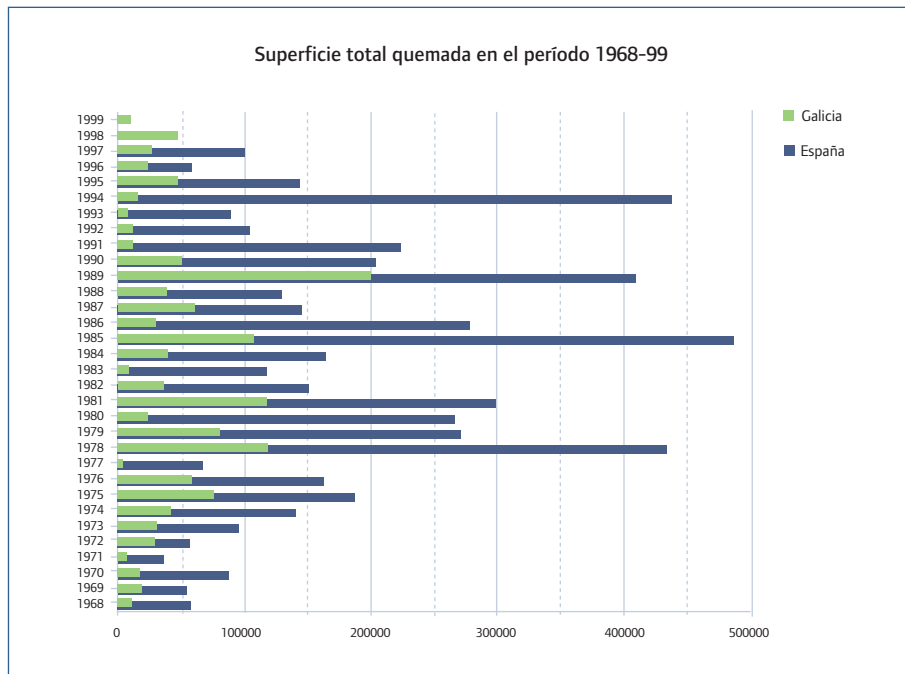
[Figura 1] Número de incendios ocurridos en la Comunidad Autónoma de Galicia y en el conjunto de España en los períodos 1968-1999 y 1968-1997 respectivamente

tirse en verdaderas catástrofes, tanto por la superficie recorrida (1.416.507 ha) [figura 2] como por la calidad del monte afectado (586.739 ha de superficie arbolada, que representan el 41% de la superficie total quemada) [figura 3].

Las razones de esta explosión en el número de incendios hay que buscarlas, primeramente, en antecedentes históricos y luego, en causas actuales. El bosque climácico gallego, bosque caducifolio, robledal de *Quercus robur*, con su cortejo de especies caducifolias y su particular sotobosque, sufre varias deforestaciones, bien como consecuencia de la demanda de madera para la Armada y para las vigas del ferrocarril, de carbón vegetal para las fundiciones y de leña para las fábricas de curtidos, bien por el aumento de la agricultura extensiva

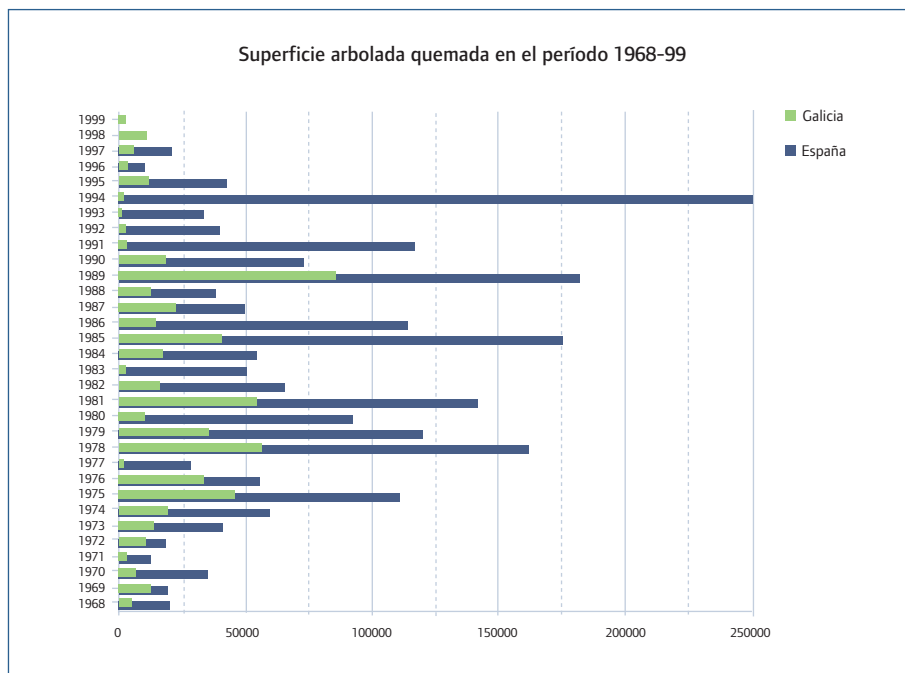
[Figura 2]

Superficie total quemada por incendios forestales en la Comunidad Autónoma de Galicia y en el conjunto de España en los períodos 1968-1999 y 1968-1997 respectivamente



[Figura 3]

Superficie arbolada quemada por incendios forestales en la Comunidad Autónoma de Galicia y en el conjunto de España en los períodos 1968-1999 y 1968-1997 respectivamente



como consecuencia del aumento de la población, lo que causa la expansión del matorral, principalmente de tojos y brezos. Por otra parte, la madera y el material arbustivo fueron utilizados y consumidos como material combustible para usos domésticos y las plantas del matorral para cama del ganado, con el fin de obtener estiércol, que constituía el mejor y único fertilizante para las tierras agrícolas, sin olvidar que tanto el sotobosque como el matorral eran objeto de pastoreo. Para estos fines, el tojo fue extensivamente sembrado por los campesinos desde el siglo XVIII hasta la década de 1950.

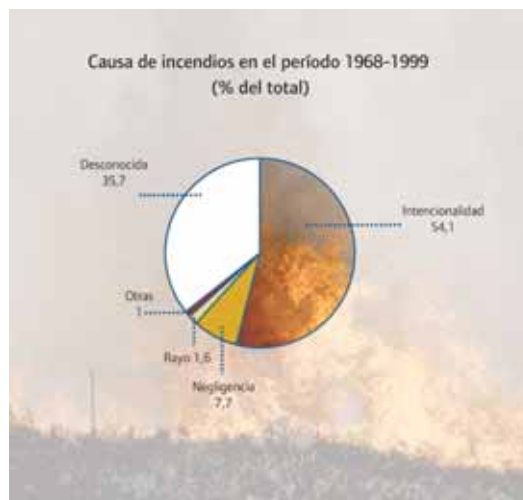
El deterioro de los bosques debido a la deforestación fue contrarrestado, en la misma década, con una repoblación masiva, no de especies autóctonas, generalmente de crecimiento lento, sino por comunidades monoespecíficas de pinos y eucalipto, especies productoras, de crecimiento rápido, pero también especies pirófitas favorecedoras de los incendios forestales. El control de la vegetación que ejercía el uso doméstico de ésta y la obtención de estiércol resultó frenado en este mismo período de tiempo por varias causas: el uso de otros combustibles como medio de calentamiento, el advenimiento y uso masivo de fertilizantes minerales en detrimento de los orgánicos, la disminución de la ganadería extensiva y la proliferación de establos industriales para la cría de ganado, que disminuye el pastoreo y produce otro tipo de fertilizante orgánico, el purín, para cuya obtención no es necesaria la cama.

Consecuencia de todos estos hechos es el abandono del cuidado de los montes y la acumulación de enormes cantidades de materiales vegetales, algunos de los cuales son altamente combustibles, lo que favorece la proliferación de los incendios forestales. Sobre la base de estos acontecimientos históricos hay que buscar también las causas inmediatas de estos incendios. Si bien la meteorología (temperatura máxima y humedad relativa del aire, precipitación y velocidad y dirección del viento) tiene una gran influencia sobre el riesgo potencial y la propagación de los incendios, no es una causa directa, salvo en el caso del rayo. Y lo mismo ocurre con la distribución de la población. Según las últimas estadísticas, de las posibles causas: rayo, negligencia (escape de fuegos producidos por los agricultores y ganaderos o por los excursionistas, vertederos, etc.), intencionalidad (por múltiples razones: rencillas entre vecinos, preparación de pastizales y cotos de caza, extensión del ganado caballar, lucha contra alimañas y ganado del monte, etc.), desconocidas y otras [figura 4], la intencionalidad, con un promedio del 54% en el período entre 1968 y 1999, destaca como la mayor causa de los incendios actuales, alcanzando una media del 86% en los últimos siete años. Es obligado concluir, por lo tanto, que el hombre o las actividades del hombre están casi siempre detrás de los incendios y que los impactos del fuego son, en realidad, impactos antrópicos. Y esto a

pesar de que numerosas encuestas ponen de manifiesto que la población gallega, en general, ha pasado de una actitud pasiva ante este fenómeno, en los primeros años, a una importante toma de conciencia sobre la importancia de los montes, reconociendo no sólo el valor ecológico, social y económico de éstos como patrimonio colectivo, sino también el abandono en que se encuentran tanto por parte de los dueños como de la Administración y exigiendo que se frene su deterioro.

El número de incendios forestales, así como la superficie afectada, no se ajustan a ningún modelo o pauta de comportamiento. En cualquier caso, destacan los años 1978, 1981, 1985 y, sobre todo, el año 1989, no tanto por el número de incendios, sino por la superficie quemada (38% de la superficie total quemada, en los cuatro años);

también resalta el elevado número de incendios de los últimos ocho años, cuando ya funciona el SDCIF, que contrasta con la escasa superficie quemada, lo cual indica que se ha incrementado el índice de eficacia, representando este último hecho, quizás, el mayor éxito de los planes de prevención y extinción de incendios. Salvo en los años 1992 y 1995, existe una autocorrelación espacial positiva entre la densidad de los incendios, la superficie arbolada quemada y la superficie total quemada. Como zona de mayor densidad de incendios aparece el sudoeste de Galicia (sobre todo las Rías Baixas), mientras que la menor densidad de incendios se localiza en el norte/centro de la provincia de Lugo. Las zonas de mayor superficie quemada aparecen, en su mayor parte, aisladas, y no existe una distribución estable a lo largo de los años. De la comparación de estos datos con las características meteorológicas y la distribución de la población, se deduce que cada uno de estos factores por separado no explica el comportamiento de los incendios, sino que deben tenerse en cuenta ambos, prevaleciendo la influencia de la meteorología en unas zonas y la distribución de la población en otras.



[Figura 4]

Causas de los incendios forestales ocurridos en la Comunidad Autónoma de Galicia (valores medios, en porcentaje del número total de incendios, para el período 1968-1999)

Según estudios históricos recientes, de datos de más de 30 años, la estación de incendios en Galicia comienza a principios o mediados de marzo y ter-

mina a mediados de octubre, es decir, dura siete meses; y existen dos picos de incendios, uno a finales de invierno (febrero-marzo) y otro a mediados del verano (agosto-septiembre), siendo en algunos años (por ejemplo en 1971, 1992 y 1997) mayor el de invierno que el de verano.

Para comprender la magnitud del problema que afecta a esta Comunidad basta decir que aunque Galicia representa el 5,8% de la superficie total de España, desde 1968 hasta 1997 soportó el 45% de los incendios producidos en todas las comunidades [figura 1] y que, con una superficie forestal que supone, aproximadamente, el 16% de la superficie forestal total de España, la superficie recorrida por el fuego en esta Comunidad, durante el mismo período, representa el 25% de toda España [figura 2] y el 26% de la superficie arbolada quemada [figura 3], bien entendido que la misma superficie puede resultar afectada por el fuego más de una vez. Otros países que, dentro de la Comunidad Europea, sufren el azote del fuego son Grecia, Italia, Francia y Portugal, es decir, los países del área mediterránea.

3. Efecto de los incendios forestales

La persistencia de los incendios forestales incontrolados, que progresivamente están destruyendo ecosistemas mediterráneos y atlánticos, constituye un serio problema medioambiental, no sólo por las grandes pérdidas económicas que producen debido a la destrucción de las masas forestales, sino también por la degradación que pueden inducir en los suelos; es este efecto es particularmente importante desde el punto de vista de la conservación del suelo, la regeneración de la vegetación y la recuperación del paisaje. Los incendios incontrolados también destruyen la fauna, aumentan el riesgo de erosión, causan la movilidad de material orgánico y de nutrientes del suelo, producen cambios en la calidad del agua y en el régimen hídrico, y aumentan la contaminación del aire. Por consiguiente, los incendios incontrolados afectan a todos los componentes del medio ambiente. Además, muchas zonas son afectadas por estos incendios reiteradamente y, de esta forma, los efectos negativos se acumulan.

Al hablar de los efectos de los incendios, es necesario distinguir entre los efectos inmediatos y directos del fuego (destrucción de plantas y seres vivos, por ejemplo) y los efectos a largo plazo, cuando los efectos a corto plazo son modificados por las variaciones estacionales e intervienen los agentes climáticos; estos últimos efectos pueden conducir a una mayor degradación del suelo,

como cuando actúa la erosión, por ejemplo, o, por el contrario, favorecer su regeneración, como cuando interviene la revegetación. También es necesario distinguir entre el impacto sobre el área forestal quemada y los efectos originados por los materiales arrastrados desde la zona afectada por el incendio, que pueden causar desequilibrios en aquellos ecosistemas terrestres y acuáticos que reciben los materiales (ríos, lagos, embalses, estuarios), localizados lejos de la zona forestal quemada.

Los efectos ecológicos y biológicos de los incendios forestales incontrolados dependen de las condiciones del área quemada (cantidad y tipo de vegetación, humedad del combustible y del suelo, tipo de suelo, pendiente y microclima) y de la intensidad del fuego, que está condicionada, a su vez, por las condiciones del área afectada.

3.1. Efecto de los incendios forestales sobre la atmósfera [figura 5a]

Con respecto a la atmósfera, los incendios forestales causan los siguientes efectos:

- a) Aumentan la contaminación del aire.
- b) Contribuyen, aunque temporalmente, a aumentar el efecto invernadero debido a las grandes cantidades de dióxido de carbono que se liberan.
- c) En general, se cree que no tienen influencia sobre el cambio climático global, debido a que las sustancias absorbentes no alcanzan la estratosfera, aunque sobre esto hay cierta controversia.
- d) Producen variaciones térmicas en la atmósfera.

La contaminación se debe a la emisión de un gran número de sustancias en forma de aerosoles y pequeñas partículas, aunque no todos los numerosos productos de la combustión de la vegetación están identificados. Aparte del CO_2 y del vapor de agua, el penacho de humo de los incendios forestales contiene una gran variedad de sustancias: gases como NH_3 , N_2O , NO y NO_x , hidrocarburos sólidos, líquidos y gaseosos, aldehídos como formaldehído y acroleína, y ácido fórmico, entre otras. Todos estos compuestos son poderosos irritantes de las mucosas, alergógenos o tienen otras propiedades tóxicas. El monóxido de carbono fue detectado, pero su presencia es rara. También se observaron precursores de radicales libres, productos muy peligrosos, porque pueden afectar a moléculas esenciales dentro de las células, tales como las proteínas y los ácidos nucleicos. El ozono no es un producto directo del fuego, pero se forma en el humo disperso; su papel aquí es como contaminante, ya que su función como

Foto cedida por M. I. Paz Andrade

escudo en las partes altas de la atmósfera, contra la radiación ultravioleta, no tiene ninguna relación con el producido en los incendios. Los hidrocarburos presentes en la atmósfera dan lugar a reacciones que impiden que se elimine el ozono, de tal forma que, en general, el aumento de hidrocarburos en la atmósfera, como consecuencia de los incendios, va acompañada de un aumento de ozono. Finalmente, los incendios forestales son fuentes naturales de elementos traza.

