ABRIR PARTE I - CAP. 1

Capítulo 2

Patrones espaciales y temporales de los incendios originados por rayos y por el hombre en España peninsular

2.1 INTRODUCCIÓN

El fuego ejerce una influencia decisiva en la estructura y funcionamiento de muchos ecosistemas, y particularmente en los de tipo mediterráneo (Naveh, 1975; Gill et al., 1981; Keeley y Keeley, 1988; Richardson y van Wilgen, 1992). Los incendios pueden haber estado presentes en la dinámica de la vegetación desde que la atmósfera fue capaz de sostener una combustión eficiente (Cope y Chaloner, 1980). Los incendios originados por rayos son la mayor fuente de ignición a nivel global (Komarek, 1964) y pueden ser aún la principal fuente de ignición en áreas con escasa influencia humana (Johnson, 1992). Por el contrario, en los países de la cuenca mediterránea y también en otros países con clima mediterráneo, el hombre es, en la actualidad, la principal fuente de ignición (Keely, 1982; Kruger y Bigalke, 1984; Vázquez y Moreno, 1993; Fuentes et al., 1994). El uso del fuego por el hombre en la cuenca mediterránea puede remontarse a miles de años atrás (Naveh, 1994; Henry, 1994). De hecho, el hombre, eventualmente por medio del fuego, puede haber desempeñado un papel clave en la distribución actual de especies tras la última glaciación (Clark et al., 1989; Montserrat, 1992; Peñalba, 1994).

Los incendios originados por rayos han recibido poca importancia debido en gran medida al papel dominante del hombre en el régimen actual de incendios de la región mediterránea. No obstante, alguno de los mayores incendios registrados en España, el país con mayor incidencia en la cuenca mediterránea (Delattre, 1993), han sido originados por rayos (Vélez, 1995). Así, 8 de los 21 incendios de más de 10000 ha registrados en el periodo 1974-94 han sido originados por rayos (ver el Anexo 4). Además, el incendio más grande registrado hasta ahora en España (Áyora, provincia de Valencia, 1978) con algo más de 28000 ha, se originó por rayos (ICONA, 1978).

El papel decisivo de los incendios originados por el hombre en el mantenimiento de determinados ecosistemas es una característica bien conocida en otras partes del mundo (Pyne, 1982). Evidencias de un papel similar a partir de incendios originados por rayos se encuentran también en otras partes del mundo (Baisan y Swetnam, 1990; Johnson, 1992) aunque no demasiadas en el ámbito mediterráneo. A pesar de la extensa documentación disponible sobre la vegetación (Rivas-Martínez, 1987a) pocas referencias se han hecho sobre la posible incidencia del fuego (a través de los incendios de rayos) en paisajes poco alterados por la intervención humana. El conocimiento de los patrones de los incendios originados por rayos es importante para entender la historia de los incendios en el pasado, durante condiciones climáticas similares a las actuales, y antes de que el hombre adquiriese un papel predominante (Pons, 1981). Ha habido, no obstante, algunos intentos

para establecer las condiciones del régimen de incendios en áreas poco perturbadas por el hombre en la cuenca mediterránea (López-Soria y Castell, 1992; Trabaud, 1994).

El objetivo principal de este trabajo es determinar cuáles son los patrones temporales y espaciales de los incendios originados por rayos y compararlos con los de los incendios originados por el hombre. De manera específica se pretende:

(1) Analizar los patrones temporales (variabilidad anual, estacional y eventos importantes) en el periodo 1974-94. (2) Analizar los patrones de distribución espacial de los dos tipos de incendios y determinar las áreas en las que las incendios originados por rayos han sido importantes. (3) Determinar la altitud y el momento del año en los que se han producido los incendios de rayos y los de origen humano. (4) Comparar a nivel local (cuadrículas) los dos tipos de incendios en función de variables como las condiciones meteorológicas en las que se han producido, el momento del año, la altitud, el tamaño máximo y la proporción de superficie arbolada y (5) Comparar a nivel regional (sectores biogeográficos) la frecuencia de incendios y el periodo de rotación para los dos tipos de incendios.

La hipótesis principal es que los incendios originados por rayos y por el hombre difieren en su localización, en el momento en el que ocurren, en la estructura de tamaños y en las condiciones meteorológicas. Por tanto, aunque el fuego pueda haber sido durante largo tiempo un factor ecológico fundamental en muchas regiones, el régimen de incendios actual, dominado por incendios de origen humano, será distinto al de paisajes pasados con menor influencia humana.

2.2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.2.1. Datos empleados

Se han empleado los datos en formato digital suministrados, fundamentalmente, por el antiguo Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) para el periodo 1974-94. Esta información fue convertida en bases de datos accesibles, verificada en cuanto a posibles errores en la codificación de las variables y contrastada con la información publicada anualmente (ICONA, 1974 a 1994; Vélez, 1995). Los datos correspondientes a ciertas provincias y años que no han estado disponibles no se han considerado en este análisis. Las provincias de Álava y Navarra se han excluido por carecer de información sobre ellas. No están incluidos tampoco los incendios con un tamaño < 0,1 ha excepto para Cataluña durante los años 1988-91 (ver el Capítulo 1 para más detalles sobre los datos empleados).

Los datos referidos a la superficie quemada, el tipo de vegetación afectado, la fecha de inicio, la altitud (sólo para el periodo 1974-88), las condiciones meteorológicas (del día de inicio del incendio en la estación más próxima al mismo), la localización del incendio y la causa de origen se han obtenido de los registros informatizados de los "Partes de Incendio Forestal". A partir de esta información se han segregado los incendios originados por rayos (los dados específicamente como tal) de las demás causas de inicio consideradas originalmente. Para los incendios dados como de origen desconocido se ha asumido que han estado relacionados con el hombre.

2.2.2. Representación espacial

Cada uno de los incendios ha sido asignado a una cuadrícula a partir de la información contenida en los registros informatizados. Las cuadrículas están basadas en la malla UTM de 10x10 km y en su mayoría tienen ese tamaño (en el Capítulo 1 se proporciona más información sobre la agregación de cuadrículas y la construcción de la base cartográfica empleada). La superficie real de las cuadrículas de tamaño distinto a 10x10 km se ha estimado a partir de mapas a escala 1:400.000. Se ha empleado el Sistema de Información Geográfica IDRISI (Eastman, 1992) para la representación y análisis espacial de estos datos. El número total de cuadrículas en el mapa de referencia (excluidas las contenidas totalmente dentro de las provincias de Álava y Navarra) ha sido de 4902.

2.2.3. Usos forestales

Para evaluar el territorio forestal en cada cuadrícula se ha empleado el Mapa de Usos y Aprovechamientos a escala 1:1.000.000 (MAPA, 1989). Esta síntesis cartográfica está basada en los mapas de usos a escala 1:50.000 elaborados a partir de fotografías aéreas tomadas en los años 1984-85. El procedimiento empleado consistió en estimar, para cada cuadrícula, el área cubierta por cada una de las 5 clases de uso del territorio consideradas como forestales: (1) arbolado de coníferas; (2) arbolado de frondosas; (3) arbolado mixto de coníferas y frondosas; (4) matorrales y (5) pastizales (siempre que se dieran con recubrimiento de arbolado). Estas cinco clases constituirían el territorio forestal potencial al que hacen referencia los incendios. El método usado en esta estimación consistió en dividir cada cuadrícula en 9 cuadrados (3,3x3,3 mm en la escala empleada) y sumar los pertenecientes a cada tipo de uso (el dominante en el caso de más de un uso en el mismo cuadrado). Esta estimación ha proporcionado unos valores de un 105% para el territorio forestal arbolado (clases 1, 2 y 3) y un 83% para los matorrales (clase 4) frente a los datos proporcionados en la memoria del mapa. Las diferencias se deben al muestreo y a que los datos de la memoria provienen de la planimetría a la escala original (1:50.000) y en la estimación efectuada se ha empleado una síntesis cartográfica a mucha menor escala en la que se han eliminado recintos no representables. El área total estimada para España peninsular, excluida Álava y Navarra, ha sido de 48,4 millones de hectáreas de los cuales 21,9 (45%) han estado ocupados por superficie forestal (ver los Anexos 11 y 12).

2.2.4. Sectores biogeográficos

La división de España peninsular en sectores biogeográficos se ha basado en el trabajo de Rivas-Martínez (1987b). Se ha empleado un mapa a escala 1:1.000.000 para asignar un sector biogeográfico a cada una de las cuadrículas de 10x10 km. En el caso de más de un sector presente en una misma cuadrícula, ésta se asignó al sector dominante. Dado que los sectores biogeográficos están basados en la vegetación potencial y en otros datos sobre la distribución de las plantas, ofrecen un marco de referencia más consistente frente a factores ecológicos que las provincias administrativas. Se han delimitado un total de 39 sectores de los que 8 se encuentran en la región Eurosiberiana y 31 en la región Mediterránea (ver el Apéndice 2.I y la Figura 2.1B para la delimitación de los sectores).

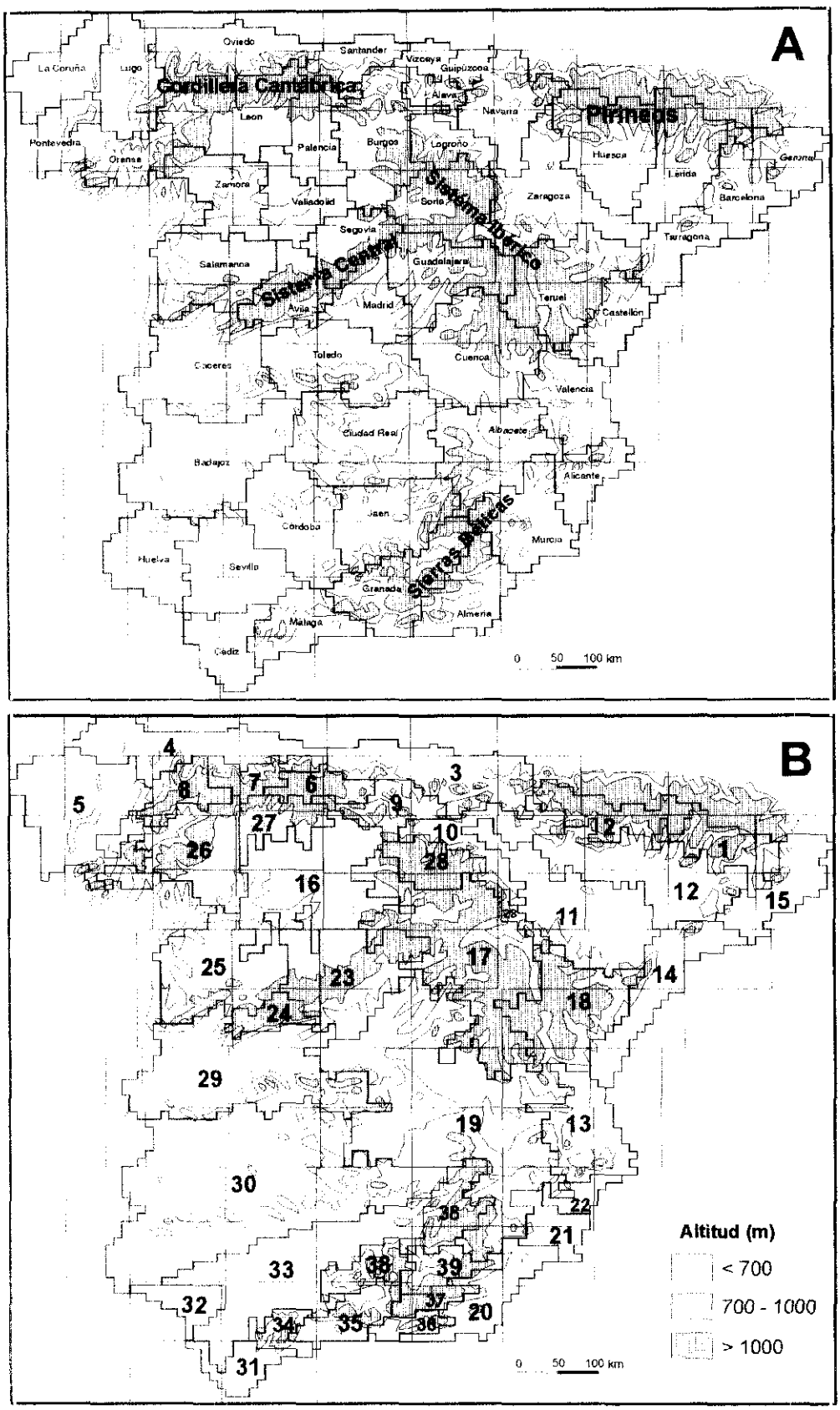


Figura 2.1. (A) Mapa de las provincias administrativas y de los principales sistemas montañosos de España peninsular y (B) delimitación de los sectores biogeográficos (de acuerdo con Rivas-Martínez, 1987b). Los códigos empleados se corresponden con los del Apéndice 2.I. Los rectángulos grandes representan las hojas 1:200.000 empleadas como referencia en la asignación de los incendios a una cuadrícula concreta.

2.2.5. Procedimientos

Las relaciones entre las tendencias anuales (del número de incendios y de la superficie quemada) de los incendios originados por rayos y por el hombre se han evaluado por medio de correlaciones no paramétricas (correlaciones de rango de Spearman, r_s). Las relaciones entre los dos tipos de incendios para el número y para la superficie quemada por cuadrícula se han cuantificado por medio de correlaciones del mismo tipo. Estas relaciones se han establecido para las cuadrículas en las que se ha registrado alguno de los dos tipos y también para la cuadrículas con incendios de los dos tipos. Las relaciones entre los dos tipos de incendio para la frecuencia y el periodo de rotación a nivel de sectores biogeográficos se han evaluado por el mismo procedimiento (correlaciones de rango). Por otra parte, el grado de concordancia entre las distribuciones espaciales de los dos tipos de incendios se ha evaluado por medio del índice de agregación de Kappa (K). La importancia de este índice radica en que elimina la concordancia que sería de esperar debida al azar (Rosenfield y Fitzpatrick, 1986; Cartersen, 1987). Las comparaciones se han basado en las cuadrículas afectadas frente a las no afectadas en función de una selección al azar de 1500, 3000 y 5000 incendios de cada uno de los dos tipos de incendio (originados por rayos y por el hombre).

Las diferencias en las condiciones meteorológicas (temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y días desde la última lluvia) y otras características de los incendios (altitud, desviación con respecto al día medio, tamaño máximo del incendio y proporción de superficie arbolada quemada) entre los incendios originados por rayos y por humanos se han evaluado a nivel de cuadrículas. Se han empleado test pareados de rangos y signos de Wilcoxon para comparar los valores medios por cuadrícula derivados de los dos tipos de incendio. Las comparaciones se realizaron en las cuadrículas con información disponible para los dos tipos. Los cálculos se basaron en los valores medios por cuadrícula para cada variable y de manera adicional en los valores medios resultantes de la ponderación de cada variable por la superficie quemada en cada incendio. El primer caso representaría el incendio medio y el segundo la unidad de superficie quemada. La desviación con respecto al día medio representa la diferencia absoluta, en días, entre el día juliano medio en cada cuadrícula y tipo de incendio y el día juliano medio en que se han producido en todo el territorio para cada uno de los dos tipos de incendio. Además, se ha realizado una representación espacial de las diferencias entre estas variables por medio de un índice normalizado entre los valores obtenidos para los dos tipos de incendios. Este índice, en cada cuadrícula, expresa la diferencia entre los valores obtenidos para los dos tipos de incendio. Esta diferencia se ha dividido por la suma de ambos, para normalizar el valor, de manera que el rango sea de -1 a +1.

La frecuencia de incendios se ha calculado como el número de incendios registrados en 10.000 ha de superficie forestal y año. El periodo de rotación se define como el número de años necesario para que se queme una extensión equivalente a la del territorio para el que se calcula, y se asume que los incendios registrados en los 21 años no han afectado a la misma área más de una vez. Estos dos parámetros del régimen de incendios se han calculado para los incendios originados por rayos y los de origen humano en los 39 sectores definidos.

2.3. RESULTADOS

2.3.1. Tendencias anuales

En los 21 años transcurridos desde 1974 a 1994 se han registrado para España peninsular 173.715 incendios que han afectado a más de 4,6 millones de hectáreas (Tabla 2.1). Un 3,3% de éstos han sido atribuidos a rayos y han afectado a un 7,5% de la superficie total quemada. Incendios de alguna de las dos causas han afectado a 4414 cuadrículas (un 90% del total de cuadrículas definidas) y los de rayos a un 41,7% de las que han registrado algún incendio en este periodo (Tabla 2.1 y Figura 2.5). El porcentaje de conatos (incendios menores de 0,1 ha no considerados en este análisis) ha representado un 9% del total de incendios para el periodo 1989-94 (Anexo 3). En este periodo un 19% de estos conatos se originaron por rayos, lo cual representa un porcentaje muy alto sobre la proporción total de incendios de rayos.