[Figura 5a]

Impacto de los incendios forestales sobre la atmósfera



Durante los incendios se producen fuertes corrientes de aire hacia arriba (corrientes de convección), debido a que la superficie de la tierra está más caliente como consecuencia del incendio. Partículas de carbón y cenizas son transportadas desde la zona de la llama hasta la parte superior de la columna de convección, incorporándose a la atmósfera. De estas partículas, las menores de $5-10 \mu$ de diámetro permanecen suspendidas en la atmósfera hasta ser lavadas por la lluvia; las menores de $2-3 \mu$ penetran profundamente en los pul-

mones cuando se inhalan y las menores de 0,1 μ pueden depositarse hasta en los bronquiolos más finos.

Las partículas de humo pueden reaccionar químicamente con varias especies reactivas de la atmósfera perturbando el equilibrio de la química atmosférica. Además, la contaminación origina la absorción de la radiación solar y esto influye sobre el régimen térmico de la atmósfera y de la superficie de la tierra. El humo contiene ingredientes que pueden reaccionar bajo la influencia de la luz del sol y formar nieblas de origen fotoquímico. Otro efecto es que se favorece el enfriamiento de la superficie de la tierra cuando el humo del incendio es atrapado en un valle por una inversión térmica, citándose temperaturas en la superficie del suelo de hasta 15 °C por debajo de la temperatura normal.

Aunque todos estos efectos y otros no citados aquí han sido observados por diversos investigadores en diversas partes del mundo, en Galicia no se han encontrado estudios sobre estos temas, a pesar de su importancia, por lo que es un área de investigación que se debe promover en el futuro. Únicamente en un estudio que tenía como objetivo la realización del inventario de focos industriales de contaminación atmosférica de Galicia, en el que se censan las industrias cuya carga contaminante supera las 100 t año⁻¹ de SO₂, 10 t año⁻¹ de NO_x y 5 t año⁻¹ de compuestos orgánicos volátiles (COV), se incluyen datos [tabla 1] de contaminantes atmosféricos emitidos durante los incendios forestales registrados en el año 1989, un año que destaca por la severidad de los incendios medida en hectáreas de superficie arbolada afectada.

[Tabla 1]

| | Localidad | COV* | SO ₂ | NO _x | Partículas |
|--|------------|---------|-----------------|-----------------|------------|
| Contaminantes atmosféricos emitidos en el año 1989 en Galicia debidos a los incendios forestales expresados en toneladas | A Coruña | 45.400 | 1.300 | 69.400 | 45.000 |
| | Lugo | 29.700 | 800 | 40.000 | 26.000 |
| | Ourense | 24.100 | 600 | 30.000 | 19.500 |
| | Pontevedra | 38.800 | 1.300 | 63.200 | 41.000 |
| | Galicia | 138.000 | 4.000 | 202.600 | 131.500 |

*COV: compuestos orgánicos volátiles

Comparando los valores de los contaminantes emitidos, debido a los incendios, con los de origen industrial, se observa que, si bien las emisiones de SO₂ son 172 veces menores que las emitidas por las industrias, los valores de óxidos de nitrógeno, partículas en suspensión y COV son 6,6 y 3,4 veces mayores, respectivamente; la provincia más afectada es la de A Coruña, seguida de las de Pontevedra, Lugo y Ourense, por este orden. Si bien es cierto que el año

1989 fue excepcional, estos datos permiten estimar la magnitud de la contaminación atmosférica causada por la incidencia de los incendios en la Comunidad gallega.

3.2. Efecto de los incendios forestales sobre la vegetación

Ya se ha indicado que la vegetación forestal, constituida principalmente por bosques y matorrales, es el material combustible de los incendios forestales. Según el Plan Forestal de Galicia, las masas arboladas están formadas por un 40% de coníferas, principalmente bosques monoespecíficos de *Pinus pinaster* (75%), *P. sylvestris* y *P. radiata*, aproximadamente un 20% de caducifolias, sobre todo bosques de roble (*Quercus robur* y *Q. pyrenaica*) y un 40% constituido por mezclas de eucaliptos, pinos y robles. Pinos y eucaliptos, que proceden de repoblaciones, dan lugar a formaciones con un sotobosque parecido, aunque con ciertas diferencias, y similar a los matorrales de tojos, aunque con una cobertura arbustiva (76% en pinares y 89% en formaciones de *Eucalyptus globulus*) y una biomasa (5-10 t ha⁻¹) menores que en tojales sin cobertura arbórea, diferenciándose estos bosques de los tojales en la presencia de esta cubierta arbórea y de una gran cantidad de hojarasca sobre el suelo.

Los bosques de robles, que representaron el bosque clímax de Galicia, presentan un sotobosque muy diferente de los anteriores, con especies herbáceas y leñosas «que pertenecen al matorral noble asociado con las comunidades forestales clímax»; la cobertura arbustiva del sotobosque es del 62% y la biomasa representa aproximadamente 8 t ha⁻¹. Plántulas y arbolitos de *Q. robur* aparecen en casi todos los pinares, eucaliptales y matorrales, lo que indica la presencia en el pasado de robledales en estas áreas.

Los matorrales, formaciones arbustivas a cuya expansión han contribuido numerosas circunstancias ligadas a la intervención humana, representan, aproximadamente, el 43% de la superficie forestal. En general se desarrollan sobre suelos ácidos, pobres en nutrientes y a veces de poco espesor, y son muy tolerantes a distintas condiciones físicas; aguantan periodos de acusada sequía, aunque necesitan cierto grado de humedad que pueden conseguir incluso de las nieblas y brumas de la zona. Entre los numerosos tipos de matorrales que abundan en Galicia, destacan los tojales, en los que predomina la superficie cubierta por *Ulex europaeus*, *U. gallii* o *U. minor*, según el tipo de tojal, aunque también es importante la presencia de ericáceas, alcanzando la biomasa que se acumula en este tipo de matorral las 15 t ha⁻¹, aproximadamente. Son, sin duda, los matorrales más sujetos a la intervención humana (a la que no es ajeno el

valor de las especies leguminosas para el suelo) y también a la del fuego. Proporcionan una buena cobertura, cuyo valor para las especies leñosas puede alcanzar el 95%, con sólo un 5% de suelo desnudo. Los brezales, caracterizados por la presencia predominante de ericáceas, son también de varios tipos. El de *Erica umbellata* se distingue por su bajo porcentaje de cobertura, que deja aproximadamente un 30% de terreno sin vegetación leñosa y proporciona un bajo porcentaje de biomasa (alrededor de 5 t ha⁻¹). Característico de zonas húmedas es el brezal de *E. tetralix*, que proporciona, más o menos el 55% de cobertura y más de 20 t ha⁻¹ de biomasa. Aunque son menos frecuentes, los brezales de *E. arbórea* y *E. australis* son importantes por la altura de estas especies.

[Figura 5b]

Impacto de los incendios forestales sobre la vegetación



Foto cedida por S. J. González Prieto

Las *xesteiras*, o matorrales de retamas, constituidas por especies del género *Cytisus*, principalmente *C. scoparius* y *C. striatus*, de gran altura, ocupan una extensión menor, pero proporcionan un elevado porcentaje de cobertura leñosa (99%) y representan una elevada acumulación de biomasa (21-23 t ha⁻¹).

Toda esta vegetación, que supone un peligro potencial de incendios, forma una cubierta vegetal que, por un lado, protege el suelo del impacto de la lluvia y, por otro, con su entramado de raíces, lo sostiene evitando la erosión. El fuego destruye esta cubierta vegetal, con consecuencias económicas y sociales muy importantes, ya que incide no sólo en la producción de madera, principal riqueza de la vegetación arbórea, sino también en el mercado de la leña, frutos (castañas, sobre todo), productos del sotobosque (como las setas) o derivados (miel, por ejemplo). La destrucción de la cubierta vegetal deja los suelos desprotegidos frente a la erosión, a numerosos animales sin alimento y refugio

y, en general, priva a todos los seres vivos de un material fotosintetizador y oxígeno necesario para su vida. El fuego destruye sobre todo las partes aéreas de las plantas, representando la pérdida de fitomasa un importante porcentaje de la fitomasa viva; pero también afecta a las raíces y semillas, dependiendo el daño de la penetración del calentamiento en el perfil del suelo y de la intensidad y duración del incendio. A su vez, el tipo de vegetación y sus condiciones influyen sobre la intensidad del incendio y sobre el modo y grado de regeneración de las plantas [figura 5b].

Una gran cantidad de semillas de la reserva del suelo se destruye por la acción directa del fuego y un buen número se pierde por lavado con el agua de lluvia que cae después del incendio o por arrastre de las capas superficiales del suelo por erosión, debido a la distribución vertical, en forma de pirámide invertida, del banco de semillas en el perfil del suelo, con cerca del 80% de las semillas situadas entre 0 y 5 cm de profundidad. En sedimentos procedentes de la erosión del suelo por escorrentía superficial, la cantidad de semillas es hasta 10 veces mayor que en los suelos quemados y la erosión afecta a todos los grupos del banco de semillas, aunque de forma diferente. El calor producido por el fuego y las cenizas acumuladas sobre la superficie del suelo después del incendio producen otros efectos sobre las semillas, favoreciendo o inhibiendo su germinación y actuando también sobre las plántulas emergentes. Numerosos estudios han dedicado su atención a este tema.

De las especies arbóreas más comunes en los bosques de Galicia, la germinación de las semillas de roble y de abedul no resulta afectada, ni tampoco la de las de *P. pinaster* y *P. radiata*, mientras que la germinación de las semillas de *P. sylvestris* resulta ligeramente inhibida por efecto del calentamiento; la inhibición es aún mayor en el caso del eucalipto. De las plantas que forman los matorrales más generalizados en Galicia, la germinación tanto de las semillas de *Ulex* y de las cistáceas, como la de las ericáceas, resulta estimulada a temperaturas altas o medias, respectivamente, mientras que en algunas herbáceas (*Agrostis* spp.) este efecto no se produce. En cuanto a las cenizas, no se observa un efecto estimulante, sino que producen un efecto inhibitorio de la germinación de las semillas en casi todas las especies citadas, excepto en el abedul y en algunas especies del género *Agrostis*, y no se conoce su efecto sobre la germinación de las semillas de roble. En algunos casos, como en algunas especies del género *Agrostis*, la respuesta al calentamiento y a las cenizas depende de la posición de la semilla en la infrutescencia y, en otros, de características intrínsecas de la semilla. Con respecto a la emergencia de las plántulas, mientras que en las especies arbóreas no se observan cambios después del incendio, estos son importantes en las especies arbustivas, principalmente en las ericáceas, y,

de las leguminosas, en *Ulex europaeus*, en las que aumenta mucho el número de plántulas. La producción de rebrotes también resulta afectada por las características del fuego y por el estado de la planta, de tal forma que, generalmente, las plantas muy jóvenes resultan destruidas por completo, mientras que algunas plantas senescentes pierden su capacidad de rebrotar, que puede perderse también por incendios recurrentes.

La recuperación del banco de semillas es muy importante, porque constituye la reserva a partir de la cual puede desarrollarse una nueva comunidad vegetal cuando la cubierta vegetal es destruida. Asimismo, los efectos derivados del incendio sobre la producción de rebrotes son importantes desde el punto de vista de la regeneración de la vegetación quemada.

[Figura 5c]

Revegetación natural de un área quemada: primera etapa de sucesión secundaria



Foto cedida por M. Casal

La revegetación de las áreas quemadas, tanto de la vegetación arbórea como del matorral, se produce de forma natural, debido a que las plantas que constituyen estas formaciones tienen mecanismos para regenerarse por sí mismas;

sin embargo, el tiempo necesario para que se produzca esta regeneración natural depende del ecosistema afectado y de la intensidad del incendio, y puede tardar entre 1 y 5 años o a veces más, ya que, en general, con el incendio se pierde diversidad biológica y potencial biológico para la revegetación. Esta situación se agrava si la frecuencia de los incendios sobre la misma zona es mayor de lo normal.

En la regeneración natural de los matorrales mixtos de tojo y brezos se observan tres etapas. La primera que dura entre 0 y 3 meses, se caracteriza por la presencia

de un porcentaje elevado de suelo desnudo, sin vegetación, cubierto por una fina capa de cenizas, iniciándose la regeneración de especies preexistentes, que poseen sistemas de supervivencia, como *U. europaeus*, y la instalación de especies oportunistas procedentes de áreas adyacentes [figura 5c]. En la segunda etapa, con una duración de 3 meses a 2,5 años, predominan las especies herbáceas invasoras, poco exigentes y de carácter oportunista, las cuales coexisten con herbáceas vivaces y con la aparición de plántulas de las especies leñosas pirófitas (*U. europaeus*, entre otras), que poco a poco van desplazando a las terófitas; también se dan los mayores aumentos en cobertura y biomasa. En la tercera etapa, que se produce de 2,5 a 10 años después del incendio, se da paso al matorral, ya que se produce un predominio de especies leñosas y de herbá-

ceas vivaces, que sufren una importante regresión cuando el matorral está ya muy estructurado. En esta fase, que es la de mayor madurez, se atenúan los cambios estructurales. A lo largo de estas etapas, el recubrimiento por la vegetación es muy rápido: al cabo de un año, el suelo carente de vegetación representa el 74%, a los tres años el 30% y a los diez años sólo el 2%. La velocidad de la regeneración varía con la intensidad y la época del incendio; es más favorable si el incendio ocurre en primavera que si es en el otoño. En suelos sobre esquistos, la recolonización por las especies leñosas presentes es equilibrada, mientras que en suelos sobre granitos predominan casi exclusivamente los tojos.

La biomasa aumenta de forma paralela a la cobertura, con un crecimiento casi exponencial, muy rápido en los tres primeros años y atenuándose a medida que la comunidad se hace más estable. A los 10 años se alcanza una biomasa de 10-25 t ha⁻¹. El mayor aporte se debe a los tojos (*U. europaeus* aporta el 70-75% de la biomasa total a los 10 años) mientras que la contribución de los brezos es casi nula en los primeros estadios, aumenta desde el primer año y medio hasta los 5 años y luego se atenúa, aportando a los matorrales más desarrollados entre 0,5 y 4 t ha⁻¹.

Este comportamiento diferente entre tojos y brezos se debe, por un lado, a la resistencia al fuego y, por otro, a sus distintas estrategias de regeneración. El tojo, que es una planta pirófito, con un importante sistema radical que sobrevive al fuego, rebrota intensamente después del incendio y además, al poseer un banco de semillas cuya germinación es estimulada por el fuego, germina masivamente, por lo cual invade rápido el espacio, favorecida esta ocupación temprana por la escasa competencia por los nutrientes disponibles (que además aumentan con el quemado de la vegetación), así como por la falta de cubierta vegetal, al ser heliófila. A pesar de tener estas dos estrategias regenerativas, los tojos acumulan la mayor parte de su biomasa por rebrote, ya que las plántulas sufren una gran mortalidad, siendo mayor su supervivencia en zonas de rellano que en las laderas, debido a la exposición de éstas a la erosión. Los brezos, con un sistema radical superficial y poco desarrollado, no sobreviven al incendio y, por lo tanto, tienen que regenerarse exclusivamente por germinación de las semillas que, además, no es rápida, ya que se produce en la primavera siguiente al incendio. El matorral afectado por el incendio generalmente evoluciona hacia un tojal por desplazamiento de la competencia tojo-brezo a favor del tojo, el cual, por ser pirógeno a la vez que pirófito, resulta beneficiado por el fuego. Los incendios repetidos explicarían en parte la enorme extensión de los tojales en Galicia.