Tabla 2.1. Número de incendios, superficie total quemada, frecuencia de incendios, superficie quemada relativa (hectáreas quemadas en 10.000 ha de superficie forestal y año) y número de cuadrículas afectadas por los incendios de rayos y los relacionados con el hombre en España peninsular durante el periodo 1974-94. Los datos están basados en los incendios con una superficie ≥ 0,1 ha.

Causa del incendio	*Número de incendios*		*Superficie quemada*		*Frecuencia*	*Superficie relativa*	*Cuadrículas afectadas*	
	No.	*%*	*ha x 1000*	*%*	*Incendios 10000 ha $^{-1}$ año $^{-1}$*	*hectáreas 10000 ha $^{-1}$ año $^{-1}$*	*No.*	*%*
Rayos	5663	3,3%	343	7,5%	0,12	7,5	1839	41,7%
Hombre	168052	96,7%	4258	92,5%	3,66	92,7	4361	98,8%
Todos	173715	100,0%	4601	100,0%	3,78	100,2	4414	100,0%

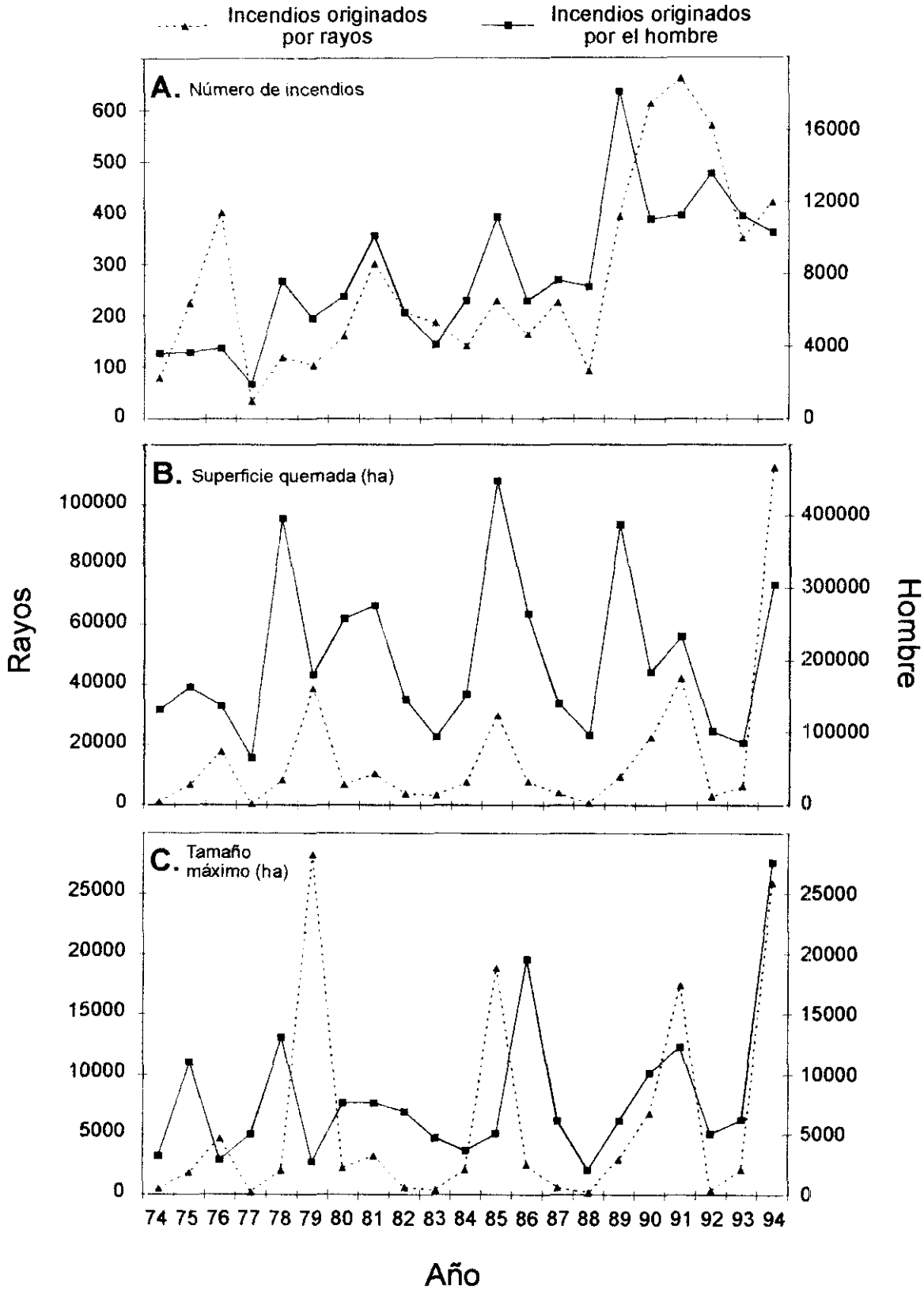


Figura 2.2. Evolución anual de los incendios originados por rayos y los relacionados con el hombre en el periodo 1974-94. (A) Número de incendios; (B) superficie total quemada y (C) tamaño máximo registrado.

El número medio anual de incendios originados por rayos fue de 270 y han afectado a una superficie media de 16400 ha (Figura 2.2A). La variabilidad anual en el número de incendios ha sido muy alta, llegándose a registrar en el año 1991 hasta 661 incendios con una superficie quemada de 42400 ha. No obstante, la mayor superficie quemada a nivel anual ha correspondido al año 1994 con 420 incendios y 112700 ha. Los dos tipos de incendios presentaron una tendencia creciente en cuanto al número registrado que ha sido especialmente destacable en los incendios originados por rayos para los últimos 6 años. No se observa ninguna tendencia clara para la superficie quemada en la que los dos tipos de incendios presentaron un gran variabilidad anual (Figura 2.2B). Los incendios originados por rayos y por el hombre, tanto para el número de incendios como para la superficie quemada a nivel anual, han estado muy relacionados (r_s=0,69; P=0,002 y r_s=0,74; P=0,001). Los incendios originados por rayos, aun cuando generalmente han dado lugar a incendios de menor tamaño que los originados por el hombre, han llegado a producir alguno de los mayores incendios registrados en España en los últimos años (Figura 2.2C)

Los incendios originados por rayos han tenido lugar durante 65 días frente a los casi 318 días en los que, en promedio para este periodo, se han registrado incendios de origen humano (Figura 2.3A). Los incendios de rayos tienden a producirse en unos pocos días concretos, con un promedio de un 11% del total anual registrándose en un solo día. El número máximo de incendios de rayos registrados en un día fue de 59, mientras que para los incendios relacionados con el hombre este número puede llegar a 304 (Figura 2.3B). Las tendencias conjuntas de ambos tipos de incendio en relación a estas dos variables han sido bastante diferentes. La tendencia creciente en el número de días con incendios humanos, consistente con los patrones crecientes del número de incendios, parece haber comenzado para los incendios de rayos en los últimos 6 años. Durante estos últimos años se han registrado valores superiores a los 80 días, cifra no alcanzada en ninguno de los 15 años precedentes. Estas tendencias se manifiestan también en el número máximo de incendios registrados en un día.

Los incendios de rayos se han producido en unos pocos eventos anuales (se ha definido un evento como el periodo de días consecutivos en los que se ha registrado más de 3 incendios por día). El número medio de eventos al año ha sido de 9,4 (Figura 2.4A). La duración media del evento más largo registrado cada año ha sido de 5,3 días en los que se registraron 67 incendios en promedio (Figura 2.4B) aunque en algunos años se ha llegado a prolongar hasta 14 días con un total de 165 incendios. Los últimos años presentan, generalmente, valores más elevados para estas variables.

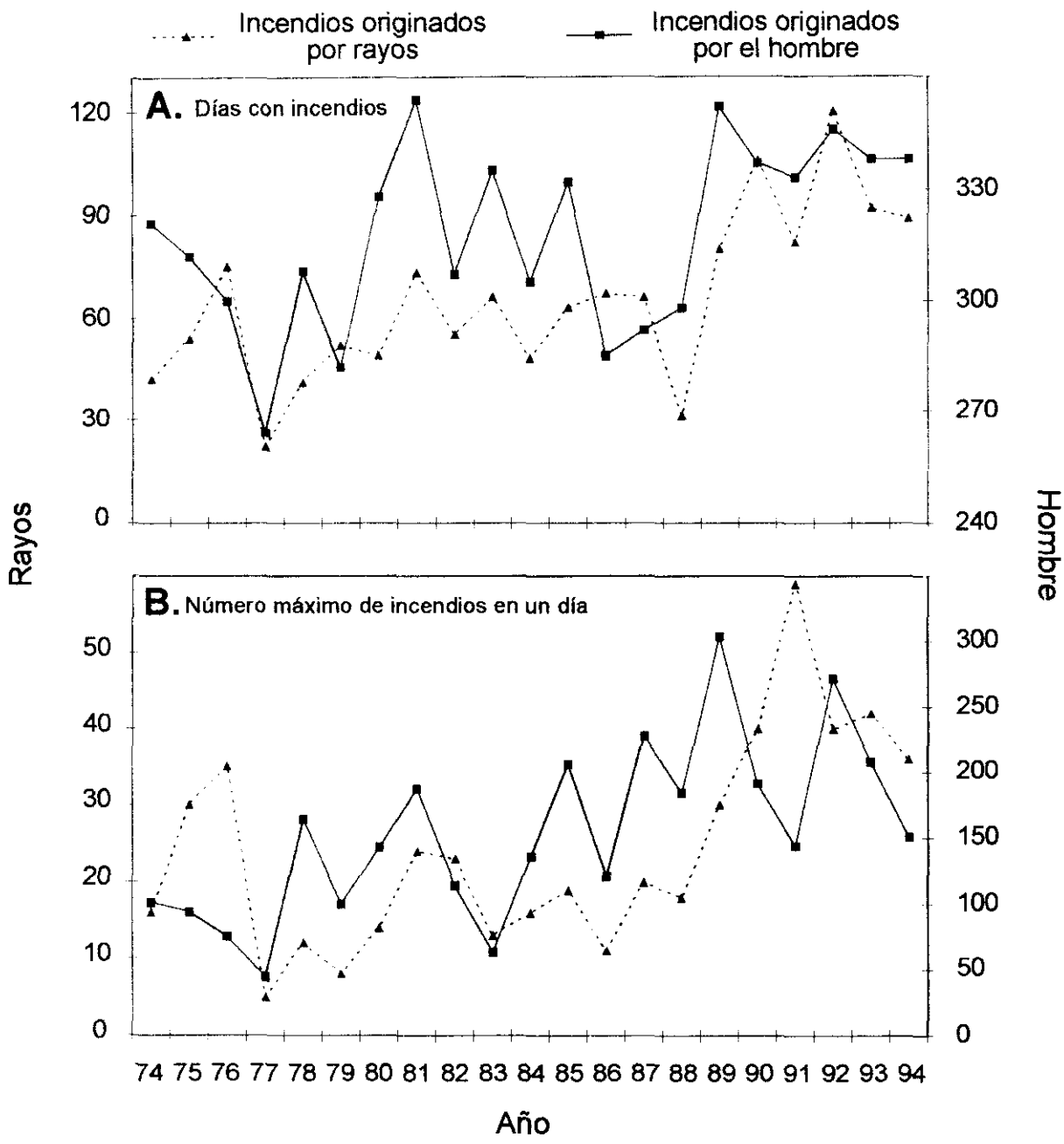


Figura 2.3. (A) Número de días al año con incendios y (B) número máximo de incendios registrados en un día para los incendios originados por rayos y los relacionados con el hombre.

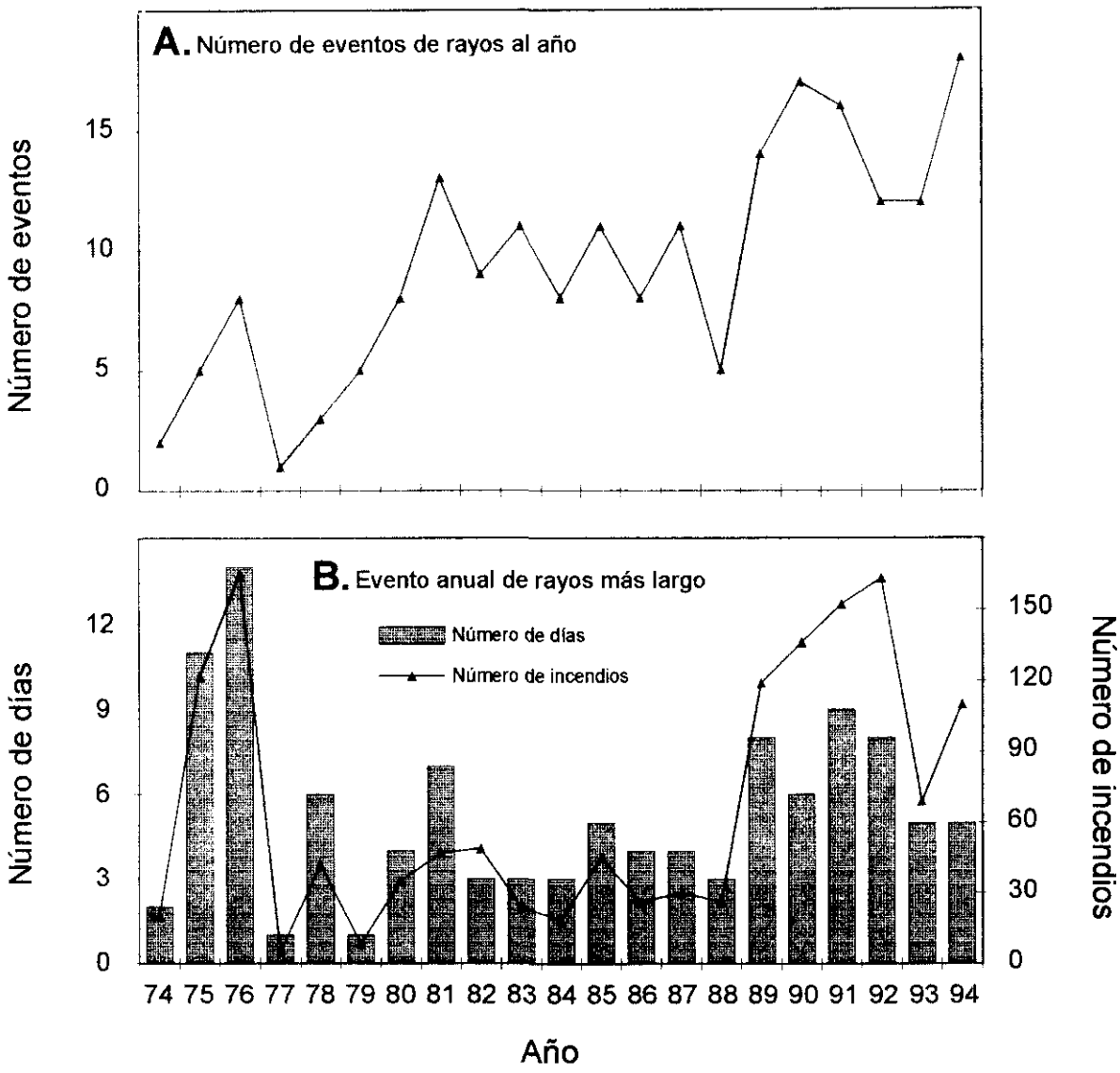


Figura 2.4. (A) Número de eventos (periodo de días consecutivos con más de 3 incendios por día) de rayos y (B) evento más largo registrado cada año junto a los incendios totales producidos durante dicho evento.

2.3.2. Patrones espaciales

Los incendios originados por rayos y por el hombre han estado significativamente correlacionados tanto para el número de incendios (r_s=0,33; P<0,001) como para la superficie quemada (r_s=0,26; P<0,001) a nivel de las cuadrículas en las que se ha registrado al menos un incendio de alguno de los dos tipos (n=4414). Las relaciones para las cuadrículas en las que se han registrado incendios de los dos tipos (n=1806) han proporcionado resultados similares, aunque más bajos (r_s=0,16; P<0,001 y r_s=0,18; P<0,001), para el número de incendios y para la superficie quemada respectivamente.

Estos resultados indican que, a esta escala de medida, las cuadrículas con mayor incidencia de un tipo de incendio tienden a registrar también una mayor incidencia del otro tipo. Esta tendencia a la agregación, a nivel de cuadrículas, de los incendios originados por rayos y por el hombre, se pone de manifiesto también en los valores positivos y estadísticamente significativos obtenidos para el índice de Kappa (Tabla 2.2), lo que sugiere un grado de agregación mayor al esperable debido al azar.

Tabla 2.2. Valores de chi-cuadrado del test de independencia de Pearson y valores del índice de agregación de Kappa (K) obtenidos de las comparaciones entre incendios originados por rayos y por el hombre. Las comparaciones se han basado en las cuadrículas afectadas y las no afectadas por cada tipo de incendio en función de una selección al azar de 1500, 3000 y 5000 incendios de cada uno de los dos tipos. Valores de K mayores que 0 indican que los dos tipos de incendios coinciden en las mismas cuadrículas en una proporción mayor a la esperable debido al azar.

Incendios seleccionados	*Cuadrículas con incendios*	*Chi-cuadrado (Pearson)*		*Índice de Kappa*	
		Valor	*P*	*Valor*	*P*
1500	1481	74	< 0.001	0.13	< 0.001
3000	2090	115	< 0.001	0.16	< 0.001
5000	2561	140	< 0.001	0.18	< 0.001

Al contrario que los incendios originados por el hombre, registrados prácticamente en todo el territorio peninsular, los incendios originados por rayos se han registrado fundamentalmente en algunas zonas concretas, en particular en áreas de montaña (Figura 2.5A-D y Figura 2.1). En términos relativos al total de incendios registrados, los incendios originados por rayos han sido relevantes en unas pocas zonas, especialmente en el este peninsular. Este tipo de incendio ha representado más de la mitad de los incendios registrados o de la superficie quemada en áreas del Sistema Ibérico, Pirineos y Sistema Central (Figura 2.6A-B). De las cuadrículas en las que se ha registrado algún incendio de rayo (n=1.839), en un 12% de ellas han representado más de un 50% de la superficie quemada. Es destacable la poca importancia proporcional de los incendios de rayos en el sudoeste peninsular.

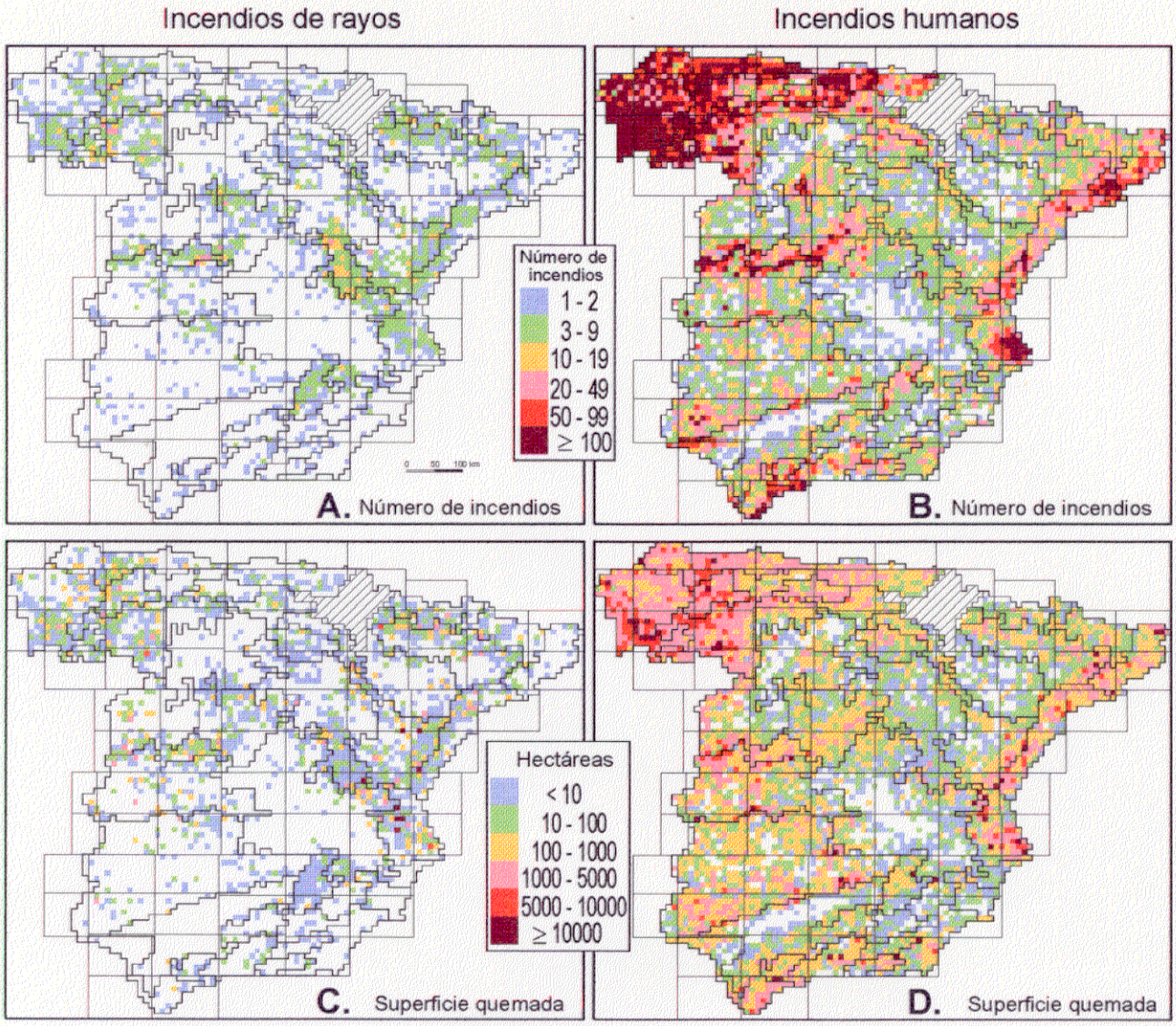


Figura 2.5. Incidencia por cuadrícula de los incendios forestales registrados en España peninsular en el periodo 1974-94. Incendios originados por rayos: (A) número de incendios y (C) superficie quemada. Incendios relacionados con el hombre: (B) número de incendios y (D) superficie quemada. La máscara rayada en el norte de la península corresponde a las provincias de Álava y Navarra no consideradas en este trabajo.

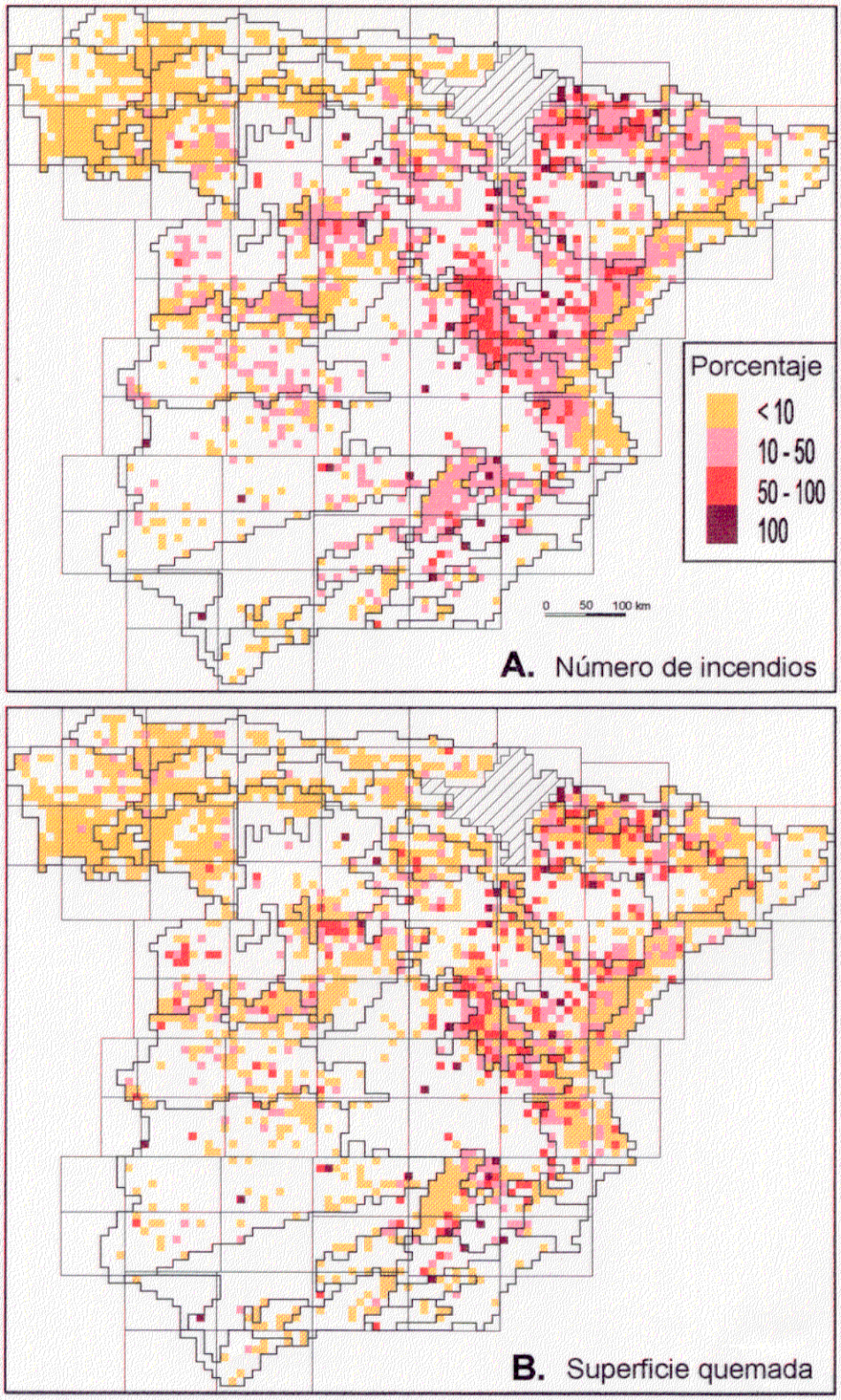


Figura 2.6. Importancia relativa (%) de los incendios originados por rayos frente al total de incendios registrados en cada cuadrícula en el periodo 1974-94: (A) número de incendios y (B) superficie quemada.

2.3.3. Patrones estacionales y altitudinales

Los incendios originados por rayos se han registrado de manera casi exclusiva durante los meses del verano (de Junio a Septiembre ambos incluidos). Durante este periodo se han producido el 92% de los incendios y se ha quemado un 99% de la superficie afectada

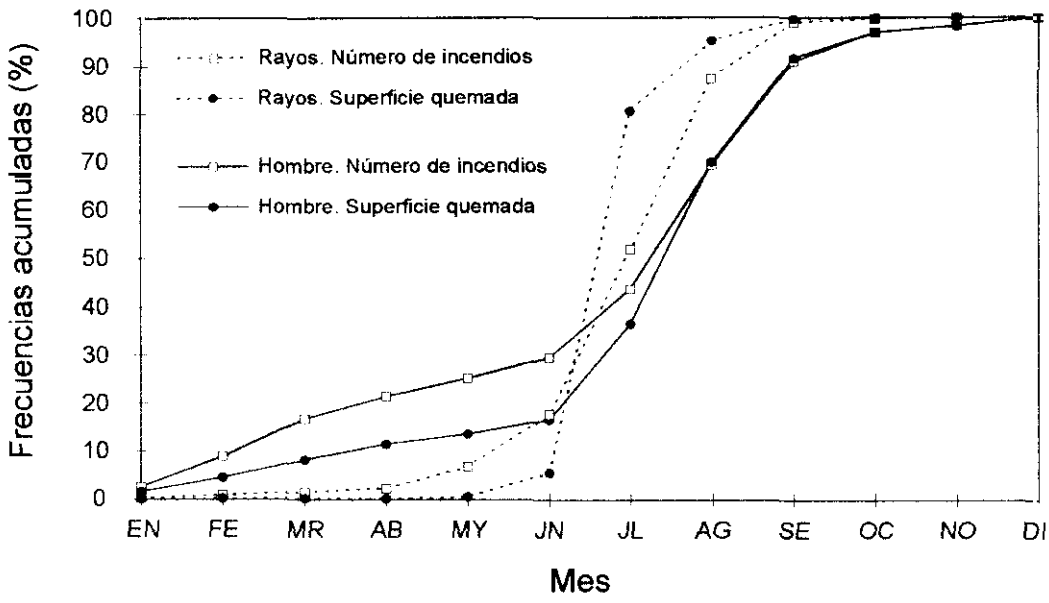


Figura 2.7. Distribución de las frecuencias mensuales acumuladas del número de incendios y de la superficie quemada para los incendios originados por rayos y por el hombre en el periodo 1974-94.

por este tipo de incendio (Figura 2.7), mientras que los relacionados con el hombre están más ampliamente distribuidos a lo largo del año.

Los incendios de rayos se han registrado a altitudes más elevadas que las de los incendios relacionados con el hombre. La altitud media de las zonas afectadas por incendios de rayos es mayor que la de los originados por el hombre tal como aparece reflejado en la distribución de frecuencias de los datos de altitud por incendio (Figura 2.8A). No obstante, estas diferencias en altitud decrecen cuando el tamaño de los incendios aumenta. Así, prácticamente no hay diferencias en cuanto a la altitud entre los incendios de rayos y los humanos para tamaños superiores a 500 ha (Figura 2.8B).

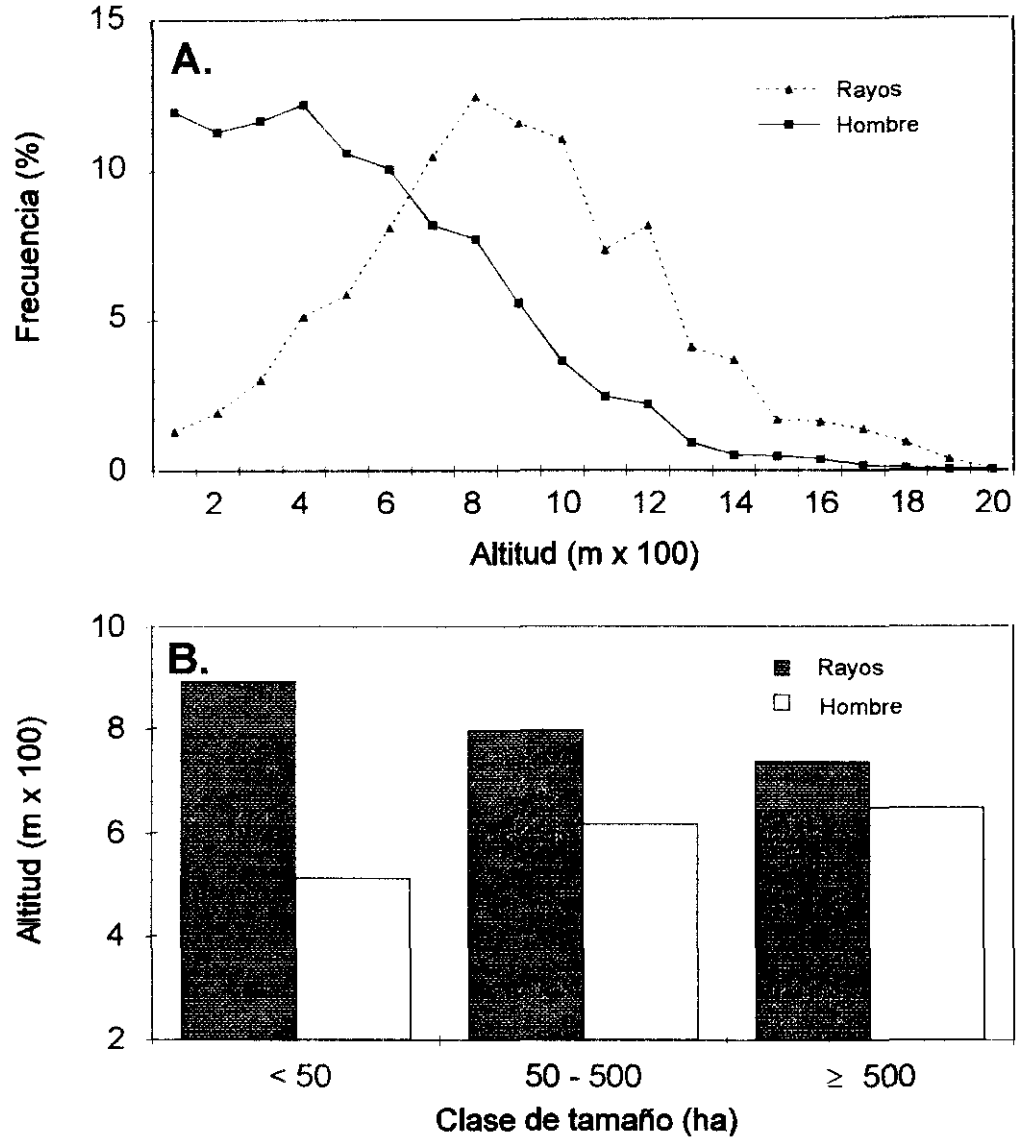


Figura 2.8. (A) Distribución de frecuencias de la altitud a la que se produjeron los incendios originados por rayos y los relacionados con el hombre en el periodo 1974-88 y (B) altitud media por tamaño del incendio.

Tabla 2-3. Comparaciones por cuadrícula de las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa, días desde la última lluvia y velocidad del viento), la altitud, la desviación con respecto al día juliano medio, el tamaño máximo y la proporción de superficie arbolada quemada para los incendios originados por rayos y los relacionados con el hombre. Las comparaciones se han efectuado para los valores medios de estas variables por cuadrícula y para esos valores ponderados por la superficie quemada en cada incendio. Las comparaciones en los dos casos se han realizado por medio de test pareados de rangos y signos de Wilcoxon.