La diversidad de las comunidades aumenta rápidamente hasta alcanzar un pico a los 18 meses después del incendio y luego desciende hasta valores simi-

lares a los de la comunidad preexistente, estabilizándose a los 4 años. Según las características de la comunidad, el pico puede aparecer antes o retrasarse hasta el segundo o tercer año en comunidades más pobres o más áridas, pero el comportamiento es siempre el mismo. La composición específica es uno de los aspectos que sufre una mayor modificación durante la sucesión, debido sobre todo al efímero aumento de la riqueza en especies anuales.

La influencia de las limitaciones impuestas por el medio físico se manifiesta principalmente en la intensidad inicial de la regeneración, mientras que en el segundo y tercer año la regeneración viene determinada por las características específicas y estructurales de la comunidad que existía antes del incendio.

Aunque la sucesión secundaria descrita responde al modelo general de comportamiento de la regeneración de las comunidades de matorral, sin embargo, dependiendo del tipo de matorral, se presentan variaciones a este modelo, con diferencias, por ejemplo, en el comportamiento de las herbáceas, velocidad y porcentaje de cobertura, etc.

En los matorrales con predominio de papilionáceas, derivados en general de la degradación de bosques climácicos, con especies de los géneros *Ulex*, *Cytisus*, *Genista* y *Chamaespartum*, el grado de destrucción depende de la composición y de la distribución de la biomasa del ecosistema en el momento del incendio y de la intensidad de este. Estas comunidades son mantenidas por fuegos periódicos: en ausencia de incendios son recolonizadas por árboles, mientras que fuegos recurrentes causan la degradación de la vegetación y del suelo, aceleran la erosión, impiden la regeneración de especies leñosas y facilitan la instalación de una gran abundancia de herbáceas y arbustos poco exigentes. La recuperación a partir de rebrotes es cuantitativamente la más importante, lo que hace que unas pocas especies leñosas predominen en la comunidad, en tanto que las especies que recolonizan sólo por semillas se hacen menos dominantes después del incendio.

En cuanto a las especies arbóreas, utilizan también distintas estrategias regenerativas para sobrevivir después de sufrir un incendio.

Q. robur, la especie autóctona más extendida, aunque su presencia debería ser aumentada, presenta una resistencia natural al fuego, debido a que la estación seca coincide con su completa foliación y a que la densidad de la cubierta arbórea generalmente es baja; esta resistencia se acrecienta si conserva su sotobosque natural formado por especies de escasa naturaleza pirógena. El roble tiene un abundante banco de semillas, aunque de vida corta, y un extensivo banco de plántulas. Su estrategia de regeneración es por medio de rebrotes y por germinación de semillas de diferente tamaño, que con frecuencia son

atacadas por los insectos. No obstante, todas las semillas, incluso las atacadas por los insectos que sólo tienen un agujero, presentan porcentajes de germinación similares. En zonas incendiadas, *Q. robur* apenas aparece o no se encuentra en fase adulta, por lo cual su regeneración espontánea es difícil. La eficacia de la siembra sin preparación del terreno es buena, y alcanza el 19% seis meses después de la siembra.

Se considera que las especies del género *Pinus* tienen características pirófitas, con una combustibilidad muy alta que favorece la propagación del fuego e incrementa su intensidad. Los pinos que no se queman totalmente pueden quedar dañados en mayor o menor grado, del que va a depender su posibilidad de regeneración. Cuando la copa no resulta afectada o cuando el daño sólo afecta a sus ramas bajas, si además no se destruyen o alteran fuertemente los tejidos conductores y el cambium del tronco, la recuperación es rápida. A este respecto, *P. pinaster* ofrece una mayor resistencia que *P. radiata* y *P. sylvestris*. La mayoría de las especies del género *Pinus* no pueden rebrotar después del incendio, como ocurre con las especies mencionadas, que sólo se producen por semillas. El género *Pinus* tiene, además del banco de semillas del suelo, un banco de semillas aéreo, ya que las semillas permanecen almacenadas dentro de sus frutos en los árboles madre hasta que las condiciones son adecuadas para la diseminación y la germinación. Cuando se produce un incendio, las semillas que ya se habían desprendido de los frutos pueden ser destruidas por las llamas, de tal forma que sólo las semillas que permanecen dentro de sus frutos o enterradas en el suelo pueden utilizarse para la regeneración de la especie. Pocos días después del incendio, las piñas se abren lentamente y liberan las semillas. Este hecho responde a una estrategia que permite al pino esperar a que el incendio se extinga y la temperatura del suelo haya descendido a niveles que no dañen las semillas, evitando así que se quemen o pierdan viabilidad. *P. pinaster*, además de proteger con más eficacia sus yemas debido a la mayor longitud de sus acículas, no necesita temperaturas elevadas para que las piñas liberen las semillas (son suficientes las temperaturas del verano), mientras que *P. radiata* es más exigente y generalmente no se reproduce de forma espontánea en Galicia. La respuesta al calentamiento producido por el incendio es positivo en las tres especies, aunque es más favorable a *P. radiata*, pues debido a la maduración estacionalmente tardía de sus frutos, la dehiscencia de las piñas se produce raramente por sí misma.

El eucalipto (*E. globulus*) ofrece cierta resistencia al quemado, excepto sus ramas secas, las cortezas desprendidas y otros despojos. El elevado calentamiento que se produce durante los incendios causa también la dehiscencia y diseminación de las semillas, que a veces es espectacular en masas adultas en las que suelen coexistir, en un mismo pie, frutos de varios años sin diseminar.

La dehiscencia de todos estos frutos al mismo tiempo da lugar, en condiciones adecuadas del sotobosque, a una rápida germinación de las semillas y a una gran densidad de plántulas. Como, además, los eucaliptos quemados pueden rebrotar de cepa, la regeneración de estos árboles está garantizada, incluso después de incendios de alta intensidad. Por otra parte, es raro que el fuego alcance la altura media de las copas, originando sólo modificaciones, de tal forma que, aparentemente, no retarda su desarrollo.

Aunque de la naturaleza específica, altura y densidad de la cubierta arbórea dependen la intensidad y los efectos de los incendios sobre dicha cubierta, la composición, densidad y altura del sotobosque tienen una influencia decisiva sobre las características del fuego, produciéndose los incendios más devastadores cuando el sotobosque está constituido por matorral alto y denso. Esta situación es más frecuente en repoblaciones de pino y eucalipto, cuya introducción apenas modificó la composición del matorral (salvo por adaptabilidad de las especies al nuevo estrato arbóreo), al no venir estos árboles acompañados del cortejo de especies arbustivas y herbáceas asociados a ellos en su área natural de procedencia.

Las especies arbóreas autóctonas y foráneas más abundantes en Galicia y que más se usan en repoblación: *Q. robur*, *Q. pyrenaica*, *Betula pendula*, *P. pinaster*, *P. radiata*, *P. sylvestris* y *E. globulus*, probablemente no son pirófitas en el sentido estricto del término, ya que sus rasgos adaptativos al fuego no fueron desarrollados de forma exclusiva debido a este, sino debido al estrés producido por la sequía, herbivorismo u otras causas. Algunas de estas especies, sin embargo, muestran cierta propensión al fuego, es decir, se benefician de las condiciones creadas por él para expandirse. Según su estrategia regenerativa, o sea, según su capacidad para regenerarse después del incendio, *P. pinaster*, *P. radiata* y *P. sylvestris* son especies que lo hacen únicamente por medio de semillas y no pueden rebrotar, mientras que *Q. robur*, *Q. pyrenaica*, *B. pendula* y *E. globulus* pueden establecerse por medio de semillas, que generan plántulas, y por rebrotes. Las comunidades de *Quercus* evitan el fuego resistiendo por medio de bajas condiciones de combustibilidad; las comunidades de *Betula* se consideran tolerantes al fuego, resistiendo y sobreviviendo en condiciones más o menos adversas con respecto a su situación antes del incendio; las comunidades de *Pinus* facilitan el fuego, ya que éste es necesario para garantizar su supervivencia en la zona y, por último, las comunidades de *E. globulus* ocuparían una posición intermedia entre las comunidades que toleran el fuego y las que lo facilitan puesto que tiene rasgos de ambos grupos. No obstante, una población puede tener rasgos específicos de adaptación al fuego, pero su respuesta va a estar condicionada por el resto de la comunidad.

El fuego puede producir daños importantes en los árboles, los cuales pueden afectar a su tasa de crecimiento o hacerlos objeto de ataques de insectos o de hongos que son causa de su muerte a más largo plazo. En muchos casos, estos daños no son visibles ni evidentes hasta pasados muchos meses después del incendio, cuando no tienen posibilidades de sobrevivir y además se han convertido en focos de infección para otros árboles. Por esta razón se han utilizado diversos métodos físicos (conductividad eléctrica, por ejemplo) y bioquímicos (uso de marcadores taxonómicos o bioquímicos de estrés, como terpenos e iminoácidos) para conocer el estado fisiológico de los árboles dañados por el fuego y predecir su capacidad de supervivencia futura. Estos métodos se han aplicado sobre todo a *P. pinaster*, *P. radiata* y *E. globulus*.

3.3. Efecto de los incendios forestales sobre la fauna

La fauna también resulta afectada por los incendios. Numerosos animales mueren durante el incendio porque no consiguen huir del fuego y otros quedan heridos y mueren a lo largo del tiempo. Entre los que sobreviven, la mortalidad generalmente es también elevada debido a la falta de refugio y de alimentos. La alteración de su hábitat causa desequilibrios en la macrofauna de la zona. La meso y microfauna del suelo resultan particularmente afectadas, dependiendo el daño de la penetración del calentamiento en el suelo y de la intensidad del mismo. Por el contrario, especies que no pueden vivir en zonas cerradas del bosque pueden resultar temporalmente beneficiadas a corto y medio plazo después del incendio, en las primeras fases de la revegetación, durante las cuales las especies herbáceas y los rebrotes pueden servirles de alimento.

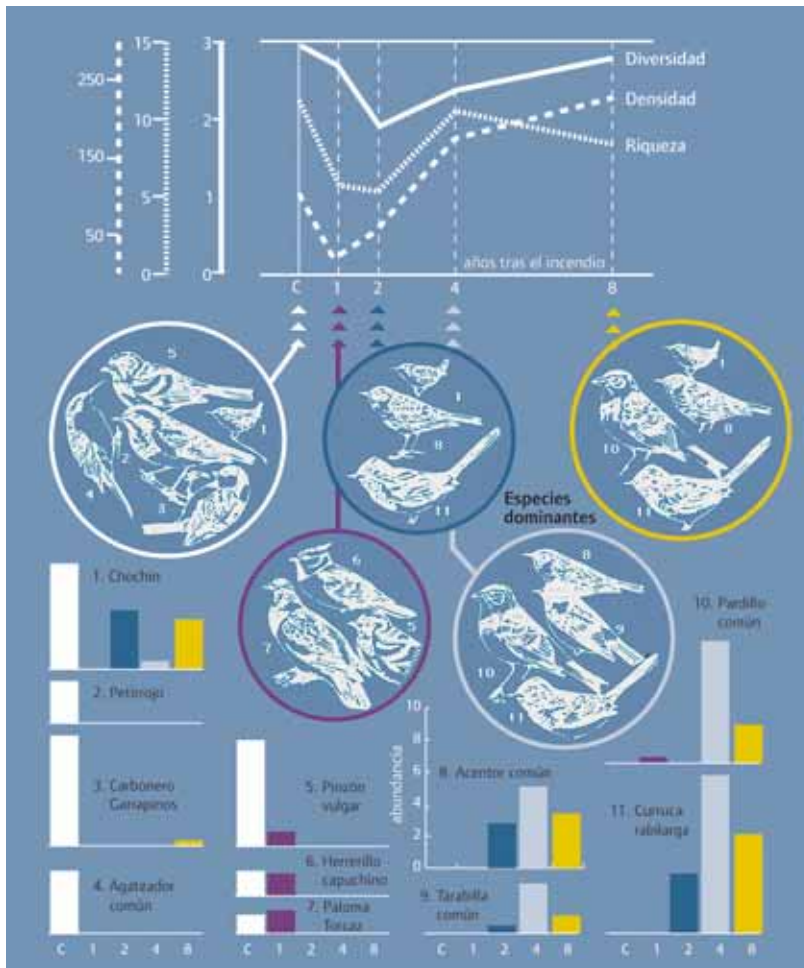
Lamentablemente, apenas existen estudios en Galicia sobre este importante impacto de los incendios. Es bien conocido, sin embargo, el problema que se causa a los jabalíes que, privados de su alimento en los montes incendiados que les servían, además, de refugio, se ven obligados a descender con frecuencia hasta las zonas de cultivo para alimentarse. No obstante, si bien para la caza mayor el efecto del fuego es negativo, a largo plazo los incendios parecen favorecer la caza menor.

En un estudio sobre la respuesta de las comunidades de aves (pájaros, palomas y otras) a incendios de pinares en Galicia, que evolucionan a matorrales de tojo y brezos por efecto del fuego, se indica que la diversidad de las aves disminuye mucho después del incendio y no se recupera incluso ocho años después del quemado, mientras que la densidad de pájaros, aunque también dis-

[Figura 5d]
Impacto de los incendios forestales sobre la fauna

minuye considerablemente tras el fuego, su valor a los ocho años es más del doble que en una zona similar no quemada. Algunas especies desaparecen y no aparecen ni a los ocho años, posiblemente debido a que son aves forestales (agateador común, reyezuelo sencillo, camachuelo común, arrendajo común, pico picapinos, petirrojo y paloma torcaz) y otras necesitan uno (escribano montesino), dos (chochín, acentor común y curruca rabilarga) o de cuatro a ocho años (curruca caprotada, carbonero garrapinos y mirlo común) para aparecer de nuevo. [figura 5d].

La recuperación parcial de la diversidad, así como el aumento de la densidad, tienen una estrecha relación con las distintas etapas de la regeneración del matorral, aunque la comunidad de aves observada ocho años después del incendio no es igual a la comunidad original. La composición específica de las aves, un año después del incendio, resulta ser la más parecida a la observada en la zona no afectada por el incendio, lo que se atribuye a que la fisonomía del bosque muerto tiene cierta semejanza con la del bosque vivo, con un alto porcentaje de suelo desnudo y presencia de árboles y arbustos, aunque en el área quemada árboles y arbustos están muertos. La misma similitud se observó entre los artrópodos terrestres y los insectos aéreos capturados en ambas zonas. Además de a la semejanza de la fisonomía, la presencia de aves poco tiempo después del incendio se debe a la abundancia, en este período, de ciertos insectos y vertebrados que se sienten atraídos por las áreas quemadas y también a la



Gráfica cedida por J. Guitián

centaje de suelo desnudo y presencia de árboles y arbustos, aunque en el área quemada árboles y arbustos están muertos. La misma similitud se observó entre los artrópodos terrestres y los insectos aéreos capturados en ambas zonas. Además de a la semejanza de la fisonomía, la presencia de aves poco tiempo después del incendio se debe a la abundancia, en este período, de ciertos insectos y vertebrados que se sienten atraídos por las áreas quemadas y también a la

abundancia de herbáceas y semillas durante este período de la sucesión secundaria. Estos recursos alimentarios son fáciles de localizar y de capturar por las aves debido al elevado porcentaje de suelo desnudo. Se señala, asimismo, la presencia abundante de diversas especies de coleópteros, isópodos y arácnidos en los refugios creados por el fuego en los árboles al separar la corteza de los troncos, constituyendo dichas especies reservas de alimento para diferentes especies de aves, principalmente arrendajos y picos picapinos. La similitud de fisonomía desaparece poco tiempo después del quemado, al ser retirados los pinos muertos, disminuyendo así la posibilidad de la zona para albergar aves.

Con un comportamiento completamente diferente se cita otra ave, la tarabilla común (*Saxicola torquata*), ausente de los pinares y eucaliptales no perturbados, con sotobosque de tojos principalmente, que aparece, en cambio, en zonas donde estas formaciones han sido barridas por el fuego. La densidad de estos pájaros está relacionada también con los procesos de regeneración de la vegetación. Comienzan a aparecer a los 14 meses después del incendio, coincidiendo con una importante cobertura del matorral; alcanzan una elevada densidad (37 aves ha⁻¹) a los 105 meses después del incendio, pero, a los 10 años, su densidad vuelve a descender como consecuencia del desarrollo del estrato arbóreo.

La destrucción del hábitat y la pérdida de los recursos alimentarios debido a los incendios forestales ha sido citado como un factor de amenaza de los quirópteros en España, aunque no existe ningún estudio sobre la situación de los murciélagos en Galicia con relación a dichos incendios.

Particularmente importante por sus repercusiones económicas es el caso de los insectos perforadores, que atacan comunidades arbóreas afectadas por los incendios, causándoles la muerte cuando no se detectan con suficiente tiempo. Recientemente se han localizado dos coleópteros de la familia de los escolítidos (*Xyleborinus saxeseni* y *Xyleborus dispar*) que aparecen en Galicia en formaciones de eucaliptos que han sufrido un incendio y atacan a los individuos debilitados por el fuego, aunque conserven cierto grado de vitalidad, en el primer caso, lo que es muy preocupante, porque estos árboles vivirían si no fueran atacados por este insecto, o a los eucaliptos muy dañados, en el segundo caso, por lo que esta especie resulta menos peligrosa que la anterior.

El daño que se causa a las abejas y sus colmenas es también relevante por el auge que ha experimentado en los últimos años el mercado de la miel. Además de los daños directos por la acción del fuego sobre abejas y colmenas, indirectamente se produce una disminución en la producción de miel debido a la destrucción del matorral, generalmente en el período de floración de muchas plantas, ya que su polen y néctar es utilizado por las abejas, y también por

las modificaciones que se producen en la composición específica de estos matorrales y el tiempo que tardan en regenerarse. Entre las especies melíferas destacan, por su importancia, las leguminosas, *Ulex* spp. y *Cytisus* spp., cuyo polen constituye el 13,4% del total, y las ericáceas (*Erica* spp., *Calluna vulgaris* y *Daboecia cantabrica*), cuyo polen es un 8% del total. Todas estas especies melíferas producen una miel de gran calidad. El tojo, *U. europaeus* en particular, da flores durante buena parte del año, por lo que es una de las plantas de mantenimiento del colmenar al ser buena productora de polen. Sin embargo, después de un incendio, tarda unos dos años en florecer de forma importante y los brezos tardan todavía más, por lo cual el daño que los incendios causan en las abejas y en la materia prima de la producción melífera tiene repercusiones considerables en la economía de los apicultores gallegos.

3.4. Efecto de los incendios forestales sobre la erosión y el ciclo hidrológico

La erosión del suelo, es decir, el desprendimiento, arrastre y deposición de sus materiales, es uno de los impactos más negativos para el medio ambiente que pueden desencadenar los incendios forestales, sobre todo los incontrolados de alta intensidad. En condiciones normales, la erosión es controlada por el potencial erosivo de la lluvia, que depende de su impacto directo sobre el suelo. Este impacto, a su vez, está en función de la intensidad de la lluvia y su capacidad para mover las partículas del suelo. Esto depende, básicamente, de la cantidad de lluvia que cae y no se infiltra. Otros factores son: la erosionabilidad del suelo, que depende de sus propiedades, de la cubierta vegetal y de la topografía. Después de un incendio hay que añadir otro importante factor, la intensidad del incendio, que controla la cubierta vegetal, la profundidad de la capa de cenizas y de la capa repelente al agua, y el impacto sobre la estructura del suelo. El efecto del fuego sobre la erosión está, por lo tanto, muy ligado al efecto sobre el ciclo hidrológico.

En una comunidad vegetal, las gotas de lluvia son interceptadas por la vegetación y entonces o bien caen sobre el suelo con menor energía o se evaporan desde la vegetación. La lluvia que alcanza el suelo es absorbida por la hojarasca hasta que se satura, lo que depende de la capacidad de retención de agua del terreno, que, a su vez, está estrechamente relacionada con su contenido en materia orgánica, el exceso de agua se infiltra, penetrando hasta los horizontes minerales del suelo. Una vez allí, parte es retenida por las partículas minerales o en los poros capilares finos, por tensión superficial, y otra parte

se infiltra hacia abajo (agua de infiltración) a través de los poros gruesos, y puede alcanzar la capa freática. Si la cantidad de agua que llega a la superficie es mayor que la cantidad que se infiltra, el exceso fluye por la superficie, bajo la fuerza de la gravedad, constituyendo la llamada agua de escorrentía. Por otra parte, el agua del suelo se pierde por evaporación desde la superficie y por la transpiración de las plantas, que la toman de las capas más profundas por medio de las raíces.

Los incendios forestales afectan a todos estos procesos del ciclo hidrológico. Cuando la cubierta vegetal es eliminada por el fuego, la intercepción, así como la transpiración, disminuyen, y la evaporación desde el suelo aumenta debido a que su superficie, desprovista de vegetación, queda expuesta a la insolación y al viento. Además, el ennegrecimiento de su superficie por culpa del fuego, contribuye a la evaporación porque hace incrementar la absorción de la radiación y, en consecuencia, la temperatura del suelo aumenta. Por otra parte, al quemarse la hojarasca, se reduce la capacidad de retención de agua del terreno.

Además de todos estos efectos, las gotas de lluvia, al golpear directamente contra la superficie desnuda del suelo, producen la disrupción física y dispersión de las partículas más finas, entre ellas las cenizas depositadas sobre su superficie durante el incendio. Estas partículas se infiltran y se introducen en los poros gruesos, obturándolos y reduciendo la porosidad. En consecuencia, la infiltración de agua se reduce, la escorrentía aumenta y también el arrastre de materiales, es decir, la erosión.

Otro factor que incrementa la erosión después de un incendio de alta intensidad es que a menudo se forma una capa repelente al agua, debido a compuestos hidrófobos producidos durante el quemado, que se localiza no en la superficie sino a cierta profundidad en el perfil del suelo. Esta capa, que constituye una verdadera barrera para el agua, disminuye también la infiltración y, por consiguiente, aumenta la escorrentía y la erosión del suelo situado por encima de esta capa hidrófoba.

Los sedimentos y el agua infiltrada o que fluye desde las zonas quemadas, que van cargados de nutrientes disueltos de la capa de cenizas, pueden causar varios problemas, entre ellos el relleno o colmatación de embalses, cunetas, etc., y también pueden contribuir a la eutrofización de las aguas o al crecimiento anormal de algas. Por otro lado, es posible que hagan aumentar la temperatura del agua, que puede alterar el hábitat de muchos organismos que viven en las corrientes fluviales o marinas, incluyendo los peces y sus fuentes alimentarias.

Galicia, a pesar del extraordinariamente alto potencial erosivo de las lluvias, debido a la presencia de una densa cubierta vegetal, era considerada como una zona con un bajo riesgo de erosión, estimándose ésta en 0,8-1,6 t

ha⁻¹ año⁻¹, lo que refleja una relativamente buena protección de los suelos por sus bosques y matorrales. La destrucción de la cubierta vegetal por los incendios forestales ha aumentado el riesgo de erosión, que será mayor cuanto mayor sea la intensidad del incendio. En un estudio pionero sobre este tema, realizado en 1982, se estima la pérdida de suelo de 16 zonas afectadas por incendios de diferente intensidad en valores que oscilan entre 15 y 170 t ha⁻¹ año⁻¹, con un valor medio de 56 t ha⁻¹ año⁻¹. Estudios más recientes evalúan la pérdida de suelo, en terrenos con diferente tipo de vegetación afectados por incendios de alta intensidad, en un rango de 13 a 56 t ha⁻¹ el primer año después del quemado, mientras que en incendios de baja o moderada intensidad los valores descienden a 1,5-5 t ha⁻¹ el primer año después del quemado. Como caso extremo se cita la erosión producida por una lluvia torrencial, de menos de una hora, causada por una tormenta local, que produjo una escorrentía de 22,6 m³/s.⁻¹ y una velocidad media de la corriente de 0,89 m/s.⁻¹, en una parcela con una pendiente media del 18,8% que había sido afectada por un incendio un mes antes de la tormenta y que hizo desaparecer la vegetación de matorral de tojos y brezos; la erosión, estimada en 30 t ha⁻¹, produjo cárcavas de tamaño pequeño o medio (10-15 cm de profundidad) y también grandes, por canalización del agua por caminos y cortafuegos, que, en algunos casos, en la zona de desagüe, alcanzaron más de 1 m de profundidad, observándose también acumulaciones de sedimentos, de más de 50 cm de altura, en zonas donde diversos obstáculos frenaron la velocidad del flujo de agua, así como zonas de sedimentación de gravas y piedras.

Aunque los métodos utilizados para evaluar la pérdida de suelo proporcionan valores por exceso o por defecto, si se tienen en cuenta las recomendaciones del Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU., que estiman el límite de erosión tolerable en 11 t ha⁻¹ año⁻¹, y en 30 t ha⁻¹ año⁻¹ el límite a partir del que es necesario tomar medidas preventivas y de conservación del suelo, y consideran la pérdida de suelo de 100 t ha⁻¹ año⁻¹ como erosión grave, es indudable que los incendios en Galicia han desencadenado uno de sus efectos más adversos.

La erosión postincendio [figura 5b] se desarrolla de una forma muy rápida, ya que, en general, el 80% de ella se produce entre tres y cuatro meses después del incendio, decayendo exponencialmente la intensidad del proceso que, además, no suele mantenerse más allá de uno o dos años, aunque esto depende de diversos factores, principalmente del proceso de revegetación, que restaura la cubierta vegetal y favorece la recuperación de las propiedades del suelo quemado. El contenido en agua del suelo antes del incendio influye en el proceso de erosión, siendo mayor la pérdida de suelo, para incendios de igual intensidad, en suelos con menor porcentaje de humedad.

En los suelos afectados por incendios en Galicia, la desaparición de la cubierta vegetal, la disminución de la intercepción de la lluvia, la pérdida de estructura y el deterioro de otras de sus propiedades físicas el aumento de la hidrofobia y del agua de escorrentía superficial son causas directas de una mayor erosión.

La cubierta vegetal actúa contra ella, como se indicó anteriormente, amortiguando el choque de las gotas de lluvia contra el suelo; pero también disminuye la velocidad de las aguas de escorrentía, frente a las cuales las plántulas emergentes y las plantas desarrolladas actúan como obstáculos o barrera; por último, favorece la infiltración, promoviendo la formación de macroporos. En estudios sobre suelos gallegos se demostró que existe una correlación negativa entre el grado de cobertura y el riesgo de erosión. Asimismo, en aquellos afectados por incendios forestales, revegetados por siembra de especies herbáceas, se demostró que existe una relación exponencial entre la erosión y la cubierta vegetal y que, de acuerdo con esta relación, cuando la cobertura es del 50 al 60%, la erosión es prácticamente inexistente, ya que se reduce más del 90%. Esto indica que la disminución de la erosión se debe más a la disminución de la velocidad de la escorrentía, y no al volumen de la escorrentía, que al efecto de pantalla, frente a la lluvia, de la cubierta vegetal. En suelos sin revegetar, la pérdida de suelo es hasta tres veces mayor que en los revegetados y los sedimentos arrastran una gran cantidad de arcilla y de nutrientes en forma particulada, siguiendo éstos la secuencia: $Ca > Mg > K > Na$. En los suelos quemados revegetados, el incremento del recubrimiento herbáceo hace predominar los procesos de sedimentación sobre los procesos erosivos. La vegetación actúa como un filtro verde que retiene la arcilla y los nutrientes y evita la disminución de la fertilidad.

La intercepción de la lluvia en distintas comunidades vegetales no perturbadas por el fuego alcanza valores del 29% de la precipitación en pinares, del 29-45% en bosques de frondosas y del 40-70% en matorrales densos de tojos y brezos. Cuando estas comunidades son afectadas por incendios, la intercepción desciende en pinares al 21% de la precipitación en fuegos que producen sólo el chamuscado de copas, al 14% en pinares afectados por fuego de copas y se reduce hasta cuatro veces en matorral muy denso de tojos. La recuperación de la intercepción va unida a la restauración de la cubierta vegetal.

El calentamiento del suelo puede mejorar de forma efímera la estructura a temperaturas menores de 200 °C pero, en general, se produce un proceso de degradación que aumenta hasta 450 °C, temperatura a la cual se estabiliza. Este proceso de degradación, que comprende la pérdida de agua por evaporación y un proceso de ruptura seca después del calentamiento a 170-460 °C, se debe

sin duda a la combustión de la materia orgánica del suelo, principal agente cementante en los agregados de los suelos gallegos.

En Galicia, la hidrofobia que se produce en suelos quemados puede originar una escorrentía del 20% de la primera precipitación postincendio, y se reduce al 5-10% en los meses siguientes, aunque el efecto de la formación de la capa hidrófoba puede perdurar hasta cinco años después del quemado.

En cuanto a la escorrentía, en suelos no perturbados varía, lógicamente, en función de diversos factores, por lo cual es difícil establecer un valor medio absoluto; sin embargo, es fácil demostrar que el flujo de agua superficial aumenta después del incendio. Así, en formaciones de pinos con matorral afectados por incendios se citan aumentos de la escorrentía entre 1,6 y 2,0 veces con respecto al suelo no perturbado, en incendios de diferente intensidad, durante el primer año después del incendio, y desciende a 1,4 veces dos años después. Asimismo, en pinares de *P. pinaster* afectados por incendios el valor de la escorrentía medida aumenta entre 11 y 15 veces en incendios de intensidad moderada durante el primer año después del incendio y unas 4,5 veces el segundo año; en incendios de alta intensidad, la escorrentía es entre 20 y 35 veces mayor que la que se produce en el suelo no perturbado el primer año después del incendio y todavía es 3,7 veces mayor a los cuatro años. El valor de la escorrentía varía entre el 5 y el 20% de la precipitación en función de la intensidad de la lluvia y también de la hidrofobia del suelo quemado.

Es posible que el agua de escorrentía contenga partículas finas del suelo (la concentración de arcilla en suspensión puede ser hasta 80 veces mayor que la encontrada en la escorrentía de suelos no quemados) y elementos solubles con un orden de abundancia que varía en el sentido $C > Na > K > Mg > N > Ca > P$, y cuya concentración es mayor que la del suelo quemado del que proceden. Esta pérdida de elementos solubles se produce, sobre todo, el primer mes después del incendio y tiene una gran importancia por dos causas: por un lado, va a influir negativamente sobre la revegetación, puesto que se exportan del suelo los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas; por otro lado, las aguas de escorrentía cargadas de nutrientes pueden causar la eutrofización de las cuencas que las reciban, principalmente por su contenido en N y P (que puede aumentar su concentración en las aguas de escorrentía hasta cinco veces por efecto del quemado), e incrementar la demanda biológica de oxígeno debido al contenido de C (materia orgánica) que aportan. Finalmente, el contenido de partículas en suspensión puede originar la turbidez del agua y todo ello va a influir sobre la calidad de los sistemas acuáticos. Se estima que las aguas vuelven a sus valores normales en un período de entre seis meses y tres años.