Variable comparada	*Número de cuadrículas*	*Rayos*		*Hombre*		*Test de Wilcoxon*	
		Media	*SE*	*Media*	*SE*	*z*	*P*
(A) Por número de incendios							
Temperatura máxima (° C)	1218	29,1	0,15	25,4	0,13	-20,2	< 0,001
Humedad relativa (%)	1132	47,9	0,44	48,3	0,32	-1,2	0,232
Velocidad del viento (km/h)	1153	13,3	0,34	14,2	0,27	-5,4	< 0,001
Días desde la última lluvia	890	21,8	0,66	23,0	0,52	-2,7	0,008
Altitud (m)	798	851	13	777	11	-8,8	< 0,001
Desviación con el día medio	1806	28,8	0,46	64,0	0,60	-33,2	< 0,001
Tamaño máximo (ha)	1806	173	32,9	543	35,1	-28,6	< 0,001
Proporción de arbolado (%)	1806	53,1	0,97	41,2	0,72	-10,2	< 0,001
(B) Por superficie quemada							
Temperatura máxima (° C)	1218	29,2	0,16	26,1	0,17	-14,5	< 0,001
Humedad relativa (%)	1132	47,3	0,47	46,7	0,38	-1,2	0,235
Velocidad del viento (km/h)	1153	13,6	0,38	15,9	0,40	-6,1	< 0,001
Días desde la última lluvia	890	22,4	0,72	26,0	0,72	-4,4	< 0,001
Altitud (m)	798	850	13	794	12	-5,2	< 0,001
Desviación con el día medio	1806	22,3	0,52	34,9	0,85	-10,9	< 0,001

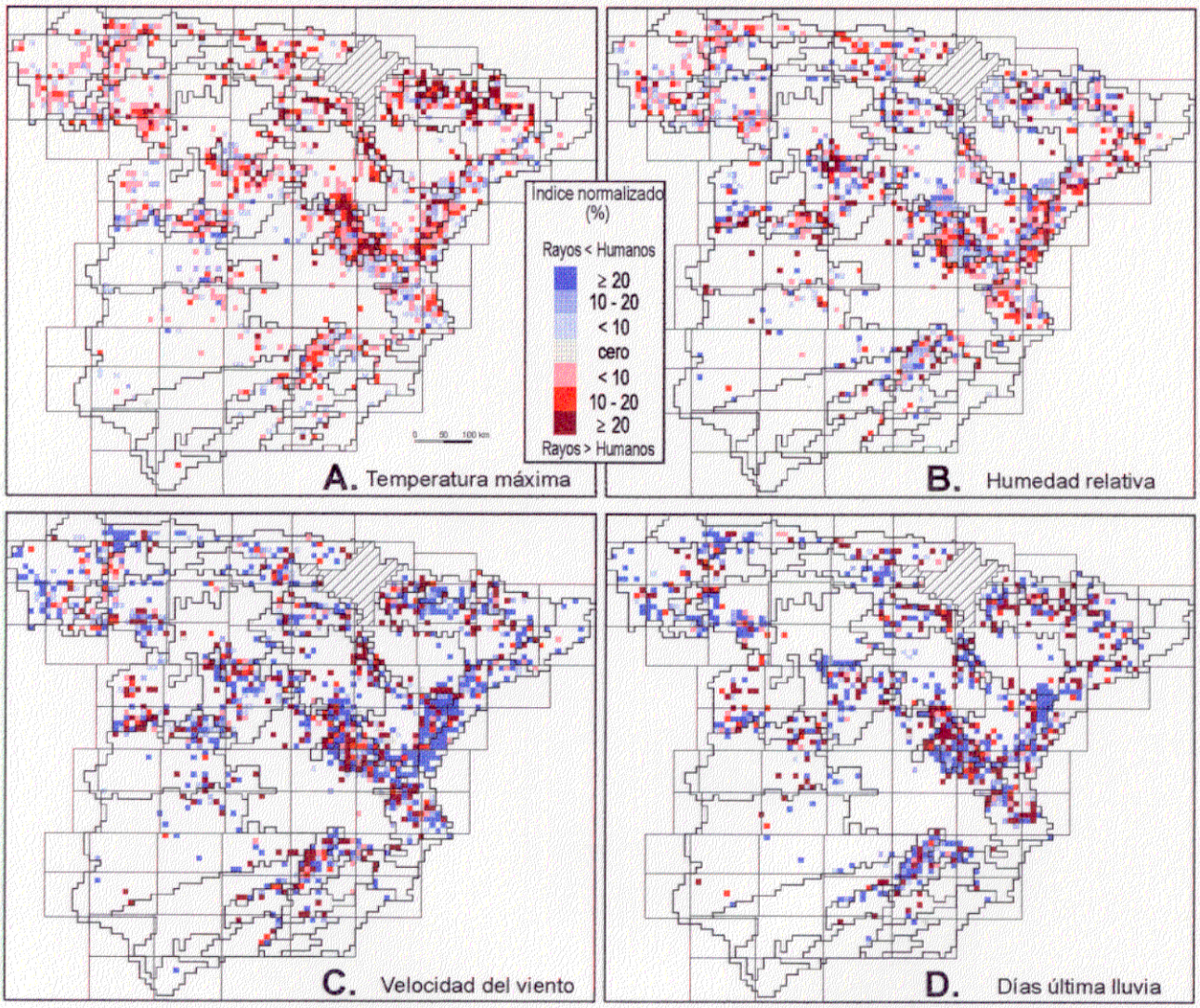


Figura 2.9. Índice normalizado de las condiciones meteorológicas asociadas al inicio de los incendios originados por rayos y por el hombre: (A) temperatura máxima; (B) humedad relativa; (C) velocidad del viento y (D) días desde la última lluvia. Estas imágenes están generadas a partir de los valores meteorológicos medios (ponderados por la superficie quemada para los incendios de una misma cuadrícula) obtenidos para los incendios originados por rayos y por humanos. Los tonos azules representan valores más bajos y los tonos rojos valores más altos para los incendios originados por rayos frente a los de origen humano. Las proporciones en que ésto sucede se dan en la Tabla 2.4.

2.3.4. Comparaciones a nivel de cuadrícula

Dentro de cada cuadrícula los incendios originados por rayos y por el hombre tienden a producirse en condiciones meteorológicas distintas en cuanto a la temperatura, el número de días desde la última lluvia y la velocidad del viento (Tabla 2.3). En general, en una proporción más elevada de cuadrículas, la temperatura asociada a los incendios de rayos ha sido más alta, menor el número de días desde la última lluvia y menor la

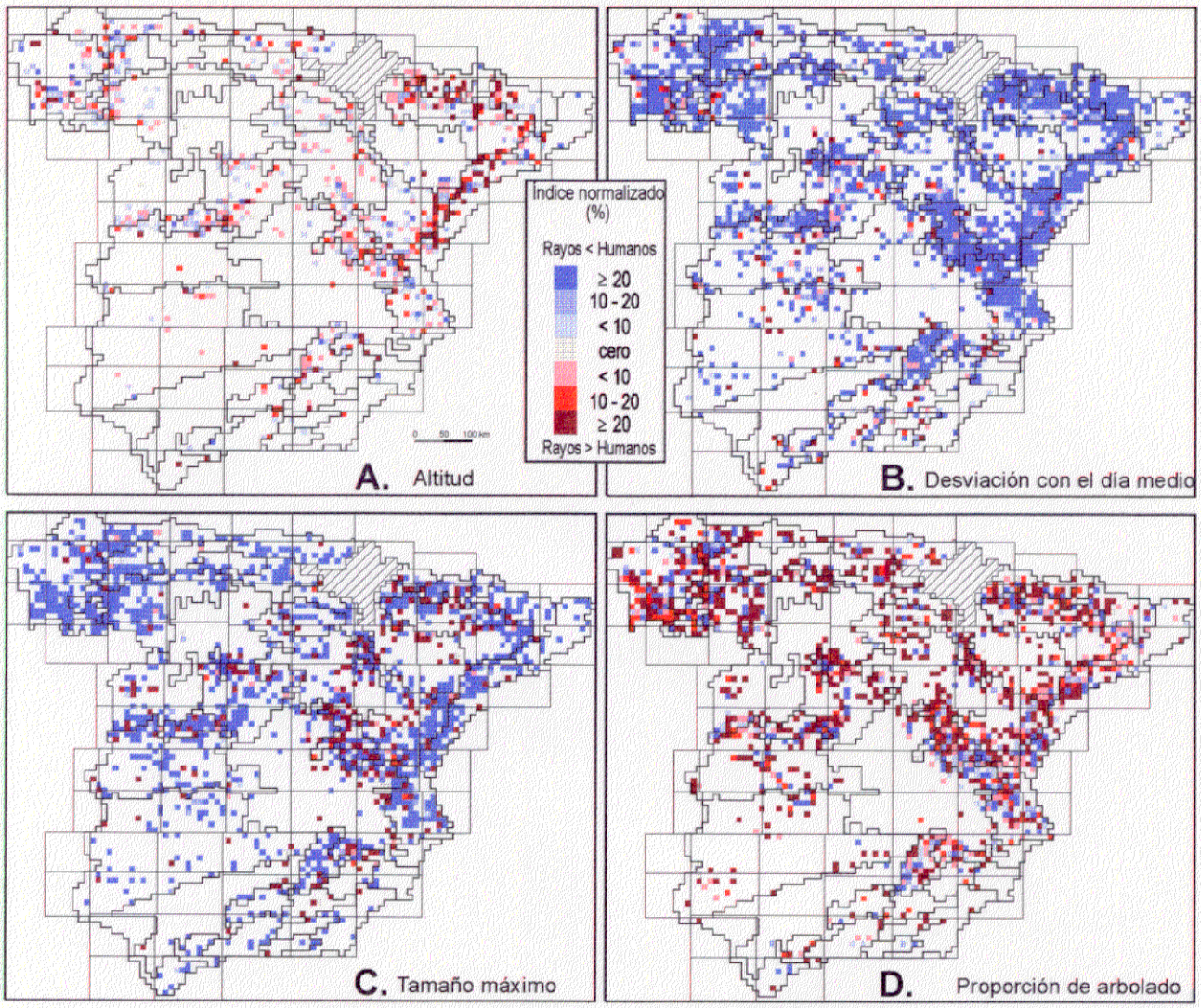


Figura 2.10. Índice normalizado de cuatro variables asociadas a los incendios originados por rayos y por el hombre: (A) altitud; (B) desviaciones con respecto al día juliano medio; (C) tamaño máximo por cuadrícula y (D) proporción de superficie arbolada quemada. Estas imágenes están generadas a partir de los valores medios de cada variable por cuadrícula para los incendios originados por rayos y por el hombre. Los tonos azules representan valores más bajos y los tonos rojos valores más altos para los incendios originados por rayos frente a los de origen humano. Las proporciones en que ésto sucede se dan en la Tabla 2.4.

velocidad del viento (Figura 2.9A-D y Tabla 2.4). Los incendios originados por rayos y por el hombre tienden a diferenciarse también en cuanto a la altitud, el momento en que se registran, el tamaño máximo en cada cuadrícula y la proporción de arbolado afectado (Tabla 2.3). En una proporción más elevada de cuadrículas los incendios de rayos se han producido a mayor altitud, más centrados en la época de mayor incidencia de incendios, han dado lugar a incendios de menor tamaño y han afectado a una proporción mayor de superficie arbolada (Figura 2.10A-D y Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Proporción de cuadrículas en las que las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa, días desde la última lluvia y velocidad del viento), la altitud, la desviación con respecto al día juliano medio, el tamaño máximo y la proporción de superficie arbolada quemada han sido mayor, menor o igual en la comparación de los incendios originados por rayos y por el hombre (R = rayos y H = hombre).

Variable comparada	*Número de cuadrículas*	*Número de incendios*			*Superficie quemada*		
		R < H	R = H	R > H	R < H	R = H	R > H
Temperatura máxima (° C)	1218	20%	6%	74%	29%	6%	65%
Humedad relativa (%)	1132	50%	3%	47%	47%	3%	51%
Velocidad del viento (km/h)	1153	55%	8%	37%	55%	8%	37%
Días desde la última lluvia	890	54%	3%	43%	57%	2%	40%
Altitud (m)	798	26%	25%	49%	32%	26%	42%
Diferencia con el día medio	1806	90%	1%	10%	58%	2%	40%
Tamaño máximo (ha)	1806	84%	2%	14%			
Proporción de arbolado (%)	1806	41%	4%	54%			

2.3.5. Sectores biogeográficos

El análisis regional (a nivel de sectores biogeográficos) de la frecuencia de incendios y el periodo de rotación, muestra importantes diferencias entre los valores obtenidos para los dos tipos de incendios (Figura 2.11A-D y Apéndice 2.I). Para los incendios originados por rayos (Figura 2.11A), los valores más altos de frecuencia se registraron en el sector 14 (Valenciano-Tarraconense) y 24 (Bejarano-Gredense) con 0,32 incendios 10000 ha^{-1} $año^{-1}$. Varios sectores (más o menos alineados con el Sistema Ibérico) han registrado una frecuencia superior a 0,20 (sectores 13, 16, 17, 18). Otros sectores con una frecuencia de incendios originados por rayos proporcionalmente alta fueron el 26 (Orensano-Sanabriense) y el 12 (Bárdenas-Monegros). Los sectores situados en el sudeste peninsular (34 a 39) registraron una frecuencia relativa baja. Para los incendios originados por humanos (Figura 2.11B) los valores de frecuencia más elevados se han registrado en el noroeste peninsular, con un máximo en el sector 5 (Galaico-Portugués) de 23,7 incendios 10000 ha^{-1} $año^{-1}$. Otros sectores con valores altos han sido los situados a lo largo de la costa mediterránea (sectores 13 a 15 con valores en torno a 5,3) y en el sur peninsular en el que destaca el sector 34 (Rondeño) con un valor de 6,9. En el interior peninsular el valor más alto ha correspondido al sector 24 (Bejarano-Gredense) con una frecuencia de 3,5 incendios 10000 ha^{-1} $año^{-1}$.

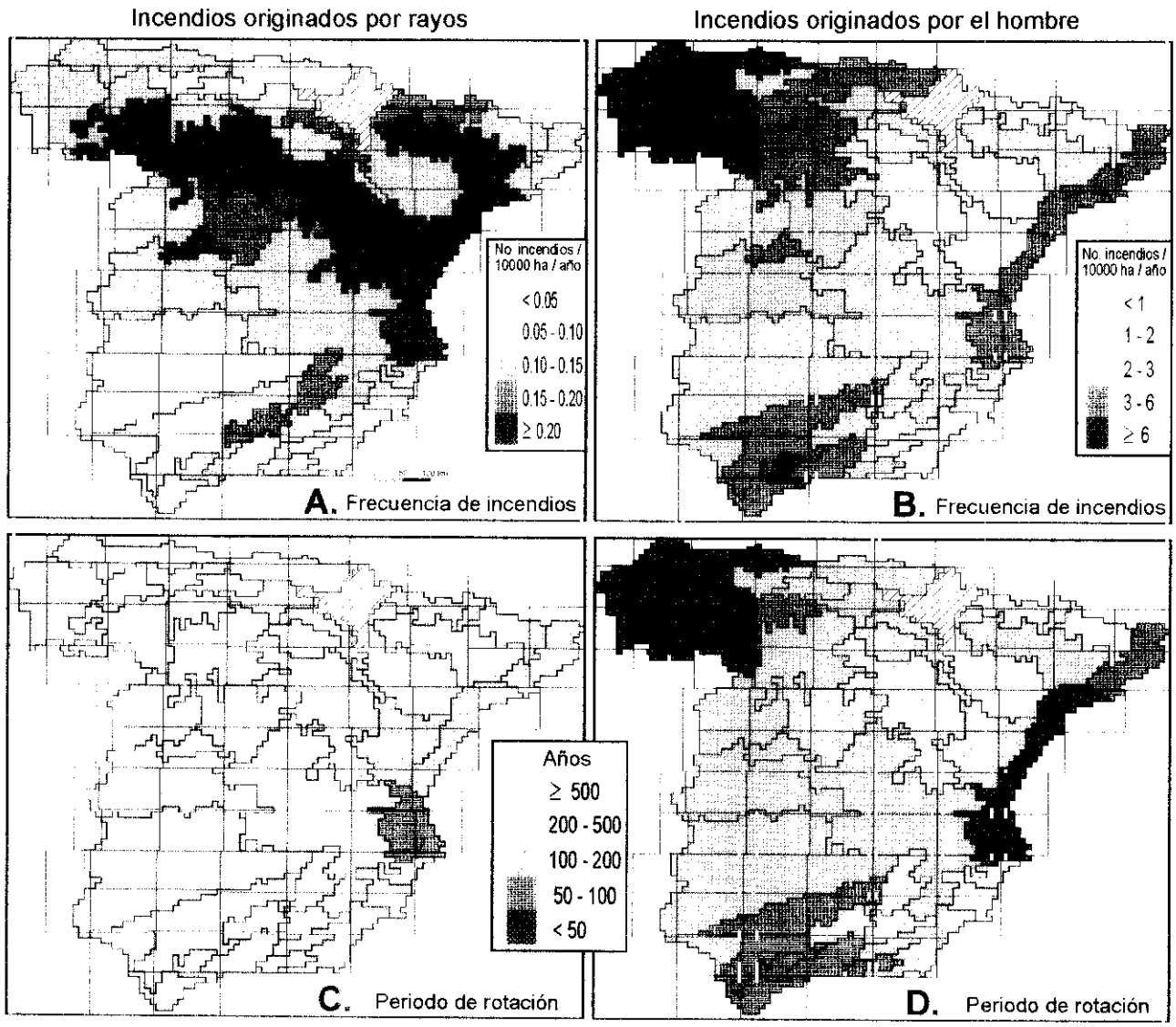


Figura 2.11. Frecuencia de incendios por sectores biogeográficos para: (A) incendios originados por rayos y (B) incendios relacionados con el hombre. Periodo de rotación por sectores biogeográficos para: (C) incendios originados por rayos y (D) incendios relacionados con el hombre; (ver la Figura 2.1B y el Apéndice 2.I para los códigos, nombres de los sectores biogeográficos y otra información).