Por otra parte, en los sedimentos arrastrados durante el proceso de erosión abundan preferentemente las partículas finas del suelo: arcilla, limo e incluso arena fina, por lo cual los suelos quemados afectados por la erosión adquieren texturas más gruesas. También contienen los sedimentos, en mayor proporción que la superficie del suelo quemado, materia orgánica, nutrientes (excepto K), y un pH más elevado. Con el tiempo, su textura se hace más gruesa. El arrastre de sedimentos procedentes de las zonas quemadas puede causar los mismos efectos que las aguas de escorrentía pero acentuados, porque las pérdidas de nutrientes en forma particulada son más importantes, si bien es cierto que su movilidad es menor. El depósito de estos sedimentos, además de producir la colmatación de cauces, embalses, etc., origina la acumulación progresiva, en forma particulada, de materia orgánica, P (que puede aumentar de dos a 11 veces) y otros elementos contaminantes que se irán liberando también de forma progresiva.

Se ha demostrado que los restos chamuscados que caen de los árboles (hojas, ramas pequeñas, etc.), así como otros restos muertos de tamaño apreciable, actúan como obstáculos que frenan el flujo de agua superficial y de sedimentos, y los disminuyen hasta cinco veces con respecto a los que se producen en suelos desprovistos de obstáculos, lo que indica que es contraproducente la limpieza y saca de restos de los incendios, particularmente la saca de madera quemada, inmediatamente o a corto plazo después del incendio. La revegetación natural o artificial, es decir, la reconstitución de la cubierta vegetal es el mejor medio de frenar la erosión postincendio.

3.5. Efecto de los incendios forestales sobre el suelo

El efecto de los incendios sobre el suelo depende básicamente de la intensidad y duración del quemado, pero también del tipo de suelo, contenido de humedad y período e intensidad de la lluvia que cae después del fuego. Con respecto a la intensidad del incendio, en general se admite que los incendios prescritos de baja intensidad, a corto plazo aumentan el rendimiento del bosque, mientras que los incendios incontrolados pueden destruir la productividad de la zona, influyendo, por lo tanto, en la producción de fibras y alimentos. Sin embargo, los efectos de los incendios de baja y moderada intensidad serán diferentes de los efectos de los de alta intensidad. En cualquier caso, la degradación del suelo puede ser completamente irreversible si los agentes erosivos, que actúan en zonas montañosas, causan la erosión de los horizontes orgánicos superficiales, e incluso, de los horizontes minerales y dejan la roca al



Foto cedida por A. Cabaneiro

[Figura 5e]
Impacto de los incendios
forestales sobre el suelo

descubierto. En casos más favorables, los incendios pueden producir importantes modificaciones en las propiedades del suelo, que pueden originar una disminución de la fertilidad física, química y biológica del suelo, dependiendo la recuperación de las áreas quemadas de la velocidad a la cual esta fertilidad, que es la base para la regeneración de las plantas, se recobre.

En Galicia, el estudio del efecto de los incendios forestales sobre el suelo [figura 5e], tanto inmediatamente como a corto, medio y largo plazo después del incendio, ha sido objeto de interesantes investigaciones, cuyos resultados se exponen a continuación.

Los incendios alteran el ciclo biológico de los nutrientes; su efecto principal es la velocidad a la cual los nutrientes son liberados. En un bosque, por ejemplo, los elementos minerales retenidos en la hojarasca y en la materia orgánica del suelo son liberados mediante procesos de descomposición y de mineralización de los componentes orgánicos por la mesofauna y la microbiota del suelo. Los elementos liberados pasan a las posiciones de cambio del complejo absor-

bente del suelo y a la solución del suelo, de donde son captados por las raíces de las plantas, volviendo de nuevo al suelo cuando los restos vegetales caen sobre su superficie formando la hojarasca. Este es, muy simplificado, el ciclo biológico de los nutrientes. Durante los procesos de mineralización biológica, la liberación de los nutrientes en forma asimilable por las plantas es lenta pero equilibrada y la mayoría de éstos son absorbidos por ellas. Durante el quemado, los nutrientes son liberados muy rápidamente y se concentran en la capa de cenizas, pero la mayoría de ellos se pierden, bien por volatilización durante el quemado, bien por lavado por las aguas de infiltración que los alejan de la zona radicular, arrastrados por el agua de escorrentía o con las cenizas en las corrientes de convección, o simplemente se pierden porque la regeneración de la planta no es suficientemente rápida para que todos los nutrientes liberados puedan ser absorbidos.

Los incendios pueden causar la destrucción total de la materia orgánica del suelo si son de gran intensidad o si el contenido en materia orgánica es bajo. En otros casos, generalmente se observa una disminución del contenido en carbono en las capas superficial y subsuperficial después del quemado, en función de la intensidad del incendio. Aunque también se han observado incrementos de materia orgánica debido a la deposición de restos vegetales parcialmente quemados. En suelos quemados en el laboratorio, se observa que las pérdidas de materia orgánica son inapreciables a 150 °C y totales a 490 °C; a 220 y 350 °C, alcanzada y sobrepasada la temperatura de ignición, respectivamente, (que en suelos ácidos gallegos ha sido estimada en 230-240 °C) las pérdidas son considerables, oscilando entre el 37 y el 46%, en el primer caso, y alcanzando el 90% en el segundo. Estas pérdidas están de acuerdo con los termogramas de combustión de los mismos suelos que, básicamente, presentan un pico endotérmico entre 50 y 150 °C (correspondiente a la deshidratación del material y a la pérdida de sustancias volátiles) y un gran pico exotérmico entre 180 y 550 °C (que corresponde a la combustión total de la materia orgánica del suelo). La recuperación de la materia orgánica, que suele producirse a los dos años después del incendio, depende de la restauración de la vegetación, aunque también pueden observarse incrementos durante el primer año después del incendio, procedente de restos vegetales no quemados, tales como raíces muertas que se desintegran y se incorporan poco a poco al suelo.

El fuego afecta a todos los componentes de la materia orgánica, aunque no de la misma forma y con la misma intensidad. El grupo de la celulosa y de las hemicelulosas es el más afectado, perdiéndose entre el 70 y el 80% en incendios de alta intensidad; le siguen los compuestos hidrosolubles, entre los que se encuentran los azúcares (más simples), con pérdidas del 45 al 55%, la lig-

nina, que representa el componente orgánico mayoritario, con el 46% de pérdida, y los lípidos con el 25%. La distribución porcentual muestra que la celulosa, las hemicelulosas y los compuestos hidrosolubles son los más afectados por los incendios, mientras que los lípidos apenas resultan y que la proporción relativa de la lignina aumenta después del incendio. Comparando estos datos con suelos quemados en el laboratorio a 220 y 350 °C, se observa que la situación indicada es similar a la del suelo quemado a 220 °C; en el suelo que alcanzó la temperatura de 350 °C (cuando sólo permanece el 10% de la materia orgánica) todas las fracciones disminuyen considerablemente, excepto los lípidos, aunque en proporción relativa la lignina sigue siendo el componente mayoritario, disminuyendo menos de la mitad, mientras que la celulosa se reduce a un 20% del valor inicial. Desde el punto de vista de la humificación, la fracción más afectada es la materia orgánica no humificada, por lo cual el grado de humificación crece mucho después de los incendios. Se produce también un gran aumento de la fracción más humificada (pero también la más recalcitrante al ataque microbiano), la humina, que resulta la fracción predominante, sobre todo en suelos que alcanzan la temperatura de 350 °C, en los que sólo permanece esta fracción, en detrimento de las demás fracciones humificadas, los ácidos fúlvicos y los ácidos húmicos. De estos hechos se deduce que el fuego disminuye la fracción de la materia orgánica más fácilmente degradable por los microorganismos y deja las más resistentes al ataque microbiano, lo que produce una materia orgánica mucho más estable. Esto va a repercutir sobre la tasa de mineralización de la materia orgánica, que será más lenta; también se ralentizará la liberación de nutrientes. Por otra parte, la desaparición de azúcares y otras sustancias lábiles tiene un efecto negativo sobre la recuperación de los suelos quemados y la regeneración de las plantas debido a que estas sustancias son fuente de energía para los microorganismos. A largo plazo (cinco o diez años después del quemado), los componentes fundamentales de la materia orgánica son similares a los de los correspondientes suelos no perturbados por el fuego.

La reducción o destrucción de materia orgánica y la deposición de cenizas tienen consecuencias directas sobre otras propiedades del suelo. Así, la pérdida de materia orgánica disminuye la capacidad de retención de agua de las capas superficiales del suelo hasta el 40% de los valores originales, que sólo se recuperan entre cinco y diez años después del incendio. Esta disminución puede afectar a la revegetación del suelo. Los incendios disminuyen su estructura, sobre todo en los suelos arenosos en los que la materia orgánica es el principal cemento de los agregados; asimismo, la estabilidad al agua de los agregados menores de 0,25 mm disminuyen entre el 70 y el 50% respecto a los va-

lores en el correspondiente suelo no quemado. La textura, en general, no suele resultar afectada de forma directa por los incendios de forma significativa.

El pH y la conductividad eléctrica (que indica indirectamente el contenido en sales) de los suelos quemados, por lo general, crecen como consecuencia de la reducción de ácidos orgánicos y de la acumulación de cenizas, ricas en óxidos y en carbonatos de iones básicos. En los suelos ácidos de Galicia el pH no suele aumentar mucho debido al elevado poder de amortiguación de estos suelos, que suelen tener un alto contenido en materia orgánica, incluso después del incendio, aunque se han citado incrementos de más de cinco unidades de pH en suelos con bajo contenido en materia orgánica. Dependiendo de la lluvia que caiga después del incendio, los altos valores de estos parámetros pueden persistir o disminuir, debido al lavado de cationes, particularmente en la capa superficial. La recuperación de la materia orgánica también disminuye el incremento del pH.

La capacidad de intercambio catiónico desciende después de los incendios debido a la pérdida de materia orgánica, que suministra posiciones de cambio; el H^+ de cambio disminuye por la misma razón y como, en general, los cationes de cambio aumentan, debido a la acumulación de cationes básicos en las cenizas, el porcentaje de saturación del suelo asciende, sobre todo en los suelos ácidos. Estos efectos pueden ser observados inmediatamente después del incendio y, por lo general, persisten por un tiempo más o menos largo dependiendo del contenido de materia orgánica del suelo quemado y de la incorporación de nueva materia orgánica. En diversos suelos ácidos de Galicia la recuperación de los valores del H^+ de cambio anteriores al incendio ocurre entre cinco y diez años después del quemado.

Los efectos del fuego sobre el nitrógeno del suelo revisten especial importancia por ser éste uno de los principales nutrientes para las plantas y microorganismos. El N total puede ser parcial o totalmente volatilizado a $200^{\circ}C$, pero por lo regular disminuye después del incendio, en función de su intensidad, aunque también puede aumentar debido a la deposición de material no completamente incinerado. Todas estas situaciones han sido citadas en suelos de Galicia afectados por incendios, en los que se ha observado una recuperación de los valores anteriores al incendio dos años después del quemado. El N inorgánico siempre sube después de los incendios como consecuencia de la oxidación del N orgánico; el aumento puede ser en forma amoniacal o nítrica, según el tipo de suelo, aunque, en general, predomina el N amoniacal, como ocurre normalmente en los suelos ácidos gallegos. Incluso diez años después del incendio este efecto puede persistir, aunque las diferencias entre el suelo no perturbado y el suelo quemado se reducen. Este N inorgánico puede ser

tomado por las plantas que colonizan el suelo quemado después del incendio o desaparecer del horizonte superficial por lavado por la lluvia, particularmente en forma de nitratos, pudiendo redistribuirse en el perfil o llegar a la capa freática y causar su eutrofización. En suelos quemados en el laboratorio se observa que el N total decrece apreciablemente sólo a 350 °C, mientras que el N inorgánico aumenta ya a 150 °C e, igual que en los suelos estudiados en condiciones naturales, predomina el N amoniacal.

Las formas orgánicas de N, que constituyen importantes reservas de N en el suelo, resultan muy afectadas por los incendios, pero, igual que ocurría con el C, el fuego afecta de manera distinta a las diferentes formas orgánicas, disminuyendo en gran proporción los aminoácidos y el N hidrolizable no identificado y, en menor medida, los aminoazúcares, mientras que el N amídico y, sobre todo, el N amoniacal, procedente de la desaminación de compuestos orgánicos, suben. Igual que en el caso del C, el N residual, que es el N más resistente al ataque microbiano, es mucho mayor en los suelos quemados; este aumento depende de la intensidad del incendio. Igual se observa en suelos quemados en el laboratorio, sobre todo a 350 y 490 °C. Esto predice que la mineralización del N orgánico será más difícil después de un incendio y que la habilidad del suelo para suministrar N inorgánico a las plantas desciende después del incendio. Este efecto persiste durante dos años después del incendio pero cinco o diez años después ya no se detecta.

En incendios simulados de baja, moderada y alta intensidad, se demostró que el calentamiento del suelo modifica el contenido de C y N lábiles, dependiendo las modificaciones de la temperatura alcanzada por el suelo y, para algunas temperaturas, de la duración del quemado. El calentamiento del suelo a 160 °C aumenta el C y el N lábiles y este efecto crece con el tiempo de calentamiento, a 350 °C el C lábil se incrementa mientras que el N lábil baja, variando esta disminución en función del tiempo de calentamiento; por último, el calentamiento del suelo a 600 °C origina la desaparición tanto del C como del N lábiles, independientemente del tiempo de exposición al calor. Estos efectos son muy importantes, ya que tanto el C como el N soluble son fuentes de energía y nutrientes, respectivamente, para microorganismos y plantas e influye en la regeneración de ambos organismos en los suelos afectados por incendios.

El fósforo, otro importante nutriente para las plantas, también resulta alterado según la intensidad del incendio. El P total puede disminuir o, como en los casos estudiados en Galicia, no resultar afectado. En incendios prescritos o controlados, donde la temperatura del suelo no alcanza los 50 °C, los efectos sobre el ciclo del P son muy ligeros. En incendios de moderada o alta intensidad, el fuego tiene un fuerte efecto mineralizador sobre el P orgánico, que dis-

minuye mucho o incluso puede desaparecer después del incendio; paralelamente, se produce un aumento del P inorgánico, que no sólo corresponde al P orgánico mineralizado, sino también a la mineralización de formas de P residual, lo que conduce a profundos cambios en la distribución de las formas de P. A lo largo del tiempo se produce una progresiva acumulación del P orgánico que, al cabo de dos años, puede recuperar los valores normales de los suelos análogos no afectados por el fuego.

La microbiota, que es el principal agente responsable de la descomposición de la materia orgánica y de otros importantes procesos necesarios para la regeneración del suelo y de la vegetación, resulta particularmente afectada, no sólo por el incendio, que puede esterilizar la superficie del suelo, sino también por la deposición de cenizas. El efecto inmediato es una fuerte disminución de la densidad y biomasa microbianas que pueden alcanzar niveles indetectables. Sin embargo, microorganismos que se encuentran en el agua, en el aire o en el suelo no quemado recolonizan los suelos quemados muy poco tiempo después de los incendios; no obstante, la recuperación de la microbiota y de su actividad depende no sólo de la propia población microbiana, sino también del sustrato y, por consiguiente, de las modificaciones inducidas por el fuego sobre el mismo. En general, todos los cambios inducidos por el fuego sobre el suelo: aumento del pH, del grado de saturación, del contenido en nutrientes y de su temperatura, favorecen la recuperación de la población microbiana y de su actividad, poco tiempo después del incendio, si la humedad del suelo es suficiente. Después de la recuperación, la población microbiana total aumenta y se observa que el incendio no altera la distribución normal de los grupos microbianos taxonómicos y fisiológicos, y así las bacterias predominan claramente sobre los demás grupos, seguidas por los hongos y éstos, por las algas, cuya densidad es mucho menor. Entre las bacterias existe un gran número de aerobias heterotróficas, la mayoría de las cuales son acidófilas y formadoras de esporas, mientras que la densidad de autotróficas (cianobacterias) es baja. Por otra parte, una gran proporción de la microbiota posee capacidad amonificante y amilolítica, mientras que sólo una pequeña proporción de los microorganismos tiene capacidad celulolítica y los niveles de nitrificantes son muy bajos; por el contrario, en los suelos quemados se produce un buen desarrollo de los microorganismos mineralizadores del azufre orgánico, así como de los sulfatorreductores. Las condiciones del suelo quemado favorecen el crecimiento de las bacterias, mientras que la densidad de los hongos y de los microorganismos fotoautotróficos, tales como cianobacterias y algas, disminuyen en gran proporción. Con el tiempo, la población microbiana tiende a alcanzar sus niveles normales, pero la velocidad de recuperación no es igual para todos los microorganismos. Un año

después del incendio no se observa el efecto del quemado sobre las bacterias aerobias y aumentan significativamente los microorganismos fotoautotróficos (cianobacterias y algas), mientras que la recuperación de los hongos es muy lenta. Por otro lado, los microorganismos amonificantes resultan ser los más favorecidos por el quemado, en total contraste con los celulolíticos y los nitrificantes, mientras que los amilolíticos, que aumentan mucho a corto plazo, disminuyen un año después del incendio. En términos generales, los microorganismos mineralizadores de las sustancias nitrogenadas resultan más favorecidos por el incendio que los mineralizadores de los compuestos de carbono.

El fuego reduce la densidad de propágulos viables de los hongos vesículo-arbusculares y la colonización postincendio de la vegetación herbácea por estos hongos es menor que en suelos no quemados. En general, después de los incendios, disminuye el porcentaje de germinación de las esporas de diversas especies de este tipo de hongos presentes en el suelo antes del incendio. Se ha demostrado que determinadas sustancias hidrosolubles, producidas durante los incendios, inhiben la germinación de las esporas, la actividad micelial del propágulo y la colonización de las raíces por los hongos micorrícicos vesículo-arbusculares.

En contraste con la rápida recuperación de la población microbiana, la biomasa microbiana, que se reduce drásticamente después del incendio, no se recupera incluso dos años después, lo que sin duda se debe a la lentitud con la que se recuperan los hongos, que contribuyen más a la biomasa que las bacterias. La velocidad de recuperación de la microbiota y de su biomasa no sólo depende de la humedad, sino que es inversamente proporcional a la temperatura de calentamiento del suelo, lo que indica que depende de la intensidad del quemado. Suelos calentados a 160 °C resultan ya esterilizados y la biomasa no puede ser detectada, lo mismo que en los quemados a 350 y 600 °C. Cuando estos suelos se reinoculan con suelo no quemado, tanto el número de microorganismos viables como su biomasa son detectados en los suelos calentados a 160 °C y 350 °C, aunque la recuperación es relativamente rápida en el primer caso y lenta en el segundo, pero no se pueden detectar en el suelo quemado a 600 °C.

La actividad biológica del suelo se debe a la actividad metabólica de sus organismos, principalmente microorganismos, y a la actividad de los enzimas. Aunque los enzimas del suelo pueden proceder de las raíces de las plantas, de animales y de los microorganismos, se cree que estos últimos son la principal fuente de estas sustancias; por consiguiente, la producción de enzimas depende estrechamente del desarrollo de la microbiota. El fuego afectará a la actividad microbiana a través de su influencia sobre la microbiota y lo mismo ocurre con

la actividad enzimática. Por otra parte, debido a su naturaleza proteínica, los enzimas pueden ser parcialmente inactivados a 60-70 °C y ser por completo inactivados, a 180 °C.

La actividad biológica global de los suelos quemados aumenta fuertemente tres meses después del incendio, lo que se debe a la recuperación de la microbiota y al aumento temporal de compuestos orgánicos lábiles y de nutrientes asimilables inducido por el fuego; recupera los valores del suelo no quemado entre cinco y diez años después del quemado.

La actividad metabólica de los microorganismos, como ya se indicó, depende no sólo de la composición de la microbiota, sino también de las modificaciones inducidas en el substrato por el incendio. La capacidad mineralizadora del C y, por lo tanto, su tasa de mineralización, que aumenta inmediatamente después del quemado debido al efímero aumento de materia orgánica lábil, disminuye con el tiempo, durante dos años, al agotarse estas sustancias lábiles y quedar las más recalcitrantes al ataque microbiano, con el consiguiente retardo en la liberación de nutrientes. Este comportamiento sólo cambia cuando se produce la revegetación, que suministra de nuevo compuestos orgánicos lábiles a los microorganismos, lo que puede producirse a partir de dos años después del incendio (aunque todavía las reservas de C lábil son menores que las del suelo no quemado); pero la recuperación de los índices de mineralización puede tardar hasta cinco o diez años después del quemado, cuando las reservas de C lábil recobran los valores del suelo no perturbado. La capacidad mineralizadora del N también aumenta inmediatamente después del incendio, aunque la acción del fuego no modifica el comportamiento del proceso de mineralización, ya que, en general, igual que en suelos análogos no quemados, la amonificación predomina de forma clara sobre la nitrificación. Igual que en el caso del C, la tasa de mineralización del N disminuye luego continuamente, como consecuencia del agotamiento de las sustancias lábiles, iniciándose su recuperación a partir de dos años después del incendio, cuando se produce la revegetación, que proporciona sustancias lábiles de nuevo. Esta Recuperación, en la mayoría de los suelos, se alcanza entre cinco y diez años después del quemado.

Las actividades enzimáticas resultan muy afectadas por los incendios y así, un mes después de incendios de moderada o alta intensidad, los enzimas: CM-celulasa, quitinasa y B-D-glucosidasa, del ciclo del C, proteasa y ureasa, del ciclo del N y fosfomonoesterasa y fosfodiesterasa, del ciclo del P, presentan actividades muy reducidas con respecto a los valores de los suelos no afectados, mientras que la actividad de la arilsulfatasa, del ciclo del S, no se detecta. Estas actividades se recuperan muy lentamente, de tal forma que dos años después

del quemado no alcanzan los valores del suelo no perturbado, en tanto que entre cinco y diez años después del incendio se acercan o sobrepasan (enzimas del ciclo del P) los valores que tenía el suelo antes del incendio.

Para evaluar el impacto de los incendios forestales sobre el suelo es importante conocer la temperatura máxima que éste alcanza durante el incendio, ya que este parámetro está estrechamente relacionado con los efectos del quemado sobre el suelo. Incluso en los incendios prescritos o controlados es difícil medir este parámetro, para lo cual se usan diversos tipos de termopares que no producen resultados muy precisos. Para conocer la temperatura máxima en incendios incontrolados, *a posteriori*, se han utilizado en Galicia diversos métodos. Uno de ellos hace una estimación de la misma en función de los cambios producidos en la distribución del P entre las diferentes fracciones orgánicas e inorgánicas del suelo, así como en función de la reducción de la actividad fosfatásica. El otro método, mucho más preciso, se basa en las medidas del calor de combustión y de la temperatura de ignición de la materia orgánica del suelo, de la pérdida de masa del suelo al aumentar la temperatura o de la variación de la capacidad calorífica con la temperatura de calentamiento. Las medidas se realizan usando la calorimetría diferencial de barrido o bien balanzas termogravimétricas.

3.6. Recuperación de los suelos afectados por incendios forestales

De los efectos que los incendios forestales, sobre todo los incontrolados, causan en el suelo, se deduce que el proceso de recuperación de los suelos quemados ha de iniciarse inmediatamente o a corto plazo para evitar sobre todo la erosión postincendio producida por las lluvias particularmente si son torrenciales.

Teniendo en cuenta que los incendios destruyen la cubierta vegetal y la estructura del suelo y que la falta de vegetación y de estructura favorecen la erosión, las primeras medidas han de ir orientadas hacia la recuperación de la cubierta vegetal, la fijación de la capa de cenizas y la retención de sus nutrientes, la mejora de la estructura del suelo y la regeneración de la microbiota del suelo y de su actividad.

En Galicia, para la recuperación de los suelos afectados por incendios se han ensayado y propuesto los siguientes métodos: aceleración de la revegetación mediante la implantación de una cubierta vegetal herbácea, acompañada o no de la adición de residuos orgánicos, y mejora de las propiedades del suelo mediante la inoculación de microorganismos.

La instalación de una vegetación herbácea acompañada de la adición de residuos orgánicos es una técnica de manejo de los suelos quemados extraordinariamente eficaz. Después de ensayar numerosas plantas herbáceas anuales y perennes, se propone la siembra a voleo, sin preparación alguna del terreno, de una mezcla de dos leguminosas perennes (*Trifolium repens* y *Lotus corniculatus*) y una gramínea (*Lolium perenne*), debido a que esta mezcla produce los mejores porcentajes de fitomasa aérea y radicular, y a que la gramínea absorbe más N de las cenizas que las leguminosas, dando lugar a la rápida formación de una cubierta vegetal, fijación de la capa de cenizas y retención en los órganos de las plantas de una gran cantidad de nutrientes procedentes de las cenizas. Por otra parte, las raíces mejoran la estabilidad de la estructura del suelo. La adición de residuos orgánicos ricos en fibras, que se realiza coincidiendo con la siembra, aumenta la producción de fitomasa, promueve la formación de agregados y aumenta la estabilidad al agua de los mismos, mejora otras propiedades físicas, como la porosidad y la aireación, y favorece la actividad biológica, sobre todo la actividad metabólica, como consecuencia de la cual aumentan las tasas de mineralización del C y del N y el C y N potencialmente mineralizables. De los residuos ensayados: paja, gallinaza sólida, purín de vacuno y lodos de depuradora, se recomienda la gallinaza sólida por su mayor eficacia en todos los órdenes, habiéndose calculado las dosis mínima y óptima a aplicar de este residuo. Además de los efectos mencionados, la gallinaza sólida promueve la proliferación de todos los grupos taxonómicos, principalmente de las bacterias, actinomicetos y hongos, sin modificar el orden normal de sus densidades, y también la de los microorganismos amonificantes, aunque, igual que otros residuos, no favorece la recuperación de los fijadores de C y N autotróficos y de los nitrificantes en los suelos quemados. La implantación de la vegetación herbácea, acompañada de la adición de gallinaza, protege el suelo contra la erosión, que disminuye significativamente en comparación con la que se produce en el suelo quemado no tratado, y prepara y conserva el suelo para vegetación arbórea. Esto ha sido demostrado mediante la implantación de pinos en el suelo quemado tratado, que se desarrollan normalmente. Se recupera, además, el ciclo de los nutrientes en el sistema: suelo afectado por el incendio-vegetación herbácea-vegetación arbórea. En efecto, los restos muertos de la vegetación herbácea se incorporan de nuevo al suelo quemado, en el cual aumentan las reservas de nutrientes, como consecuencia del aporte de éstos, procedentes de los restos de la vegetación herbácea y del residuo. Además, ambos contribuyen a la nutrición de la vegetación arbórea ya que, en sólo dos períodos de crecimiento de los pinos, éstos absorben el 33% del N de la vegetación herbácea incorporada al suelo y entre el 7 y el 20% del N de la gallinaza, según la dosis de residuo aportado.

Se ha demostrado también con este método que la recuperación ha de iniciarse casi inmediatamente después del incendio, porque las primeras lluvias postincendio, si no causan la erosión, pueden producir un lavado de nutrientes que dejaría el suelo prácticamente agotado para la revegetación. Comparando la recuperación de un suelo quemado inmediatamente después del incendio con otro cuya recuperación se inició tres años después, se observó que, en el primer caso, aun en el suelo sin adición de residuos, se produce un buen desarrollo de las plantas sembradas debido a los nutrientes acumulados en la capa de cenizas, mientras que en el de tres años la vegetación que se desarrolla es esquelética, porque apenas quedan nutrientes suficientes para sostener una vegetación. No obstante, ambos reaccionan a la adición de gallinaza sólida, aumentando el crecimiento de las plantas, mientras que el rendimiento del suelo abonado con un fertilizante mineral es claramente menor, lo que demuestra también la importancia de la adición de los residuos orgánicos.

En otra investigación, cuyo objetivo era la búsqueda de técnicas de protección del suelo contra la erosión hídrica, se instaló también una vegetación herbácea, ensayando dos mezclas de plantas: una denominada de especies nativas por contener *Agrostis capillaris*, que se encuentra de forma natural en la zona estudiada, además de *A. truncatula* y *Lotus corniculatus*, presentes en las dos mezclas, y otra denominada pratense por contener *Lolium multiflorum*, especie característica del pastizal. Ambas mezclas producen una buena protección del suelo, reduciendo la erosión en un 30%, si bien la pratense presenta un recubrimiento del suelo más rápido durante los cuatro primeros meses. Sin embargo, a partir de esta fecha, el desarrollo de la mezcla nativa es superior, siendo la cobertura más estable y sus efectos sobre la erosión más eficaces y duraderos. Durante el desarrollo de la vegetación se observa que *L. multiflorum* produce la inhibición del crecimiento de la vegetación nativa, predominando y compitiendo a su favor por los nutrientes del suelo. La vegetación herbácea implantada actúa, además, como un filtro verde, que retiene los nutrientes, evitando la pérdida de fertilidad del suelo afectado por el incendio.

La inoculación de microorganismos, concretamente la de cianobacterias y la implantación de plantas leguminosas inoculadas con *Rhizobium*, son dos técnicas que se han ensayado para acelerar la recuperación de suelos quemados a corto y medio plazo, respectivamente.

Cianobacterias filamentosas fijadoras de carbono y nitrógeno atmosféricos, de los géneros *Oscillatoria*, *Nostoc* y *Scytonema*, aisladas de suelos, rocas y aguas y seleccionadas por su elevada capacidad de crecimiento en muy diversas condiciones, se inocularon en suelos que habían sido afectados por incendios forestales, ensayando diversas formas de adición: cultivos de cianobacterias

frescos o congelados, inoculadas en la superficie del suelo o mezcladas con el mismo. La inoculación de las cianobacterias induce a una gran proliferación microbiana en forma de costra microbiana, aumenta la actividad biológica e incrementa sobre todo el contenido de C y N, disminuyendo la relación C/N y aumentando, en menor medida, los demás nutrientes, principalmente Ca, seguido de Mg, K y Na, y P en menor cuantía. El efecto de la inoculación depende de la clase de inóculo, resultando más eficaz la mezcla de diversas cepas de los mencionados géneros, así como la adición de cianobacterias congeladas sobre la superficie del suelo, cualidades que facilitan la aplicabilidad de esta técnica. Se demuestra así que la inoculación de determinadas cianobacterias es un medio para restaurar las poblaciones microbianas de los ciclos del C y del N y para aumentar las reservas de C y N, así como de los demás nutrientes, en los suelos quemados, acelerando de este modo su recuperación. Por otra parte, la costra microbiana, que aunque de poco espesor puede cubrir la superficie del suelo rápidamente, puede proteger el suelo quemado, en cierta medida, evitando su pérdida por erosión.