El único sector biogeográfico con un periodo de rotación inferior a los 100 años, basado en la superficie quemada por incendios de rayos, ha sido el sector 13 (Setabense) con 79 años (Figura 2.11C). En este sector han tenido lugar algunos de los mayores incendios originados por rayos registrados en España en este periodo. Para los demás sectores, exceptuando el 14 y el 18 (Valenciano-Tarraconense y Maestracense) con valores inferiores a los 500 años, los periodos de rotación asociados a incendios de rayos han superado normalmente los 1000 años. Por el contrario, para los incendios originados

por el hombre se han registrado valores inferiores a los 50 años en varios sectores situados en el noroeste, este y en menor medida en el sur peninsular (Figura 2.11D). A nivel de estos sectores las relaciones para la frecuencia de incendios o el periodo de rotación entre los incendios originados por rayos y por el hombre han presentado valores muy bajos y estadísticamente no significativos (r_s=0,11; P=0,21 y r_s=0,15; P=0,36 respectivamente). Estos resultados contrastan con las correlaciones, estadísticamente significativas, obtenidas a nivel de cuadrículas para el número de incendios y la superficie quemada.

2.4. DISCUSIÓN

2.4.1. Tendencias anuales

Los incendios de rayos han representado en este periodo un porcentaje bajo del número total de incendios y de la superficie quemada; no obstante, su potencial no puede ser ignorado. La tendencia a agruparse en unos pocos eventos en los que se origina un porcentaje importante del total de incendios anuales y en los que se pueden ver afectadas miles de hectáreas son elementos que hay que tener presentes. La multiplicidad de incendios que se originan al mismo tiempo puede, además, afectar negativamente las posibilidades de extinción y control rápido de los mismos. De hecho, los incendios de rayos presentan una mayor desigualdad en las distribuciones de tamaños (una pequeña proporción de incendios son responsables de la mayor parte de la superficie quemada) que los incendios originados por otras causas (Capítulo 5). La mayoría de los incendios originados por rayos son extinguidos antes de que alcancen un tamaño destacable (como pone de manifiesto la elevada proporción de incendios de tamaño <0,1 ha), pero en algunas ocasiones pueden dar lugar a los más grandes registrados en España.

El incremento en los últimos años del número de incendios de rayos, parcialmente reflejado en la superficie quemada, aunque no directamente relacionado con el patrón general de incendios, es difícil de explicar. Aparentemente la consideración de los incendios de rayos en los datos estadísticos que han servido de base a este trabajo no han cambiado en el periodo de estudio y además la información analizada está contrastada con los datos publicados por los organismos responsables (ICONA, 1974 a 1994). Por

otro lado, considerar que un incendio ha sido ocasionado por rayos puede no ser fácil en determinados casos, debido al retraso en la aparición de un incendio visible o por originarse en parajes alejados, y por tanto se asume que existirá un cierto margen de error. La prolongada sequía que ha afectado a la mayor parte de España en los últimos años puede haber tenido alguna influencia. En el Capítulo 4 se muestra, en un estudio comparado de tres zonas de España peninsular, que la precipitación en el levante peninsular fue el factor meteorológico más relacionado con el número de incendios y con la superficie quemada anualmente (ver el Capítulo 4). Flannigan y Wotton (1991) analizaron en Canadá los diferentes parámetros asociados a las descargas eléctricas con la finalidad de encontrar los factores responsables de las igniciones. El parámetro climático que se encontró más relacionado con la eficacia de las descargas en el inicio de los incendios fue el contenido en humedad del mantillo situado en la base de los troncos (lugar en el que se inicia la mayoría de los incendios). No obstante sería preciso conocer si ha habido un aumento en el número de descargas eléctricas para poder establecer una relación causa-efecto de manera precisa. Por otro lado, hay que tener presente que una mayor acumulación de combustibles muertos puede aumentar la probabilidad de ignición de las descargas eléctricas. Por tanto, aun sin cambios importantes en el número de descargas se puede registrar un mayor número de incendios de rayos.

2.4.2. Patrón "natural" de incendios

El patrón actual de los incendios originados por rayos podría representar una aproximación a aspectos del régimen de incendios dominante en épocas de condiciones climáticas similares a las presentes y con escasa presencia humana. No obstante hay varias razones que nos impiden trasladar directamente la incidencia presente de los incendios de rayos a tiempos pasados: (1) un comportamiento posible de los incendios de rayos, en épocas previas a una supresión activa del fuego, sería la persistencia de las igniciones, originadas generalmente en condiciones desfavorables, como brasas hasta que las condiciones se hiciesen más favorables para la propagación del fuego (Minnich, 1987; Greenlee y Langenheim, 1990; Granström, 1993). Este hecho está avalado por la facilidad en la extinción de la mayor parte de los incendios de rayos antes de que alcancen tamaños importantes; (2) la competencia por los combustibles entre los incendios originados por rayos y por humanos (Heinselman, 1973; Minnich, 1989) es otro elemento a tener en cuenta. Heinselman (1973) ha mostrado para ecosistemas boreales que los combustibles y las condiciones climáticas son más importantes en el establecimiento del régimen de incendios que las fuentes de ignición (incendios originados por rayos o por humanos); (3) por último, Minnich et al. (1993) han documentado para áreas mediterráneas de California una proporción de un 2-3% entre

las descargas eléctricas que han alcanzado el suelo y los incendios registrados y sugiere que el potencial de los incendios de rayos no se encuentre totalmente desarrollado debido a la existencia de otras fuentes de ignición y al control de los incendios.

Asumiendo que el patrón actual de los incendios de rayos es un reflejo de condiciones más naturales, este estudio muestra que hay diferencias entre los patrones derivados de los dos tipos de incendios. A pesar de que la incidencia de los dos tipos de incendio a nivel de cuadrículas para toda la península ha presentado relaciones positivas (motivadas por la distinta probabilidad de las cuadrículas para que se inicien y propaguen incendios en ellas), la comparación en cada cuadrícula ha mostrado diferencias importantes. Así, los incendios de rayos tienden a producirse más centrados en la época de mayor incidencia, afectan a una mayor proporción de superficie arbolada, dan lugar a incendios de distinto tamaño y se producen a mayor altitud en relación a los originados por el hombre. Keeley (1982) mostró, para áreas de California, un patrón de distribución en alturas muy similar al obtenido en este trabajo. Varios autores han relacionado las características fisiográficas de un territorio con los incendios de rayos ocurridos tomando como base registros históricos. Así, Vankat (1983) indicó que el punto concreto de ignición no se localizaba al azar en relación a varios parámetros que definían la posición geográfica de ese punto. McRae (1992) encontró una relación entre los incendios originados por rayos y la meso-escala del relieve, esto es, diferencias locales en la altitud sin considerar la altitud general de la zona. Por otro lado, Minnich et al. (1993) sugieren que el diferente grado de influencia humana entre áreas de llanura y de montaña podría explicar en parte las diferencias entre la densidad de incendios de rayos en ambas zonas (mayor en áreas de montaña). Estas diferencias en el uso del territorio están también presentes en España peninsular, en la que las áreas forestales están localizadas fundamentalmente en zonas montañosas. La mayor proporción de superficie arbolada quemada por los incendios de rayos apoya también esta idea.

Las condiciones meteorológicas bajo las que se originan los incendios de rayos han sido también distintas a las registradas para los incendios humanos: las temperaturas han sido más elevadas, la velocidad del viento menor y el número de días desde la última lluvia más bajo. Estos datos sugieren que los incendios de rayos se pueden haber producido, en ciertos aspectos, en condiciones más moderadas. La ponderación por la superficie quemada se introdujo para valorar las condiciones en las que se ha quemado la mayor parte de la superficie. En general, esta ponderación no ha modificado los patrones generales. Además, únicamente se cuenta con un dato para cada variable por incendio, que puede o no corresponder con las situaciones en las que éste se propagó.

2.4.3. Incendios originados por rayos y por humanos: valoración regional

Más allá de la diferente incidencia de los dos tipos de incendios, no hay duda de que una proporción grande del territorio es de una manera u otra el resultado de la intervención humana. La extensión de los incendios y cómo se producen ha representado un cambio importante, desde situaciones previas, de dimensión nacional. En particular, si consideramos la escasa incidencia de los incendios en España y otros países de la cuenca Mediterránea hace sólo unas décadas (Delattre, 1993), el cambio en la actividad de los incendios ha tenido, muy probablemente, consecuencias importantes en gran parte de los ecosistemas peninsulares.

Los resultados obtenidos muestran que los incendios de rayos no han sido tan frecuentes (0,12 incendios en 10000 ha^{-1} $año^{-1}$) en comparación a otras áreas de tipo mediterráneo como California. Keeley (1982), usando procedimientos similares obtuvo valores de 0,31 y 1,29 para espacios naturales bajo jurisdicción estatal (California Department of Forestry, CDF) y federal (U.S. Forest Service, USFS) respectivamente durante la década de los 70. Las valores máximos obtenidos en alguno de estos espacios fueron de 1,34 y 3,93 frente al valor máximo de 0,32 obtenido para el sector biogeográfico de mayor frecuencia de incendios en España. Las frecuencias de incendios en España han sido comparables, en términos generales, con las obtenidas en territorios aparentemente menos proclives a incendios, como Suecia, en las que Granström (1993) obtuvo para algunas provincias valores de 0,23 incendios en 10000 ha^{-1} $año^{-1}$. Sin embargo, tomando como base la superficie afectada, la incidencia de los incendios de rayos es mayor en España que en California. Keeley (1982) obtuvo valores de 4,7 y 1,9 (hectáreas 10.000 ha^{-1} $año^{-1}$) para los espacios del CDF y USFS respectivamente. Cálculos similares para España peninsular proporcionan valores de 7,5 ha 10000 ha^{-1} $año^{-1}$.

Por otro lado, la frecuencia de incendios originados por el hombre no ha sido tan diferente (5,41; 1,34 y 3,66 incendios en 10000 ha^{-1} $año^{-1}$) para CDF, USSF y España peninsular. Sin embargo, tomando como base la superficie quemada, se han obtenido valores más altos en España peninsular (92,7 hectáreas en 10000 ha^{-1} $año^{-1}$) que en California (33,5 y 6,7 hectáreas en 10000 ha^{-1} $año^{-1}$ para CDF y USFS respectivamente). El resultado de estos cálculos es que el periodo de rotación global obtenido para los incendios de rayos y humanos en España peninsular ha sido de 100 años, con valores cercanos o inferiores a 50 años en numerosos sectores biogeográficos. El periodo de rotación medio para las espacios bajo jurisdicción del CDF (California) ascendería a un valor de 132 años. Trasladar estos cálculos a intervalos de recurrencia entre incendios puede ser problemático dado que el hombre extingue la mayor parte de los incendios y además éstos se propagan en un paisaje muy alterado. Quizás sea interesante considerar

que si los valores de los intervalos de recurrencia de incendios generalmente aceptados para el chaparral californiano (Keeley, 1982; Minnich, 1989; Minnich et al., 1993) son inferiores a los deducidos de los cálculos efectuados, es probable que tampoco sean realistas para un régimen de incendios "natural" en España. Intervalos de recurrencia tan largos como los sugeridos por López-Soria y Castell (1992) basados en los anillos de crecimiento de *Juniperus oxycedrus* en los que encontraron más de 300 años sin cicatrices de incendios pueden parecer demasiado altos y corresponder a una zona aislada. Además, la incidencia reciente de los incendios (por rayos o humanos) en su zona de estudio (sector 38, Sub-Bético) ha sido baja y, en cualquier caso, 300 años se corresponderían en España con un régimen de incendios histórico y no necesariamente "natural".

Los resultados de este trabajo muestran que los incendios de rayos tienden a registrarse con mayor importancia en ciertas áreas, particularmente en el este peninsular y hacia el interior, con un segundo núcleo en el Sistema Central. Este patrón coincide bastante con los patrones de circulación atmosférica descritos por Millán et al. (1991). Las bajas presiones que se originan en el interior de la península en el verano conducen masas de aire desde la periferia, con fuertes patrones de circulación desde el mar Mediterráneo hacia el interior a través de los sistemas montañosos costeros. Los patrones de incidencia de los incendios de rayos muestran también una concordancia aceptable con el número medio de días de tormenta registrados en el verano (Font, 1983). El sudoeste peninsular registra valores muy bajos (menos de 3 días de media) que van aumentando hacia el norte. En las áreas del Sistema Central y del Sistema Ibérico se superan los 10 días de media, con núcleos de hasta 15 y 20 días hacia el noreste peninsular. Por otro lado, el estudio preliminar de los datos proporcionados por la red de detección de rayos del Instituto Nacional de Meteorología (Manso, 1994) ha mostrado una concordancia aceptable entre el número de días de tormenta y el número de rayos registrados. Como una indicación de la importancia de las descargas eléctricas, el día 7 de agosto de 1992 se registraron más de 30000 rayos (descargas nube-tierra) en España. Aunque se solicitaron, estos datos no han estado disponibles para su análisis.

La mayor parte del territorio peninsular presenta un clima de tipo mediterráneo y está incluido en la región biogeográfica Mediterránea (Rivas-Martínez, 1987a). Muchas especies mediterráneas se considera que han estado expuestas al fuego durante milenios (Trabaud, 1981) y los ecosistemas de los que forman parte son muy estables frente a esta perturbación (Trabaud y Lepart, 1980). No obstante, el papel del fuego en la evolución de especies de clima mediterráneo ha sido cuestionado (López-Soria y Castell, 1992; Mesléard y Lepart, 1989), aunque consultar también Zedler (1995) sobre el significado evolutivo de ciertos rasgos compartidos por especies mediterráneas. Los incendios han estado ocurriendo (como una consecuencia inevitable de la acumulación de biomasa) o

del territorio peninsular, incluidas áreas de clima no propiamente Mediterráneo como el noroeste y norte peninsular (sectores 1 a 8).

A pesar del eficaz sistema de lucha contra el fuego y de la política de extinción de todos los incendios, en ciertas áreas del territorio peninsular los periodos de rotación asociados a los incendios originados por rayos han estado próximos a valores con significado ecológico. Parece por tanto razonable suponer que bajo condiciones de presión humana distinta, la incidencia de los incendios de rayos podría ser mucho mayor a la actual (Minnich, 1987; Minnich et al., 1993). El fuego ha sido señalado como un factor importante en la distribución de especies (Barton, 1993) y en ciertas regiones se ha encontrado una relación entre los incendios originados por rayos y la distribución de especies y ecosistemas (Manry y Knight, 1986; Granström, 1993). Parece por tanto sorprendente que el fuego haya sido contemplado tan escasamente en la interpretación de la distribución actual de especies y ecosistemas en España, aunque ha sido sugerido en alguna ocasión (Vélez, 1990a). Como consecuencia de este trabajo, habría que señalar que el papel del fuego en la configuración de la vegetación pasada y presente en España debería ser analizado en mayor profundidad.

Apéndice 2.I. Sectores biogeográficos, área total por sector, proporción de superficie forestal (expresada como proporción del área total), frecuencia de incendios (número de incendios en 10000 ha de superficie forestal y año) y periodo de rotación (número de años necesarios para que se queme el 100% del territorio asumiendo que no ha habido solapamiento entre los incendios) obtenidos para los incendios originados por rayos y los relacionados con el hombre en el periodo 1974-94.