En experiencias de revegetación de suelos quemados mediante la implantación de diversas mezclas de plantas leguminosas y gramíneas, acompañadas de la adición de gallinaza, se había observado que el quemado del suelo no había afectado a la nodulación de las leguminosas implantadas, infectadas de forma natural con *Rhizobium*. Basándose en este resultado, se ensayó la implantación en suelos quemados de diversas leguminosas inoculadas con dos estirpes de *Rhizobium leguminosarum*, observándose que si la concentración de N en el suelo quemado es elevada, lo que ocurre de forma inmediata después del quemado, la leguminosa asimila preferentemente este N, la producción de nódulos es escasa y lo mismo ocurre con la fijación de nitrógeno atmosférico. Por el contrario, si el contenido de N del suelo quemado es bajo, lo que sucede a corto o medio plazo después del incendio debido a las pérdidas de N por lavado que causa la lluvia que cae después del incendio, se produce una buena nodulación y fijación de nitrógeno atmosférico y aumenta el rendimiento de la planta, tanto de la parte aérea como radicular. La siembra de leguminosas inoculadas con *Rhizobium* es, por lo tanto, una técnica útil para la aceleración de la formación de la cubierta vegetal protectora y la restauración de las reservas de N del suelo, a corto y medio plazo después del incendio, antes de que se produzca la revegetación natural.

4. Prevención y extinción de los incendios forestales

Es indudable que si se quiere reducir el problema de los incendios forestales a niveles aceptables, es necesario ante todo insistir en las medidas de prevención. Sin embargo, bien porque las adoptadas hasta el momento son insuficientes, bien porque la mayoría de los incendios forestales son de origen antrópico y es difícil controlar a los negligentes y a los incendiarios intencionados, lo cierto es que el número de incendios no muestra todavía una tendencia a descender y, por consiguiente, es necesario continuar luchando para la extinción de los que se producen.

Tanto el fomento como el desarrollo de las medidas de prevención, así como la organización y realización de la extinción de los incendios forestales de la Comunidad Autónoma de Galicia corresponden, actualmente, a la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta, responsable última de la elaboración y desarrollo de los Planes INFO anuales correspondientes a esta Comunidad Autónoma. Aunque en estos planes se recogen, lógicamente, medidas de prevención, se dedica aquí un apartado a la prevención porque la información recogida sobre este tema es más amplia que la que se menciona en el Plan INFOGA 99, al que se ha tenido acceso. Por el contrario, sobre las medidas de extinción, se remite a los lectores a los Planes INFOGA de cada año.

4.1. Prevención de los incendios forestales

Las medidas preventivas básicas (la mayoría de ellas recogidas en el plan de prevención del Plan INFOGA 99), que comprenden acciones tendentes a evitar que los incendios se produzcan y se desarrollen, y a disminuir los daños en caso de que se produzcan son las siguientes:

- a) Educación ambiental realizada mediante unidades didácticas dirigidas a escolares y campañas publicitarias de sensibilización, dirigidas a escolares y adultos, en los medios de comunicación (TV, radio, Internet), en vídeos, conferencias, folletos, etc., particularmente en el medio rural, insistiendo sobre todo en el peligro del uso negligente del fuego ante asociaciones de vecinos, agricultores, ganaderos, cazadores, etc., sin olvidar fomentar la colaboración ciudadana urbana y rural.
- b) Medidas legales coercitivas dirigidas a la población en general, regulando además las quemas autorizadas y reforzando el control e inspección de éstas y difundiendo las sentencias de los jueces relacionadas con los incendios forestales, así como las sanciones administrativas.

- c) Mejora, en lo posible, de la predicción meteorológica y difusión rápida a la población de índices de riesgo precisos.
- d) Mejora de las infraestructuras defensivas.
- e) Ordenación del combustible, que, además de la creación y mejora de áreas cortafuegos, y desbroces de fajas auxiliares de pistas, comprende, sobre todo, acciones sobre la vegetación viva o muerta, susceptible de arder, dentro de la llamada silvicultura preventiva, que integra los conocimientos de la silvicultura y los conocimientos relativos a los incendios forestales.

A estas medidas básicas se añaden los esfuerzos que se están realizando en la simulación y búsqueda de modelos de predicción de las condiciones meteorológicas, del comportamiento del fuego, de los índices de riesgo de incendios, de las zonas y períodos de mayor peligro de incendios, etc.

La silvicultura influye de forma directa sobre el tipo, cantidad y humedad del combustible, ya que la elección de las especies determina su inflamabilidad, poder calorífico y biomasa forestal, y los tratamientos posteriores pueden modificar la arquitectura y disposición de los combustibles, así como la continuidad horizontal y vertical, tratamientos que también influyen en la humedad de la vegetación. Indirectamente, la silvicultura afecta también a la velocidad del viento, ya que, por ejemplo, las masas arbóreas pueden frenar más su velocidad, sobre todo si son densas, que las zonas abiertas de matorral.

En Galicia, como ya se ha repetido reiteradamente, el combustible más afectado por los incendios forestales está formado, sobre todo, por la biomasa y la necromasa del abundante matorral que aparece tanto en lugares desprovistos de arbolado como formando el sotobosque del estrato arbolado. La mayor acumulación de este combustible, que puede alcanzar cargas superiores a las 30 t ha⁻¹, ocurre en formaciones abiertas, áreas rasas en donde las especies leñosas crecen sin competencia de los árboles por la luz, los nutrientes y el agua, y con una abundante proporción de fitomasa seca por tratarse de formaciones senescentes. Bajo arbolado, la carga de combustible puede ser mayor, porque, aunque el estrato de matorral suele ser menor, puede incrementarse la proporción de biomasa seca y, además, existe una importante capa de combustibles muertos caídos sobre la superficie del suelo.

La reducción de este combustible puede realizarse por distintos procedimientos: medios mecánicos (rozas sobre todo), medios químicos, pastoreo controlado y fuego prescrito, cada uno de los cuales es más o menos eficaz y tiene ventajas e inconvenientes, desde los puntos de vista ecológico y económico, que será necesario evaluar en cada caso, a la hora de tomar decisiones sobre el manejo del combustible.

El fuego prescrito, en particular, que está siendo utilizado actualmente como medida preventiva, ha sido objeto de discusiones y controversias, pues si bien se presenta como una herramienta útil para el control del combustible, utilizada sin una adecuada planificación y con una repetición continuada, puede potenciar los efectos adversos de los incendios incontrolados: destrucción de la capa orgánica del suelo, fomento de la erosión, pérdida de nutrientes, interrupción del ciclo de nutrientes, destrucción de la mesofauna y de la microbiota, etc.

En Galicia se han realizado numerosas investigaciones sobre fuegos prescritos en matorrales mixtos de tojo y brezos, de carquesias y en el sotobosque de formaciones de *P. pinaster* y *P. radiata*, con frecuencia constituido por el mismo tipo de matorral, con el fin de desarrollar técnicas adecuadas de fuego prescrito, evaluar su eficacia en la reducción del combustible, conocer la velocidad de recuperación de la biomasa afectada, tras el fuego, y también los efectos sobre la vegetación leñosa, el arbolado y las propiedades del suelo. Dichas investigaciones se han realizado en distintas épocas del año, dentro de un amplio rango de condiciones atmosféricas (temperatura y humedad relativa del aire y velocidad y dirección del viento) y con diferentes técnicas de ignición (a favor o en contra del viento y/o de la pendiente), lo que condujo también a amplios rangos de velocidad de propagación del fuego, longitud de la llama e intensidad del incendio. Todo ello se tradujo en distintos niveles de reducción del combustible, calentamiento del suelo y efectos sobre la vegetación y el suelo. De estos estudios se deducen una serie de importantes conclusiones que será preciso tener en cuenta en la aplicación de esta medida de prevención.

El objetivo del fuego prescrito ha de ser, según las citadas investigaciones, romper la continuidad horizontal y vertical de la vegetación y disminuir en un 50-70% el combustible, sobre todo el combustible fino, menor de 6 mm, que es el que más influye en la iniciación y propagación del fuego (ya que ha de tenerse *in mente* que esta medida se aplica para evitar el peligro de un incendio incontrolado de alta intensidad en la zona tratada); sin embargo, esta reducción no puede ser total, porque la eliminación de la cubierta vegetal y de la capa orgánica que protege el suelo desencadena inmediatamente los efectos adversos. Se trata, sobre todo, de interrumpir la continuidad en grandes áreas de matorral, creando mosaicos de diversidad dentro de zonas muy homogéneas, que dificulten la propagación del fuego.

Entre las condiciones necesarias para realizar una quema eficaz, la elección de la época de ejecución es decisiva, ya que si el combustible está demasiado húmedo, el fuego no progresa y si está demasiado seco, la intensidad será elevada y el impacto negativo. La realización de la quema con el suelo

húmedo garantiza la falta de daños en las raíces y en las micorrizas del arbolado. En general se puede realizar en invierno, durante el reposo vegetativo, en otoño o en primavera, aunque las quemadas realizadas en primavera avanzada producen menos reducción del combustible, debido a que la humedad de éste es más elevada, y posibles efectos negativos sobre los animales en época de cría. Es aconsejable efectuar la quema de dos a cinco días después de la lluvia y con una ligera brisa, vientos en torno a $5-8 \text{ km h}^{-1}$, no sobrepasando nunca velocidades mayores de $15-20 \text{ km h}^{-1}$ porque se pueden producir focos secundarios. En general, el fuego a favor del viento, por fajas, es más eficaz que el fuego en contra del viento. Y se ha de conseguir, sobre todo, que el calentamiento del suelo sea bajo. En realidad, se trata de optimizar simultáneamente las condiciones del fuego prescrito para conseguir los objetivos que se persiguen, pero la elección de estas condiciones no siempre es fácil.

Tanto en los brezales mixtos como en los tojales se consiguen reducciones del combustible bastante elevadas ($> 75\%$), que dependen sobre todo de la carga inicial del combustible y de la humedad de las partes secas cuando el matorral está muy verde. En todos los matorrales, junto con la reducción del combustible aéreo, se produce también la reducción de la hojarasca, cuya eliminación total ha de evitarse, porque esta capa de restos vegetales acumula una gran cantidad de nutrientes; parte de estos nutrientes desaparecen durante la quema por volatilización y otra parte es mineralizada durante la combustión, alterándose, en cualquier caso, el ciclo de los nutrientes. De acuerdo con la relación encontrada entre el porcentaje de reducción de la hojarasca y el contenido en agua de ésta, es necesario realizar la quema con un grado de humedad de la hojarasca muy elevado para conseguir que este estrato no se reduzca más del 50% .

En los pinares gallegos, aunque el combustible fino predominante es también la hojarasca, el humus bruto representa un buen porcentaje del combustible y ambos estratos tienen una gran importancia en la protección del suelo y en todos los procesos del ecosistema que dependen de la mesofauna y de la microbiota, tales como la mineralización de la materia orgánica y la liberación de nutrientes para las plantas. Por esta razón es imprescindible controlar el nivel de reducción de ambos estratos, particularmente de la capa de humus, que desempeña un papel esencial en la regeneración del ecosistema. Este control se realiza mediante ecuaciones de predicción, no sólo del combustible global consumido, sino también de la reducción de la hojarasca y del humus bruto, por separado, de ambas capas conjuntamente y de la vegetación, en función de tres variables fácilmente medibles: humedad del material, carga inicial y espesor de éste, con la excepción de que el porcentaje de reducción

[Figura 5f]

Erosión (arenización) postincendio prescrito para la transformación de un matorral en pastizal



Foto cedida por S. J. González Prieto

del humus bruto depende no de su contenido en agua, sino de la humedad del estrato inmediato superior, es decir, de la humedad de la hojarasca.

De acuerdo con el ritmo de regeneración de la vegetación y de los demás estratos del matorral, para el control del combustible no sería necesario repetir los fuegos prescritos con una periodicidad inferior a tres o cuatro años. Se ha observado en los fuegos prescritos que, igual que en los incendios incontrolados, la regeneración de los brezos se retrasa con respecto a la de las leguminosas y que, además, proliferan las zarzas; también se ha apreciado una disminución de la diversidad vegetal.

Cuatro años después de la quema no se observaron daños apreciables en los árboles, para lo cual es necesario que el calentamiento del suelo sea lo más bajo posible, con el fin de evitar que los árboles sufran el ataque de patógenos. En *P. pinaster*, el crecimiento del diámetro y la tasa de mortalidad de los árboles no resultan modificados en fuegos prescritos con reducción baja (7%) del humus bruto; sin embargo, cuando la reducción es del 36%, el crecimiento del diámetro disminuye en un 24% y la mortalidad aumenta significativamente en ocho períodos de crecimiento.

Los fuegos prescritos apenas producen modificaciones en las propiedades químicas y físico-químicas de las capas minerales del suelo ni tampoco en las propiedades microbiológicas en la capa orgánica, poco tiempo después de la quema. Sin embargo, la pérdida de una proporción importante de la capa de humus, con el consiguiente descenso del contenido en materia orgánica y nutrientes (disminución del contenido de N hasta un 50% y de los demás nutrientes, P, K, Ca y Mg hasta cerca del 30% de la capa orgánica del suelo, hojarasca + humus), así como la aparición, poco tiempo después de la quema, de señales evidentes de un inicio de arenización con las primeras lluvias: desprendimiento de partículas finas, transporte y deposición de estos materiales en pequeñas oquedades a lo largo de la pendiente, es decir, de un inicio de la erosión [figura 5f], exigen un análisis muy

cuidadoso de los planificadores y ejecutores de este sistema de prevención antes de que pueda ser usado como un método rutinario.

No obstante, diversas voces desde el Servicio de Defensa contra Incendios Forestales insisten en la necesidad de efectuar quemas prescritas o controladas, bien para evitar los incendios cuya causa sea la eliminación de matorral para regenerar el pasto en zonas donde se cría ganado en estado semisalvaje o para conseguir espacios abiertos en zonas de caza, bien en aquellas zonas donde realmente la acumulación de combustible, generalmente matorral, por ser muy alto, tener un elevado porcentaje de material senescente y, por lo tanto, seco, y tener capas, de hasta 10 cm de espesor, de combustibles finos muertos sobre la superficie del suelo, hacen difícil y peligrosa la extinción en el caso de producirse un incendio incontrolado.

En la provincia de Pontevedra, por ejemplo, se han planificado y ejecutado entre los años 1992 y 1998 un total de 464 quemas prescritas, sobre una superficie de 11.767 ha, en zonas con elevado riesgo de incendio. Estas quemas son solicitadas por los propietarios o usuarios del terreno o aconsejadas por personal del SDCIF, seleccionando éste los lugares en función de los siguientes criterios: zonas próximas a masas arboladas, elevada acumulación de combustible, frecuencia de incendios según la información histórica, conatos de incendio en el verano anterior y zonas con conflictos sociales que pueden afectar al monte. Del seguimiento que el SDCIF hizo de estas quemas prescritas se confirma que: el 41% tuvo como finalidad la eliminación de matorral para disminuir el riesgo de incendios incontrolados (29% de la superficie total quemada), el 31% se realizó para producir pasto para el ganado (51% de la superficie total), el 14% para proteger zonas arboladas (9% de la superficie total), el 7% tuvo como objetivo la preparación de zonas de caza (8% de la superficie total), el 6% como preparación del terreno para repoblación forestal (3% de la superficie total) y el 1% para ahuyentar animales.