	Sector biogeográfico	*Área total*	*Superficie forestal*	*Frecuencia de incendios*		*Periodo de rotación*	
		ha x 1000	(%)	*Rayos*	*Hombre*	*Rayos*	*Hombre*
1	Pirenaico oriental	700	79	0,10	0,91	3887	672
2	Pirenaico central	644	60	0,16	0,49	1521	669
3	Cántabro-Euskaldún	930	72	0,05	4,74	> 10000	156
4	Galaico Asturiano	1116	68	0,12	8,91	3037	48
5	Galaico-Portugués	1839	59	0,15	23,76	3676	33
6	Campurriano-Carrionés	400	89	0,03	3,69	> 10000	143
7	Ubiñense-Picoeuropeano	444	89	0,01	1,91	> 10000	259
8	Laciano-Ancarense	520	81	0,15	7,58	1396	45
9	Castellano-Cantábrico	590	60	0,10	2,12	> 10000	193
10	Riojano-Estellés	610	38	0,16	1,88	5273	355
11	Bárdenas-Monegros	1751	23	0,11	0,74	2018	848
12	Somontano-Aragonés	1788	45	0,22	1,13	787	166
13	Setabense	1116	39	0,26	5,33	79	37
14	Valenciano-Tarraconense	1099	33	0,32	5,44	242	43
15	Vallesano-Empordanés	811	57	0,05	5,12	> 10000	74
16	Castellano-Duriense	2070	9	0,23	3,92	> 10000	159
17	Celtibérico-Alcarreño	2920	50	0,23	0,51	1247	1104
18	Maestracense	1518	65	0,23	0,76	498	252
19	Manchego	5220	20	0,14	1,07	1941	168
20	Almeriense	746	47	0,01	0,89	> 10000	239
21	Murciano	448	30	0,07	1,61	3149	913
22	Alicantino	248	20	0,06	1,48	> 10000	539
23	Guadarrámico	1710	48	0,17	2,28	2582	292
24	Bejarano-Gredense	340	72	0,32	3,56	1326	121
25	Salmantino	1558	45	0,08	1,50	1339	121
26	Orensano-Sanabriense	1606	58	0,26	9,62	1702	36
27	Leonés	590	39	0,09	3,32	> 10000	89
28	Ibérico-Soriano	720	73	0,08	0,95	3374	389
28	Toletano-Tagano	2782	56	0,08	2,11	2792	118
30	Mariánico-Monchiquense	5555	56	0,02	1,00	> 10000	195
31	Gaditano	426	69	0,01	4,33	> 10000	81
32	Onubense litoral	398	30	0,00	2,99	> 10000	283
33	Hispalense	2360	8	0,04	5,27	9405	75
34	Rondeño	294	40	0,05	6,91	> 10000	50
35	Malacitano-Almijarense	544	26	0,07	4,10	> 10000	53
36	Alpujarreño-Gadorense	227	45	0,03	2,13	> 10000	90
37	Nevadense	240	77	0,02	0,95	> 10000	283
38	Sub-Bético	1090	48	0,19	1,29	> 10000	625
39	Guadiciano-Bacense	470	43	0,03	0,39	> 10000	2250

Capítulo 3

Relaciones entre territorios delimitados por series de vegetación potencial y el régimen de incendios reciente en España peninsular

3.1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones climáticas condicionan la distribución de las distintas formaciones vegetales a nivel del planeta (Woodward, 1987) y, de igual manera, en España (Rivas-Martínez, 1981). El clima es decisivo a la hora de determinar la productividad primaria de los ecosistemas (Lieth y Whittaker, 1987), y, al mismo tiempo ejerce una influencia determinante sobre el régimen de incendios de numerosos ecosistemas (Chandler et al., 1983; Clark, 1989a; Johnson et al., 1990). En España y en otros países de su entorno los incendios forestales han ido adquiriendo en los últimos tiempos una importancia cada vez mayor (Capítulo 1; Vélez, 1991; Delattre, 1993). La tendencia creciente en el número anual de incendios es el patrón general registrado en España en los últimos años. La superficie quemada anualmente registra mayores fluctuaciones y en los últimos años no ha presentado una tendencia tan clara. Por otro lado, los incendios forestales están afectando cada vez a una mayor proporción del territorio nacional (Capítulo 1).

Por régimen de incendios se entiende el tipo de historia de incendios que caracteriza un territorio. Algunos componentes del régimen de incendios son: la frecuencia espacial y temporal, el tipo de incendio, la magnitud, la estacionalidad, el periodo de rotación, el intervalo de recurrencia y el patrón espacial (Heinselman, 1973; Sousa, 1984; Turner, 1989; Trabaud, 1989; Johnson, 1992; Davis y Burrows, 1995). El régimen de incendios es una propiedad emergente de los paisajes que expresa las interacciones entre factores físicos (condiciones climáticas y meteorológicas), biológicos (tipo de vegetación y productividad de ésta) y las fuentes de ignición presentes en el territorio. En regiones humanizadas las alteraciones inducidas por medio de la fragmentación del paisaje, las modificaciones en la distribución de los combustibles y en los patrones de ignición introducen factores adicionales, y en ocasiones determinantes, del régimen de incendios (Baker, 1992).

Dado que durante las últimas décadas se han producido incendios forestales en gran parte del territorio español, la pregunta que surge es si las condiciones ecológicas de los distintos territorios se manifiestan en el régimen de incendios. El planteamiento de este trabajo ha consistido en caracterizar el régimen de incendios histórico de territorios con vegetación potencial similar y analizar cuáles han sido los patrones de incidencia de los mismos durante los últimos años. Junto a esta caracterización es importante conocer otros aspectos determinantes del régimen de incendios, tales como: ¿En qué condiciones meteorológicas han ocurrido los incendios? ¿Ha sido determinante la intervención

humana por medio de las fuentes de ignición? ¿Cómo eran, desde el punto de vista de los usos forestales, los territorios en los que se ha analizado el régimen de incendios?

Las condiciones meteorológicas inciden en el comportamiento de los incendios forestales tanto indirecta (determinando el grado de humedad de los combustibles vegetales) como directamente (determinando la propagación del fuego) (Rhotermel, 1983). Por tanto, se puede pensar que incendios originados en condiciones distintas pueden dar lugar a patrones también distintos. El papel del hombre se ha mostrado como decisivo en el régimen de incendios en territorios humanizados (Naveh, 1995; Capítulos 4 y 5). Una valoración de esta incidencia es la causa de inicio del incendio, útil como expresión de la intencionalidad o accidentalidad de los incendios y de su carácter más o menos natural. Por último, las características del territorio (tipo, estructura y distribución espacial de los combustibles) condicionan el comportamiento y la propagación del fuego (Minnich, 1983; Turner et al., 1989a).

En este trabajo se han realizado dos aproximaciones metodológicas en cierta medida complementarias: (1) se han representado espacialmente, en territorios delimitados a partir de series de vegetación potencial, las variables asociadas al régimen de incendios y a los factores externos analizados y (2) se han efectuado análisis multivariantes de ordenación para obtener información de las relaciones existentes entre los distintos conjuntos de variables establecidos.

Los objetivos principales de este trabajo son: (1) Determinar los patrones de variación de las variables del régimen de incendios en territorios ecológicamente homogéneos, en tanto que presentarían un tipo de vegetación potencial similar, y analizar las similitudes entre territorios pertenecientes a series de vegetación con el mismo tipo de vegetación arbórea. (2) Analizar la relación entre las variables empleadas para definir el régimen de incendios y los factores externos que puedan haberlo condicionado. Los factores externos se han agrupado en torno a tres conjuntos de variables: condiciones meteorológicas, causa de inicio del incendio y estructura forestal del territorio.

Los territorios en los que se ha dividido España peninsular en este trabajo están basados en una caracterización fitosociológica de la vegetación. Las series de vegetación (Rivas-Martínez, 1981, 1987a) engloban las distintas comunidades vegetales, etapas de la sucesión vegetal, que podrían encontrarse en un mismo lugar y que en ausencia de perturbaciones se considera que conducirían a una etapa madura en equilibrio con las condiciones ambientales. La hipótesis básica es que las distintas condiciones ambientales reflejadas por un mismo tipo de vegetación potencial deben manifestarse en el régimen de incendios registrado en ese territorio. De aquí se deduciría: (1) que territorios

próximos en función del régimen de incendios perteneciesen a tipos de vegetación similar y (2) que las variables externas se relacionasen de manera homogénea e importante con el régimen de incendios calculado para territorios con vegetación potencial afin.

3.2. MATERIAL Y MÉTODOS

Las datos empleados en este trabajo proceden de tres fuentes de información distintas: (1) datos de incendios forestales; (2) territorios pertenecientes a las distintas series de vegetación potencial y (3) usos del territorio. En los tres casos los datos iniciales se han obtenido para cuadrículas de 10x10 km a partir de las que se han derivado las variables analizadas, a nivel de los distintos territorios.

3.2.1. Incendios forestales registrados en el periodo 1974-94

Los datos provienen de los registros informatizados de los "Partes de Incendio Forestal" proporcionados por ICONA. A partir de la información disponible, todos los incendios han sido asignados a cuadrículas de 10x10 km basadas en la malla UTM. El número total de incendios ha sido de aproximadamente 174.000 que han afectado a más de 4,6 millones de hectáreas. De estos registros se han obtenido también las variables meteorológicas (temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y días desde la última lluvia) empleadas en los análisis y que corresponden al día de inicio del incendio. La causa de inicio del incendio indicada en los partes se ha clasificado en cinco tipos: quema de pastos, rayos, negligencias, intencionados y desconocidos. En negligencias se engloban los incendios en los que habiendo sido determinada la causa de inicio no se apreció intencionalidad. Para ciertas provincias y años no se dispone de información y no están incluidas. Las provincias de Álava y Navarra se han excluido de este trabajo al no disponer de información sobre ellas (ver el Capítulo 1 para más detalles).

3.2.2. Series de vegetación

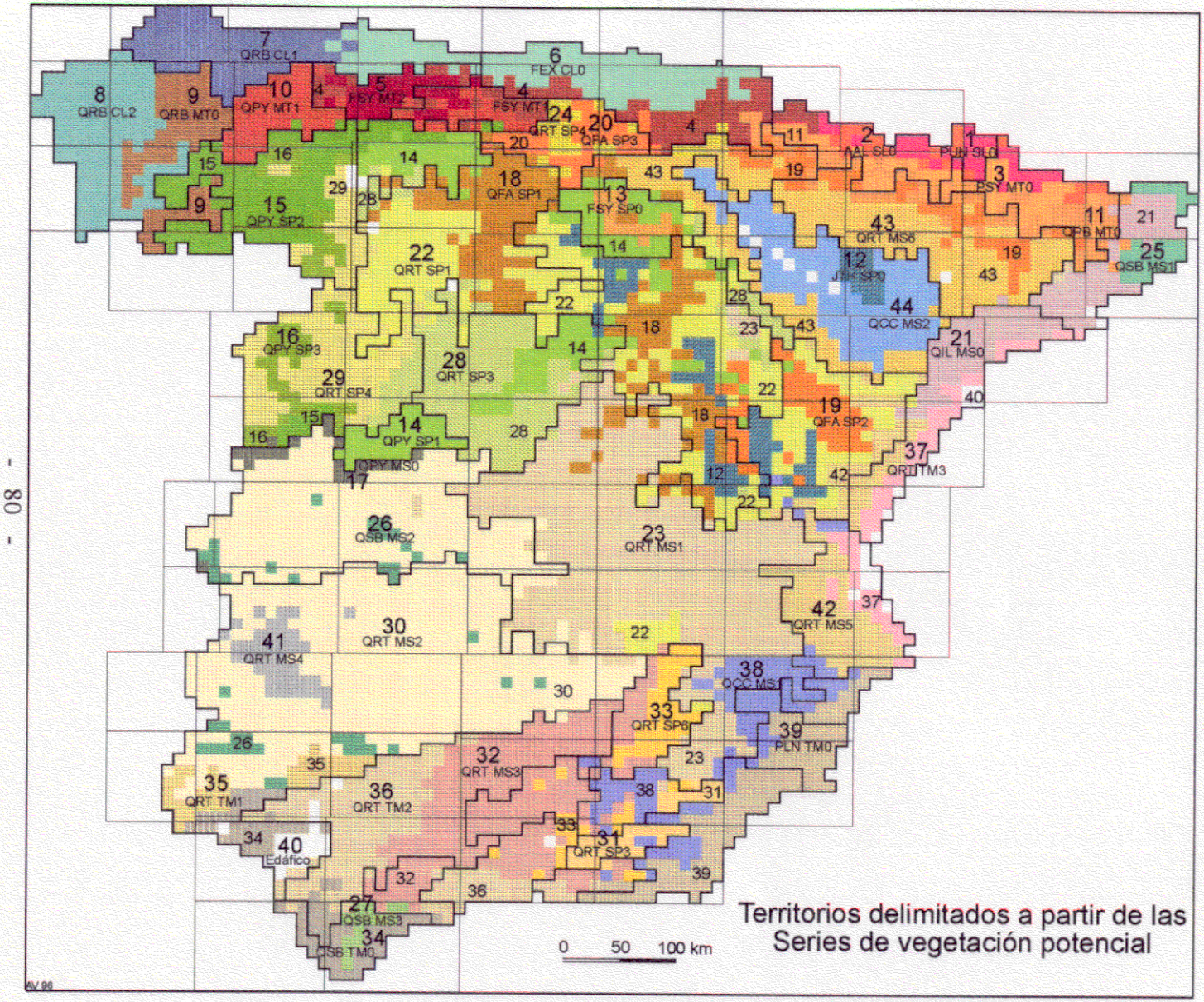
La serie de vegetación dominante en cada una de las 5006 cuadrículas de 10x10 km que integran España peninsular se ha establecido a partir del Mapa de las Series de Vegetación de España a escala 1:400.000 (Rivas-Martínez, 1987a). En los casos en que dos o más series estuviesen presentes en la misma cuadrícula se superponía una malla regular de 9 puntos (o bien de 25 puntos en caso de duda) para establecer la serie dominante por medio del conteo de los puntos superpuestos a cada serie. Otros criterios adicionales fueron: (1) las series edafófilas, al igual que la superficie ocupada por agua y la urbanizada, no se han tenido en cuenta en el conteo de puntos. Las faciaciones en que se dividen ciertas series tampoco se han tenido en cuenta; (2) las series subalpinas y alpinas y las oro- y crioro-mediterráneas se han considerado directamente al nivel de grandes series. Estas series se agregan a las montanas y supramediterráneas para establecer la serie dominante, frente a series de pisos inferiores, con objeto de mantener cierta continuidad en los pisos bioclimáticos en áreas de montaña; (3) Las series pertenecientes a un mismo grupo (grandes series) se han sumado frente a otras series presentes, de manera que la dada como dominante en cada cuadrícula fuese representativa de la mayor parte del territorio incluido en ella y (4) algunas cuadrículas con más de 2/3 del territorio ocupado por series edafófilas han sido mantenidas en esta categoría y se han excluido de los análisis posteriores.

Por medio de este muestreo se delimitaron un total de 82 tipos de series de vegetación: 31 en la región Eurosiberiana y 51 en la región Mediterránea (ver el Anexo 13). Con la intención de simplificar el análisis espacial, las series con una representación escasa (menos de 14 cuadrículas) se han fusionado a las más similares en función de la especie dominante y del piso bioclimático. Además, algunas cuadrículas aisladas pertenecientes a series distintas a las circundantes se han asimilado a la más próxima con la misma finalidad. De esta manera los 82 tipos de vegetación iniciales se convirtieron en 38. Por otro lado, determinados tipos de vegetación con una gran extensión territorial se han fragmentado tomando como base los sectores biogeográficos (Rivas-Martínez, 1987b) a los que pertenecen, con lo que al final, se han obtenido 43 tipos de vegetación. Debido a estas modificaciones en la extensión de las series de vegetación originales se ha adoptado la denominación de *territorios* para nombrar las 43 unidades de vegetación, delimitadas a partir de las series de vegetación potencial, empleadas en los análisis (Figura 3.1 y Tabla 3.1). Los territorios con la misma especie arbórea dominante se han agrupado para formar lo que hemos denominado *tipos de vegetación*. La Tabla 3.1 muestra los datos generales de los 43 territorios y su asignación a los 9 tipos de vegetación: pinares, hayedos, robledales, rebollares, quejigares, sabinares, encinares, alcornocales y coscojares.

3.2.3. Delimitación del territorio forestal actual

Para evaluar el territorio forestal en cada cuadrícula de 10x10 km se ha empleado el Mapa de Usos y Aprovechamientos a escala 1:1.000.000 (MAPA, 1989). Esta síntesis cartográfica está basada en los mapas de usos a escala 1:50.000 elaborados a partir de fotografías aéreas tomadas en los años 1984-85. El procedimiento seguido consistió en estimar el área cubierta por cada una de las 5 clases consideradas como forestales: (1) arbolado de coníferas; (2) arbolado de frondosas; (3) arbolado mixto de coníferas y frondosas; (4) matorrales y (5) pastizales (siempre que se dieran con recubrimiento de arbolado). Estas cinco clases constituirían el territorio forestal potencial al que hacen referencia los incendios. El método empleado en esta estimación se describe en el Capítulo 2. En el Anexo 12 se presentan los valores obtenidos para cada cuadrícula.

El área total estimada para España peninsular, excluidas Álava y Navarra, ha sido de 48,4 millones de hectáreas de las cuales 21,9 (45,2%) están ocupadas por superficie forestal que se reparten en un 43,9% de arbolado (clases 1, 2 y 3) y un 56,1% de matorrales y arbolado disperso sobre pastos (clases 4 y 5). Para cada uno de los 43 territorios considerados se ha calculado la superficie forestal total (clases 1 a 5), la superficie desarbolada (clases 4 y 5), la superficie de coníferas (clases 1 y 3) y la superficie de frondosas (clases 2 y 3). El arbolado mixto se ha contabilizado doblemente, en coníferas y en frondosas.



Código	Piso bioclimático	Especie dominante
	Subalpino	
1		P.uncinata
2		A.alba
3		P.sylvestris
	Montano	
5		F.sylvatica (+J.nana)
4		F.sylvatica (+Q.robur)
9		Q.robur
10		Q.pyrenaica (+B.celtiberica)
11		Q.pubescens (+Q.ilex)
	Colino	
6		F.excelsior (+Q.robur)
7		Q.robur
8		Q.robur
	Supramediterráneo	
12		J.thurifera
13		F.sylvatica
14		Q.pyrenaica (+J.nana)
22		Q.rotundifolia
24		Q.rotundifolia
33		Q.rotundifolia (+)
15		Q.pyrenaica (+)
16		Q.pyrenaica
18		Q.faginea
19		Q.faginea (+J.nana)
20		Q.faginea
28		Q.rotundifolia
29		Q.rotundifolia
31		Q.rotundifolia
	Mesomediterráneo	
21		Q.ilex
30		Q.rotundifolia (+Q.pyrenaica)
17		Q.pyrenaica
23		Q.rotundifolia
42		Q.rotundifolia
43		Q.rotundifolia
25		Q.suber (+Q.canariensis)
26		Q.suber
32		Q.rotundifolia (+)
41		Q.rotundifolia
38		Q.coccifera
44		Q.coccifera
27		Q.suber
	Termomediterráneo	
37		Q.rotundifolia (+P.lentiscus)
34		Q.suber (+O.sylvestris)
35		Q.rotundifolia
36		Q.rotundifolia
39		P.lentiscus (+Espinales)

Figura 3.1. Territorios delimitados a partir de las series de vegetación consideradas en España peninsular (a partir de Rivas-Martínez, 1987a). En la leyenda se muestran los códigos de los 43 territorios considerados. Los códigos alfanuméricos de 5 letras y un número están formados por la especie dominante (género en la primera letra y especie en la segunda y tercera) y el piso bioclimático (letras cuarta y quinta; el número final indica un orden secuencial). Los rectángulos grandes corresponden a las hojas 1:200.000 empleadas como referencia en la asignación de los incendios a una cuadrícula determinada. Los restantes polígonos delimitan los sectores biogeográficos en que se divide España peninsular (a partir de Rivas-Martínez, 1987b).

3.2.4. Variables empleadas

Las 34 variables calculadas para los 43 territorios se describen en los Apéndices 3-I y 3-II y se han agrupado en variables descriptoras del régimen de incendios y variables descriptoras de los factores externos.

3.2.4.1. Variables descriptoras del régimen de incendios

El régimen de incendios se ha caracterizado por un conjunto de variables que describen aspectos referidos a: (1) la incidencia relativa de los incendios; (2) el reparto espacial en el territorio; (3) las proporciones atribuidas a incendios de distinto tamaño y (4) la variabilidad anual en el número de incendios, en la superficie quemada y en el momento en que se producen. Estos cuatro aspectos están representados por una o más variables. Estas variables (Apéndice 3.I) se han dividido a su vez en dos grupos que se han analizado por separado: (1) variables relativas al número de incendios y (2) variables relativas a la superficie quemada.

3.2.4.2. Variables descriptoras de los factores externos

Los factores externos se han dividido en tres grupos (Apéndice 3.II):

A. *Condiciones meteorológicas asociadas a los incendios*

El cálculo de las variables meteorológicas se ha realizado de dos maneras: (1) condiciones en las que se han registrado la mayoría de los incendios. Se han obtenido a partir de los valores medios para cada variable y se han relacionado con los aspectos del régimen relativos al número de incendios y (2) condiciones en las que se ha quemado la

mayor parte de la superficie. Corresponden a los valores de cada variable ponderados por la superficie quemada en cada incendio y se han relacionado con los aspectos del régimen relativos a la superficie quemada.

B. Causa de origen de los incendios

Se han establecido también dos grupos de variables: (1) proporción en el número de incendios de cada una de las causas. Estas variables se han relacionado con las variables del régimen relativas al número de incendios y (2) proporción de superficie quemada por cada una de las causas. Estas variables se han relacionado con las variables del régimen relativas a la superficie quemada.

C. Estructura forestal del territorio

Las cuatro variables relativas a los usos forestales de los territorios se han relacionado con los aspectos del régimen relativos al número de incendios y a la superficie quemada.

3.2.5. Procedimientos

3.2.5.1. Análisis de ordenación

La relación entre los distintos territorios, caracterizados por las variables del régimen de incendios, ha sido explorada mediante Análisis de Componentes Principales (ACP). De manera preliminar se realizaron tres ordenaciones diferentes en las que se incluyeron: (1) todas las variables del régimen de incendios; (2) las variables relativas al número de incendios y (3) las variables relativas a la superficie quemada. Estas tres ordenaciones se compararon entre si mediante un Análisis de "Procrustes" Generalizado (Digby y Kempton, 1986) con el fin de evaluar el comportamiento de cada conjunto de variables. El porcentaje de la varianza obtenido de la ordenación de las 12 variables en conjunto (6,19%) se eleva hasta un 50,1% para las 6 variables referidas al número de incendios y un 43,7% para las 6 variables referidas a la superficie quemada. Por tanto, se han considerado muy adecuados los dos grupos establecidos y se han mantenido en los restantes análisis.

Posteriormente, con el fin de evaluar la importancia de los distintos conjuntos de factores externos sobre las variables del régimen de incendios, se realizaron ordenaciones constreñidas (ter Braak, 1986). En estas técnicas los ejes de ordenación

obtenidos, *las variables de respuesta*, están forzados a ser una función lineal de un conjunto de *variables predictoras*, en nuestro caso los distintos conjuntos de factores externos. Estas ordenaciones en el contexto lineal y basadas en ACP se denominan Análisis de Redundancia (Rao, 1964, ter Braak, 1994). Con el fin de valorar la variación residual después de ajustar el efecto de las variables de interés (factores externos) se realizaron ordenaciones híbridas (Daudin, 1980; ter Braak, 1988) de manera que sólo los dos primeros ejes eran constreñidos mientras que los dos restantes no. La comparación por medios de los valores propios entre el primer eje constreñido (canónico) y el primer eje libre obtenido permite una evaluación de la adecuación entre las dos matrices (ter Braak y Prentice, 1988; Escudero et al., 1994). Valores próximos al 100% indicarían una buena correspondencia entre ambos conjuntos de datos (ter Braak, 1986).

La eficacia de las ordenaciones canónicas efectuadas se ha verificado por medio del test de permutaciones de Monte Carlo (n=100) para el primer eje canónico. Las variables del régimen de incendios y las condiciones meteorológicas asociadas han sido transformadas por funciones logarítmicas (y=ln(x+1)) y estandarizadas con media 0 y varianza 1 para hacerlas comparables entre sí. Los restantes conjuntos de variables (causas y usos forestales) han sido transformadas logarítmicamente (y=ln(x+1)). Para el análisis espacial de los datos se ha empleado el Sistema de Información Geográfica IDRISI (Eastman, 1992). Los análisis de ordenación se han efectuado con el programa CANOCO 3.1 (ter Braak, 1987a).

3.2.5.2. Interpretación de los diagramas de ordenación

Un "biplot" es un diagrama de ordenación basado en un modelo lineal que puede consistir en 1, 2 ó 3 conjuntos de puntos (Gabriel, 1971). En las ordenaciones basadas en ACP y Análisis de Redundancia es posible elegir entre dos métodos de escalado de los pesos ("scores") según los objetivos perseguidos en los análisis (ter Braak, 1994). Para responder a las cuestiones planteadas en el primer objetivo (*régimen de incendios y territorios*) por medio de ACP se han obtenido "biplot" de distancias entre los territorios. Las cuestiones planteadas en el segundo objetivo (*régimen de incendios y factores externos*) se han respondido por medio de Análisis de Redundancia y "biplot"

Tabla 3.1. Piso bioclimático, especie arbórea de referencia y códigos de los 43 territorios analizados y que se muestran en la Figura 3.1. Se incluye también el tipo de vegetación al que se ha asignado, el área total de cada territorio y la proporción de superficie forestal.

Código	*Piso bioclimático*	*Especie arbórea de referencia*	*Tipo de vegetación*	*Area total* ha x 1000	*Superficie forestal* %
	Región Eurosiberiana				
1	subalp	*Pinus uncinata*	Pinares	267	54%
2	subalp	*Abies alba*	Pinares	204	52%
3	altimont	*Pinus sylvestris*	Pinares	390	81%
5	mont/subalp	*Fagus sylvatica / Juniperus nana*	Hayedos	368	90%
4	mont	*Fagus sylvatica / Quercus robur*	Hayedos	478	84%
9	mont	*Quercus robur*	Robledales	698	62%
10	mont (+)	*Q. pyrenaica / Betula celtiberica*	Rebollares	718	84%
11	mont	*Quercus pubescens / Quercus ilex*	Hayedos	717	77%
6	col/mont	*Fraxinus excelsior / Quercus robur*	Robledales	1039	71%
7	col/mont	*Quercus robur*	Robledales	796	65%
8	col	*Quercus robur*	Robledales	1111	56%
	Región Mediterránea				
12	supra	*Juniperus thurifera*	Sabinares	800	67%
13	supra	*Fagus sylvatica*	Hayedos	150	81%
14	supra	*Q. pyrenaica (+ Juniperus nana)*	Rebollares	1760	63%
22	supra	*Quercus rotundifolia*	Encinares	3124	34%
24	supra	*Quercus rotundifolia*	Encinares	180	76%
33	supra	*Quercus rotundifolia (+)*	Encinares	560	71%
15	supra/meso	*Quercus pyrenaica (+)*	Rebollares	1306	74%
16	supra/meso	*Quercus pyrenaica*	Rebollares	552	50%
18	supra/meso	*Quercus faginea*	Quejigares	1930	30%
19	supra/meso(+)	*Q. faginea (+ Juniperus nana)*	Quejigares	1000	64%
20	supra/meso	*Quercus faginea*	Quejigares	400	52%
28	supra/meso	*Quercus rotundifolia*	Encinares	1840	37%
29	supra/meso	*Quercus rotundifolia*	Encinares	1296	37%
31	supra/meso(+)	*Quercus rotundifolia*	Encinares	340	69%
21	meso/supra	*Quercus ilex*	Encinares	1071	51%
30	meso/supra	*Q. rotundifolia / Q. pyrenaica*	Encinares	6910	56%
17	meso	*Quercus pyrenaica*	Rebollares	208	65%
23	meso	*Quercus rotundifolia*	Encinares	4570	18%
42	meso	*Quercus rotundifolia*	Encinares	1162	50%
43	meso	*Quercus rotundifolia*	Encinares	1883	31%
25	meso	*Q. suber (+ Quercus canariensis)*	Alcornocales	218	59%
26	meso	*Quercus suber*	Alcornocales	414	81%
32	meso	*Quercus rotundifolia (+)*	Encinares	2400	20%
41	meso	*Quercus rotundifolia*	Encinares	391	8%
38	meso	*Quercus coccifera*	Coscojares	1210	40%
44	meso	*Quercus coccifera*	Coscojares	1212	22%
27	meso/termo	*Quercus suber*	Alcornocales	140	83%
37	termo/meso	*Q. rotundifolia (+Pistacia lentiscus)*	Encinares	580	18%
34	termo	*Q.suber / Olea sylvestris*	Alcornocales	746	54%
35	termo	*Quercus rotundifolia*	Encinares	354	69%
36	termo	*Quercus rotundifolia*	Encinares	1452	12%
39	termo	*Pistacia lentiscus (+)*	Coscojares	1032	32%

Tabla 3.1 (Continuación) Los territorios están ordenados en función de la región biogeográfica y el piso bioclimático mayoritario. Las barras (/) que aparecen en ciertos territorios separando pisos bioclimáticos y especies dominantes indican que en el territorio considerado había cuadrículas pertenecientes a los dos pisos o especies. El signo (+) tiene un significado similar e indica agregaciones puntuales de algunas cuadrículas con pisos bioclimáticos y/o especies dominantes distintas a la indicada (ver Material y Métodos para más detalles). Los pisos bioclimáticos considerados para la región Eurosiberiana son: subalpino, alti-montano, montano y colino. Los considerados para la región Mediterránea son: supra-, meso- y termo-mediterráneo.

de correlaciones. La interpretación en los "biplot" de distancias de la relación *régimen de incendios y territorios* se haría trazando una línea desde cada variable del régimen de incendios al centro del diagrama y proyectando los territorios sobre esa línea. De esta manera se obtendrían los valores ajustados de cada territorio para esa variable. Los territorios cuya proyección se situase más próxima a la variable en cuestión son los que tendrían un valor más alto para esa variable. El mismo procedimiento de proyección aplicado en los "biplot" de correlación para la relación entre las variables del régimen de incendios nos daría el rango de correlaciones de las distintas variables con respecto a la que estemos haciendo la proyección. La relación *régimen de incendios y factores externos* tendría un significado similar al anterior y nos informaría de las relaciones entre los dos conjuntos de variables. Estos dos tipos de "biplot" son los que están optimizados (ter Braak, 1994) en este tipo de diagramas de ordenación ("biplot" de correlación) y son a los que se atenderá en la interpretación de los resultados.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Régimen de incendios y territorios de vegetación potencial similar

Los valores de las variables del régimen referidas al número de incendios se muestran en la Figura 3.2A-F y las referidas a la superficie quemada en la Figura 3.3A-F. Estas dos figuras toman como base los territorios delimitados a partir de las series de vegetación potencial (Figura 3.1). Las ordenaciones de estos dos grupos de variables por medio de ACP proporcionaron porcentajes de la varianza explicada por los ejes I y II menores para el número de incendios (58%) que para la superficie quemada (76%), siendo elevados, en su conjunto, en ambos casos (Figura 3.4).

3.3.1.1. Variables relacionadas con el número de incendios y tipos de vegetación

Las variables más importantes asociadas con el primer eje (Figura 3.4A y Apéndice 3.I para los códigos de las variables) fueron la frecuencia de incendios (FR_TOT) y la proporción de cuadrículas con ≥ 50 ha quemadas (ID_50). Estas dos variables estuvieron también positivamente relacionadas con el segundo eje. La variable más importante en el segundo eje, y relacionada negativamente con él, fue el porcentaje de incendios grandes (NUM_500). La variabilidad anual, tanto en el número de incendios (CV_NUM) como en la época de inicio (CV_DIA), estuvo positivamente relacionada con los dos ejes. La proporción de incendios medianos (NUM_50) tuvo una importancia menor en los patrones de variación de los territorios.