Por otro lado, como medida de prevención de grandes incendios de difícil extinción, como los que se produjeron en agosto de 1998 en los montes sur de la provincia de Ourense, miembros también del SDCIF proponen, en este mismo año, un plan quinquenal de quemas controladas, que se concretaría en planes comarcales de quemas, a través de convenios de quemas controladas entre la Xunta y las juntas vecinales o entre la Xunta y propietarios privados. Estas quemas afectarían casi exclusivamente al matorral y para su desarrollo, efectuado por personal especializado dotado de los recursos adecuados, se tendrían en cuenta las investigaciones realizadas sobre fuegos prescritos. Considerando que la superficie media anual de matorral afectado por incendios en la provincia de Ourense en el período 1993-1998 representa casi el

50% de la superficie total anual quemada en Galicia, se propone esta provincia como prioritaria para realizar un plan provincial de quemas controladas, para cuya financiación podrían desviarse hacia la prevención parte de los fondos destinados a la extinción. Al mismo tiempo se propone también, como mejora de la prevención, la puesta en marcha de patrullas móviles, constituidas por personal cualificado, preferentemente guardas forestales, para reforzar la vigilancia y colaborar con la Guardia Civil y la Policía Autonómica, con dos objetivos:

- a) Durante la campaña, realizar un primer ataque y hacer labor disuasoria y de investigación.
- b) Fuera de campaña, efectuar la promoción y orientación del manejo del fuego como acción preventiva.

En Galicia, se ha ensayado también el pastoreo como medida de control del combustible que favorece el incendio. En eucaliptales, el pastoreo de cabras y caballos, ganado capaz de digerir especies del sotobosque con alto valor nutritivo pero también con un elevado contenido en celulosa, o el uso de vacas, ovejas y cerdos en distintas fases del proceso, produjeron reducciones del sotobosque de hasta un 63% en 4 meses, y la eficacia aumenta si se realiza antes una quema prescrita. Asimismo, se ha propuesto la sustitución por pasto de la biomasa natural del estrato más bajo de las áreas repobladas.

La predicción del peligro de incendios forestales en tiempo y lugar se presenta como una actividad básica en la lucha contra los incendios, tanto en los aspectos de prevención, con el fin de planificar las medidas de prevención y el lugar de su aplicación (por ejemplo, la vigilancia disuasoria y el uso de las medidas expuestas anteriormente), como en las de lucha y extinción (por ejemplo, la adopción de medidas de alerta y distribución de los medios de extinción). Con este fin se usan los índices de riesgo, que predicen las épocas de mayor peligro y las zonas de peligro, y los índices meteorológicos, que sirven para advertir al público del peligro de incendio, informar al servicio de extinción y planificar quemas controladas.

En España se han utilizado varios índices de peligro usados en otros países, que, en algunos casos, se han tratado de modificar para adaptarlos a nuestras condiciones. En el año 1956 se introduce un índice de peligro, basado en el modelo canadiense, que se obtiene mediante tablas en función de la humedad relativa del aire, la velocidad del viento y la precipitación. Este índice fue modificado en el año 1968 con el fin de introducir el efecto de la sequía prolongada y de los vientos especialmente desecantes sobre el riesgo de incendios forestales. En el año 1977 se introduce otro sistema, desarrollado en Australia, que

proporcionó el índice de ignición, el cual indica el estado del combustible, y un índice de propagación, que estima la velocidad de propagación del fuego. Posteriormente, en 1987, comienzan a aplicarse los métodos desarrollados en el Laboratorio del fuego de Missoula (EEUU) para predecir el comportamiento del fuego. Utiliza como índice de peligro, derivado de los combustibles, el contenido de humedad del combustible fino y muerto, situado sobre el suelo, que, como ya se indicó, es el que más influye en la iniciación del incendio. Para la estimación de este valor, que es necesario conocer también para la predicción del comportamiento del fuego, se han elaborado tablas en función de datos meteorológicos, exposición, pendiente y otros. A partir de la humedad del combustible se puede determinar la probabilidad de ignición (que indica la facilidad para arder del combustible considerado) y el índice de peligro (en función de que el viento sea o no especialmente desecante).

En Galicia, en el Plan INFOGA se señala que para cada comarca se usa un índice de riesgo diario, que comprende un índice de ignición y un índice de propagación, calculados en función de la temperatura y humedad relativa del aire y de la dirección e intensidad del viento. Para el cálculo de estos parámetros se siguen las normas y las tablas que se especifican en el libro *A metereoloxía e os incendios forestais*, editado por la Xunta de Galicia en 1992 y distribuido por la Consellería de Agricultura, Gandería e Montes. Todos los días del año, a las 14:00 h se realizan las medidas y es calculado el índice de riesgo por el técnico de la comarca. En época de peligro alto de incendios, se transmiten los datos al Centro de Coordinación Central Xeral a las 15:00 h. El índice de riesgo de incendios forestales, tanto a escala de monte como de ámbitos territoriales más extensos, es uno de los elementos fundamentales para la planificación temporal, preventiva y operativa de la defensa contra los incendios forestales.

La búsqueda de modelos de predicción del comportamiento del fuego mediante simulación de incendios en condiciones controladas ha puesto de manifiesto que en el inicio del incendio influyen el tipo y humedad del combustible forestal, la pendiente del terreno y la velocidad y dirección del viento, que determinan su velocidad de propagación, intensidad lineal del fuego, longitud de las llamas y energía superficial desprendida. Estos factores, que caracterizan el comportamiento del incendio, determinan también la dificultad de contención, combate y liquidación del fuego, es decir, la dificultad de extinción del incendio.

Entre los modelos de predicción y simulación del comportamiento del fuego utilizados en España se encuentran el BEHAVE y el CARDIN. El modelo BEHAVE se usa para la lucha contra los incendios forestales, tanto en el aspecto

de la prevención como en el de la extinción. En el de la prevención tiene aplicación, sobre todo, en la planificación de acciones de silvicultura preventiva para controlar el combustible, único factor, de los tres que condicionan el incendio (combustible, condiciones meteorológicas y topografía), sobre el que se puede actuar. En el aspecto de la extinción, se aplica para la planificación de ésta en función de las condiciones de propagación que proporciona el programa. Este programa se alimenta con datos de las condiciones meteorológicas, una base topográfica y modelos del combustible. El modelo CARDIN, también utilizado, permite simular incendios forestales y se alimenta prácticamente con el mismo tipo de datos.

Otro aspecto muy importante de la prevención de incendios forestales es la elaboración de modelos empíricos de predicción específicos para las características de Galicia, ya que se ha demostrado que la aplicación de modelos elaborados por distintos autores de otros países a datos de incendios experimentales realizados en matorrales gallegos no predice con fiabilidad las dos variables más importantes para la toma de decisiones en la extinción de incendios: la velocidad de propagación del fuego y la intensidad lineal del frente de llamas.

Investigaciones recientes basadas en numerosos datos obtenidos de un elevado número de incendios experimentales han posibilitado ya elaborar un conjunto de ecuaciones específicas para distintos tipos de matorrales gallegos y distintos tipos de incendios (a favor o en contra del viento). Estas emanaciones permiten predecir la velocidad de propagación del fuego en función de la velocidad del viento en la dirección de propagación del fuego, la altura media del matorral y la pendiente del terreno, en las ecuaciones de aplicación más general, y en función de estos parámetros, de la humedad relativa del aire y de diversas variables propias del matorral, en las demás. Asimismo, se han desarrollado dos ecuaciones para la predicción de la intensidad lineal del frente de llamas en incendios a favor del viento, en función de la velocidad del viento y de la altura del matorral, en un caso, o en función de la longitud de la llama, cuando el fuego ya se ha desarrollado. Aunque, según los autores, algunas de estas ecuaciones necesitan ser afinadas y tienen algunas limitaciones, representan ya un gran avance, sobre todo porque los parámetros implicados en estos modelos son fácilmente medibles, lo que aumenta su grado de aplicación. La velocidad del viento parece ser el factor dominante en la propagación del fuego en matorrales, aunque la arquitectura del combustible también influye, de tal forma que cuanto más fino es el combustible más rápida es la propagación del fuego.

Es importante señalar que en la búsqueda de modelos de predicción específicos para Galicia, un grupo de investigadores, mayormente gallegos, está de-

sarrollando en la actualidad un proyecto de investigación cuyo objetivo es la elaboración de un sistema experto de predicción del peligro de incendios en Galicia, en el espacio y en el tiempo, basado en datos históricos correspondientes a 30 años, tanto meteorológicos como de los incendios ocurridos en esta Comunidad, datos de distribución de la población, mapas topográficos, geológicos, edáficos, de usos del suelo y de vegetación, datos de teledetección, comportamiento del fuego, etc. El sistema experto comprende un sistema de información geográfica (GIS), bases de datos meteorológicos y de incendios, y también del comportamiento del fuego y de índices de riesgo específicos. Este sistema experto pretende servir de herramienta para predecir los lugares y días de mayor peligro de incendios, con el fin de planificar la distribución de los medios de extinción y alertar a los servicios de vigilancia y extinción o para, ante incendios ya iniciados, discriminar cuáles extinguir en primer lugar, teniendo en cuenta la proximidad a viviendas, el valor económico o ecológico del bosque, etc.

5. Conclusión

Los incendios forestales causan pérdidas económicas considerables y, en general, originan cuantiosos daños en el medio ambiente. En el capítulo económico es necesario incluir también los costes de la prevención y, sobre todo, los de la extinción, que, previsiblemente, aumentarán cada año dada la tendencia actual de incremento del número de incendios.

Teniendo en cuenta la intencionalidad de la mayor parte de los incendios incontrolados, sin duda los más perjudiciales, o, en su defecto, la negligencia como causa de ellos, es decir, en definitiva, el origen antrópico de los incendios, es necesario aumentar las acciones preventivas, incidiendo mucho más en las campañas de concienciación de todos los ciudadanos, tanto del medio rural como urbano e insistiendo en la importante labor que es necesario realizar con los escolares y con los demás estudiantes a todos los niveles. Los mensajes, repetidos con tanta frecuencia como la publicidad comercial a través de la radio y, sobre todo, de la televisión o difundidos por medio de Internet, deben transmitir claramente a los oyentes, televidentes e internautas los profundos daños que se causan con los incendios a los intereses de la población en general y a los de los agricultores, ganaderos y propietarios o usuarios de montes en particular.

La limpieza de los montes para reducir el combustible, concretamente en lo que atañe a los bosques, ha de ser potenciada, pero buscando alternativas a

las quemas prescritas, ya que éstas, aun estando bien planificadas y siendo ejecutadas de acuerdo con esta planificación, causan daños en las capas orgánicas del suelo que, a pesar de ser menores que los que producirían los incendios incontrolados, deben ser tenidos en cuenta. No hay que olvidar que en la mayoría de los suelos de Galicia la fertilidad de éstos está ligada a su contenido en materia orgánica. Las rozas y otros sistemas que se citan en este capítulo son sin duda menos perjudiciales que las quemas prescritas, aunque su coste económico puede ser mayor.

La política de subvenciones desde la Administración ha de ser coherente, cruzando la información proporcionada por sus distintos departamentos así como por la investigación socioeconómica y policial, para evitar subvencionar precisamente a quien por negligencia o de forma intencionada quema el monte.

Por fortuna, en la Comunidad Autónoma de Galicia, la conjunción de la climatología favorable, por sus abundantes lluvias y, salvo excepciones, temperaturas suaves, y de los suelos, que suplen con su riqueza en materia orgánica carencias importantes como la falta de arcilla suficiente, facilitan la recuperación de la cubierta vegetal después del incendio, una de las condiciones básicas para evitar que el suelo siga degradándose después de los incendios por efecto de la erosión.

Casi todas las propiedades de los suelos afectados por los incendios forestales recobran los valores de los correspondientes suelos no quemados entre dos y diez años después del incendio, dependiendo sobre todo de la velocidad de la revegetación y de que no intervenga la erosión postincendio. La recuperación de la cubierta vegetal y del suelo es más rápida si no se destruye toda la materia orgánica durante el incendio (lo que suele ocurrir en suelos sobre granito, con un contenido en materia orgánica muy elevado) y si el suelo está ubicado en zona llana o con una pendiente suave. En caso contrario, es decir, en suelos con poca materia orgánica o con ésta muy incorporada a la materia mineral y/o situados en laderas con pendientes acusadas, si no se actúa rápidamente sobre éstos para protegerlos contra la erosión, se pueden producir grandes pérdidas de suelo o incluso la denudación de los suelos hasta aflorar la roca, y entonces son irrecuperables.

La recuperación de las zonas afectadas por los incendios forestales, incluida en el Plan INFOGA 99 pero todavía sin desarrollar, dispone ya de una investigación básica para el manejo de los suelos y de la vegetación que debe ser tenida en cuenta, dados los buenos resultados obtenidos en ensayos de campo. En cualquier caso, es necesario tener *in mente*, a la hora de abordar este importante aspecto de la lucha contra los incendios forestales, los siguientes principios:

- 1) La conservación del suelo afectado por los incendios y la recuperación de las propiedades de éste dependen estrechamente del proceso de revegetación, es decir, de la restauración de la cubierta vegetal.
- 2) El proceso de recuperación ha de iniciarse inmediatamente o poco tiempo después del incendio para evitar que con las primeras lluvias después de la quema se inicien el lavado de nutrientes de la capa de cenizas y/o los procesos de erosión.
- 3) Es importante retener, mediante la implantación temporal de una vegetación que, lógicamente, ha de ser herbácea, los nutrientes acumulados en la capa de cenizas para evitar la pérdida de éstos.
- 4) Siempre que sea posible, la recuperación del monte afectado por incendios forestales debe tender a la restauración del bosque, el sistema natural más evolucionado, con sus tres estratos: herbáceo, arbustivo y arbóreo, para garantizar su estabilidad, utilizando especies, aunque preferentemente autóctonas, que se adapten al medio físico, para poder garantizarles los recursos que necesitan para su desarrollo.

Por último, el fomento de la investigación científica en todos los campos que incidan en el origen, desarrollo y efectos de los incendios forestales ha de ser promocionada y financiada, propiciando la formación de equipos de investigación multidisciplinarios. Si bien en algunas áreas existe una gran cantidad de información, todavía quedan muchos aspectos sin explorar. Así, por ejemplo, en el estudio del impacto de los incendios sobre el suelo, abunda la investigación sobre suelos graníticos bajo cubierta vegetal de pinares y matorrales, pero es escasa la información sobre suelos desarrollados sobre otros tipos de rocas (esquistos, gabros, etc.), en los que la materia orgánica, aunque puede ser abundante, está muy incorporada a la materia mineral o bajo otros tipos de vegetación (eucaliptos, por ejemplo). En el área de la vegetación, la información es mucho mayor sobre matorrales que sobre bosques. En otros campos, la información es muy escasa o nula: por ejemplo el efecto de los incendios sobre la fauna de Galicia o sobre la atmósfera. Es necesario aumentar el conocimiento de los procesos erosivos en dos casos extremos: en incendios incontrolados de media y alta intensidad y en incendios prescritos y, en estos últimos, insistir en el estudio de sus efectos sobre las capas orgánicas de los suelos afectados. Avanzar en la adquisición de modelos de predicción del riesgo de incendios, del comportamiento del fuego, etc., específicos para las condiciones de Galicia es imprescindible para la prevención, lucha y extinción de los incendios forestales.

Es indudable que la Comunidad Autónoma de Galicia está sufriendo desde hace más de 30 años el azote de los incendios forestales y que la Xunta, sobre todo desde 1990, ha dedicado y dedica un enorme esfuerzo y un elevado presupuesto a la resolución de este problema. En este limitado capítulo se ha intentado poner al día el estado de esta cuestión. Se trata ahora de hacer un alto en el camino, reflexionar sobre lo realizado y, con valentía, adoptar las medidas pertinentes para el futuro.