El "biplot" de distancias (Figura 3.4A) respecto al número de incendios separó aceptablemente los territorios agrupados bajo el mismo tipo de vegetación. Los territorios de *robledal* se separaron bien del resto de los grupos y aparecen asociados a frecuencias de incendios muy altas y a un porcentaje alto de cuadrículas afectadas (Figura 3.2A y D). Los territorios de *rebollar* han estado igualmente asociados a estas dos variables y se han solapado en parte con alguno de los territorios correspondientes a *encinares*, que en algunos casos como en el sur y levante peninsular han presentado también frecuencias relativamente altas de incendios. En la mayor parte de los territorios de *encinar* fue la proporción elevada de incendios medianos/grandes (Figura 3.2E) lo que los separó en el diagrama de ordenación de los restantes tipos de vegetación establecidos. La distribución de los territorios de *alcornocal* ha quedado incluida dentro de la formada por los territorios de *encinar*. Los territorios de *quejigar* presentaron una

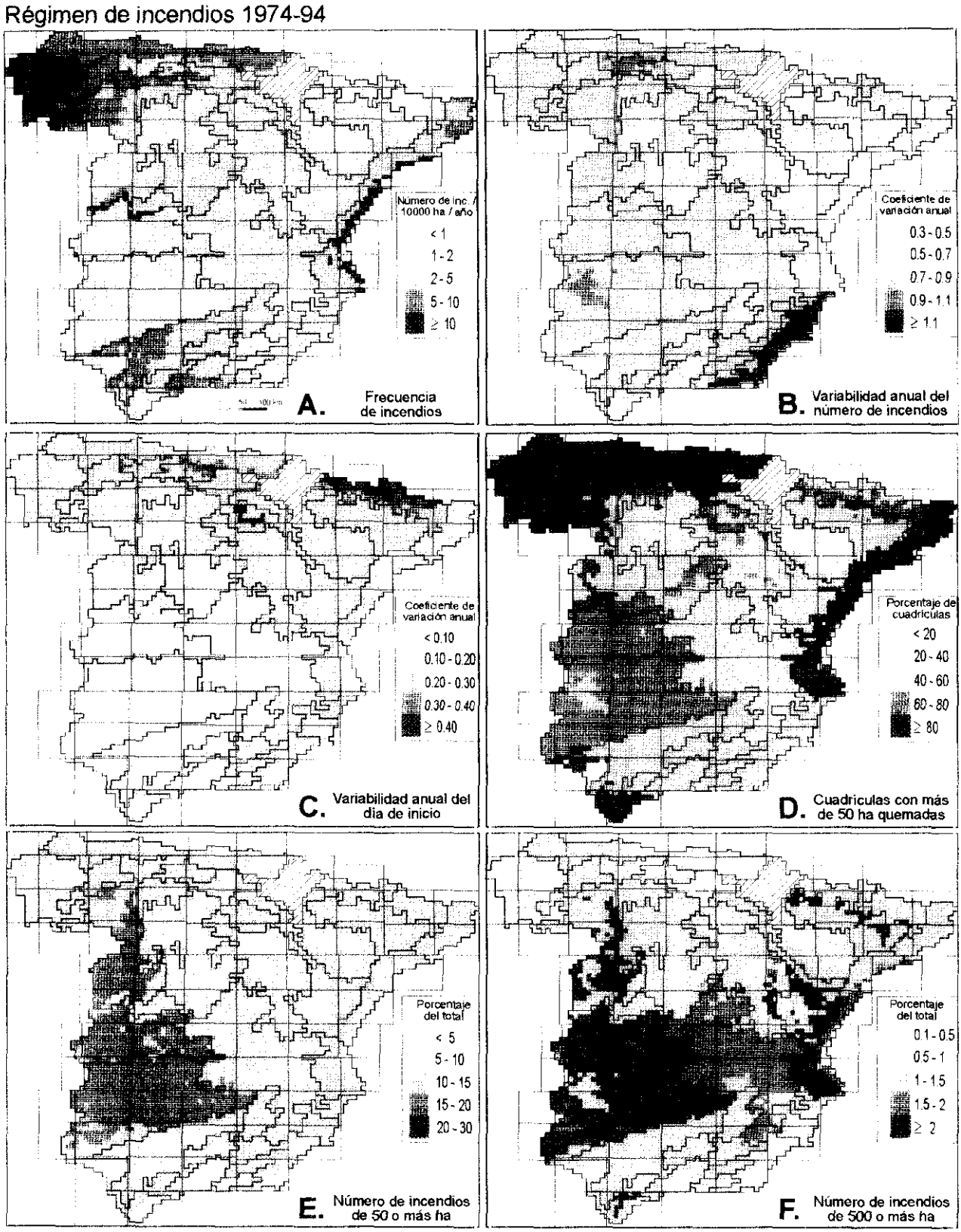


Figura 3.2. Mapas de las variables del régimen referidas al número de incendios en los 43 territorios definidos en la Figura 3.1 durante el periodo 1974-94: (A) frecuencia de incendios; (B) variabilidad en el número de incendios; (C) variabilidad estacional; (D) incidencia espacial; (E) importancia relativa de los incendios medianos/grandes y (D) importancia relativa de los incendios grandes; (ver el Apéndice 3.1 para las definiciones de las variables).

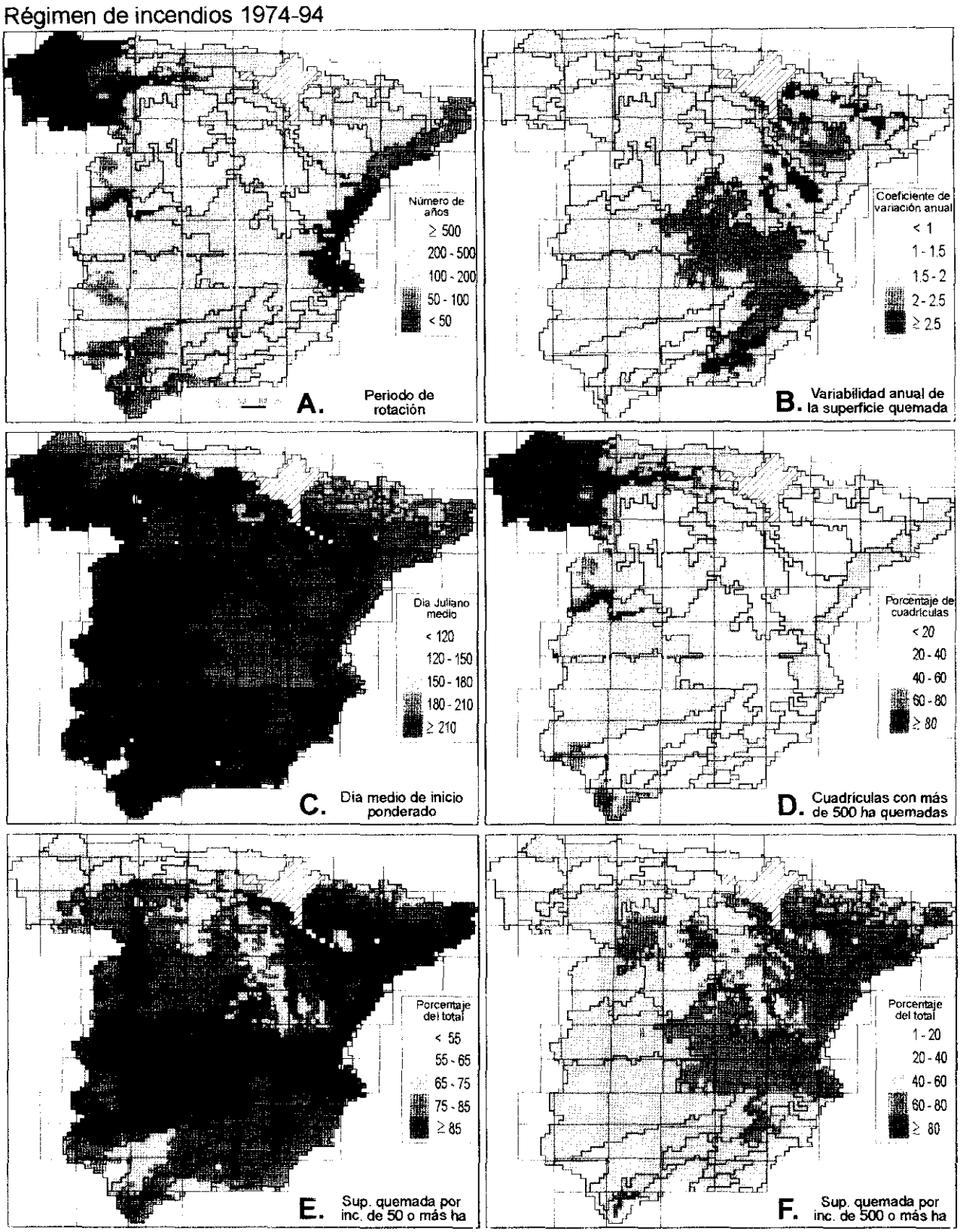


Figura 3.3. Mapas de las variables del régimen de incendios referidas a la superficie quemada en los 43 territorios definidos en la Figura 3.1 durante el periodo 1974-94: (A) periodo de rotación; (B) variabilidad en la superficie quemada; (C) estacionalidad; (D) incidencia espacial; (E) importancia relativa de los incendios medianos/grandes y (F) importancia relativa de los incendios grandes; (ver el Apéndice 3.1 para las definiciones de las variables).

distribución amplia y se situaron entre los territorios correspondientes a *hayedos* y a *encinares*. Los territorios de *hayedos* y de *coscojares* se han caracterizado por presentar una gran variabilidad anual tanto en el número de incendios como en la época en que éstos se produjeron (Figura 3.2B y C), y fueron similares en cierta medida a los territorios de *pinar*. Por otra parte, los territorios de *pinar*, *coscojar*, *sabinar* y algunos territorios agrupados en *encinares* presentaron valores bajos de frecuencia de incendios y proporciones bajas de cuadrículas afectadas.

3.3.1.2. Variables relacionadas con la superficie quemada y tipos de vegetación

El primer eje (Figura 3.4B) estuvo positivamente relacionado con la proporción de cuadrículas con ≥ 500 ha quemadas (ID_500) y negativamente relacionado con la proporción de superficie quemada por incendios medianos/grandes y grandes (SUP_50 y SUP_500) y con la variabilidad anual en la superficie quemada (CV_SUP). En el segundo eje la variable más importante fue el periodo de rotación (RT_TOT). Además, negativamente relacionados y con importancia similar entre ellas se encontraron la proporción de cuadrículas con ≥ 500 ha quemadas, el momento en que se produjeron (DJS_PD) y la proporción de superficie quemada por incendios medianos/grandes.

En función de las variables relativas a la superficie quemada, el "biplot" de distancias (Figura 3.4B) permitió separar bastante bien los territorios agrupados bajo la misma especie dominante. Los territorios de *robledal* y *rebollar* han estado asociados a una proporción alta de cuadrículas con ≥ 500 ha quemadas y en la mayor parte de los casos periodos de rotación cortos (Figura 3.3D y A). La importancia relativa alta de la superficie quemada por incendios medianos/grandes caracterizó a los territorios de *encinar*. Dentro del grupo *encinares* hubo territorios con periodos de rotación altos, que se solapan con los territorios de *quejigar* y *coscojar*, y otros con periodos de rotación cortos y comparables a los territorios de *robledal* y *rebollar*. Al igual que para el número de incendios, fueron la proporción de superficie quemada por incendios medianos/grandes y grandes (Figura 3.3E y F) las variables que caracterizaron la mayor parte de los territorios agrupados en los *encinares*. Los territorios de *alcornocal* solapan su distribución con la de los territorios de *encinar* aunque en la mayoría de los casos los periodos de rotación fueron más cortos y la proporción de cuadrículas afectadas más alta. Los territorios de *hayedo*, *pinar y sabinar* se han caracterizado por presentar periodos de rotación altos y además una gran variabilidad anual en la superficie quemada (Figura 3.3A y B).

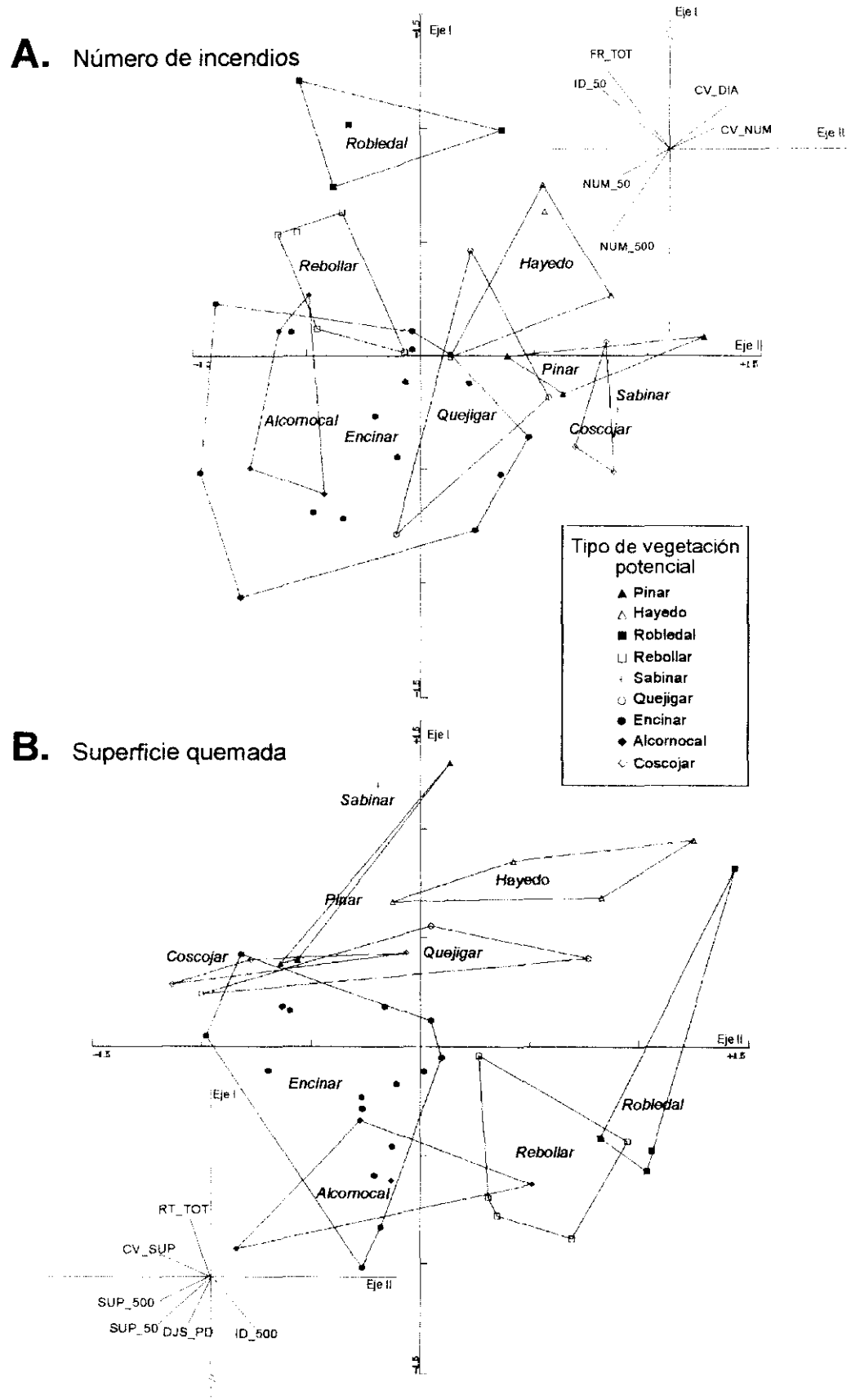


Figura 3.4. "Biplot" de distancias basados en ordenaciones por medio de Análisis de Componentes Principales. Los 43 territorios están agrupados en los tipos de vegetación que se muestran en la leyenda. (A) variables del régimen referidas al número de incendios. Las variables en las que se basa la ordenación están representadas por vectores en el diagrama pequeño. Los porcentajes de

Figura 3.4. (Continuación) varianza explicada por estas variables son de un 30% para el eje I y un 28% para el eje II. (B) Variables del régimen referidas a la superficie quemada. Las variables en las que se basa la ordenación están representadas por vectores en el diagrama pequeño. Los porcentajes de varianza explicada por estas variables son de un 41% para el eje I y un 35% para el eje II. Los códigos y definiciones de las variables del régimen de incendios se detallan en Apéndice 3.I.

3.3.2. Régimen de incendios y factores externos

Los resultados obtenidos en las 6 ordenaciones canónicas basadas en Análisis de Redundancia se resumen en la Tabla 3.2. Los mayores porcentajes de la varianza explicada por los dos primeros ejes canónicos respecto a los datos del régimen de incendios se han obtenido con los grupos de variables referentes a la causa del incendio (38% para la superficie quemada y 31% para el número de incendios). Los dos grupos de variables referidos a las condiciones meteorológicas han registrado valores similares para los dos análisis (26% frente al número de incendios y 28% frente a la superficie quemada). Los usos forestales del territorio (el mismo grupo de variables para los dos análisis) explicó un 27% de la varianza de los datos del número de incendios y un 21% con respecto a la superficie quemada, el valor más bajo obtenido en las 6 ordenaciones canónicas. La proporción entre los valores propios de los ejes I y III ha presentado valores altos en todas las ordenaciones y especialmente en las que las variables externas fueron las variables relativas a la causa de inicio del incendio. Igualmente, el test de permutaciones de Monte Carlo ha proporcionado valores estadísticamente significativos en todos los casos para las ordenaciones realizadas (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Resultados de los seis análisis de ordenación canónicos híbridos (Análisis de Redundancia / Análisis de Componentes Principales) realizados. Se dan los valores propios de los ejes I y II (ejes canónicos), los porcentajes de varianza que representan y los valores propios de los ejes III y IV (no canónicos). Se incluye también la proporción entre el primer eje canónico y el primer eje libre como medida de la adecuación de las ordenaciones canónicas y la significación del test de permutaciones de Monte Carlo para el primer eje extraído (ver procedimientos en Material y Métodos).

Régimen de incendios	***Factores externos***	***Ejes canónicos***			***Ejes libres***		*Ratio*	*Test de Monte Carlo*
		Valores propios			*Valores propios*			
		EjeI	*Eje II*	*total*	*Eje III*	*Eje IV*	*EjeI / EjeIII*	*P=*
Número de incendios	Condiciones Meteorológicas	0,17	0,09	26%	0,26	0,22	66%	0,01
"	Causa (% Número)	0,22	0,17	38%	0,24	0,22	90%	0,01
"	Uso forestal	0,16	0,11	27%	0,30	0,20	54%	0,01
Superficie quemada	Condiciones Meteorológicas	0,20	0,08	28%	0,28	0,23	71%	0,01
"	Causa (% Superficie)	0,21	0,10	31%	0,26	0,21	80%	0,01
"	Uso forestal	0,17	0,04	21%	0,33	0,25	52%	0,01

A continuación se describen los "biplot" de correlaciones obtenidos entre los dos grupos de variables del régimen de incendios y los tres grupos de variables externas. Para los 6 casos se describen en primer lugar los ejes canónicos obtenidos a partir de las variables externas y en segundo lugar las relaciones de las variables del régimen de incendios con los patrones de variación establecidos por las variables externas (representadas como vectores en la Figura 3.5A-F).

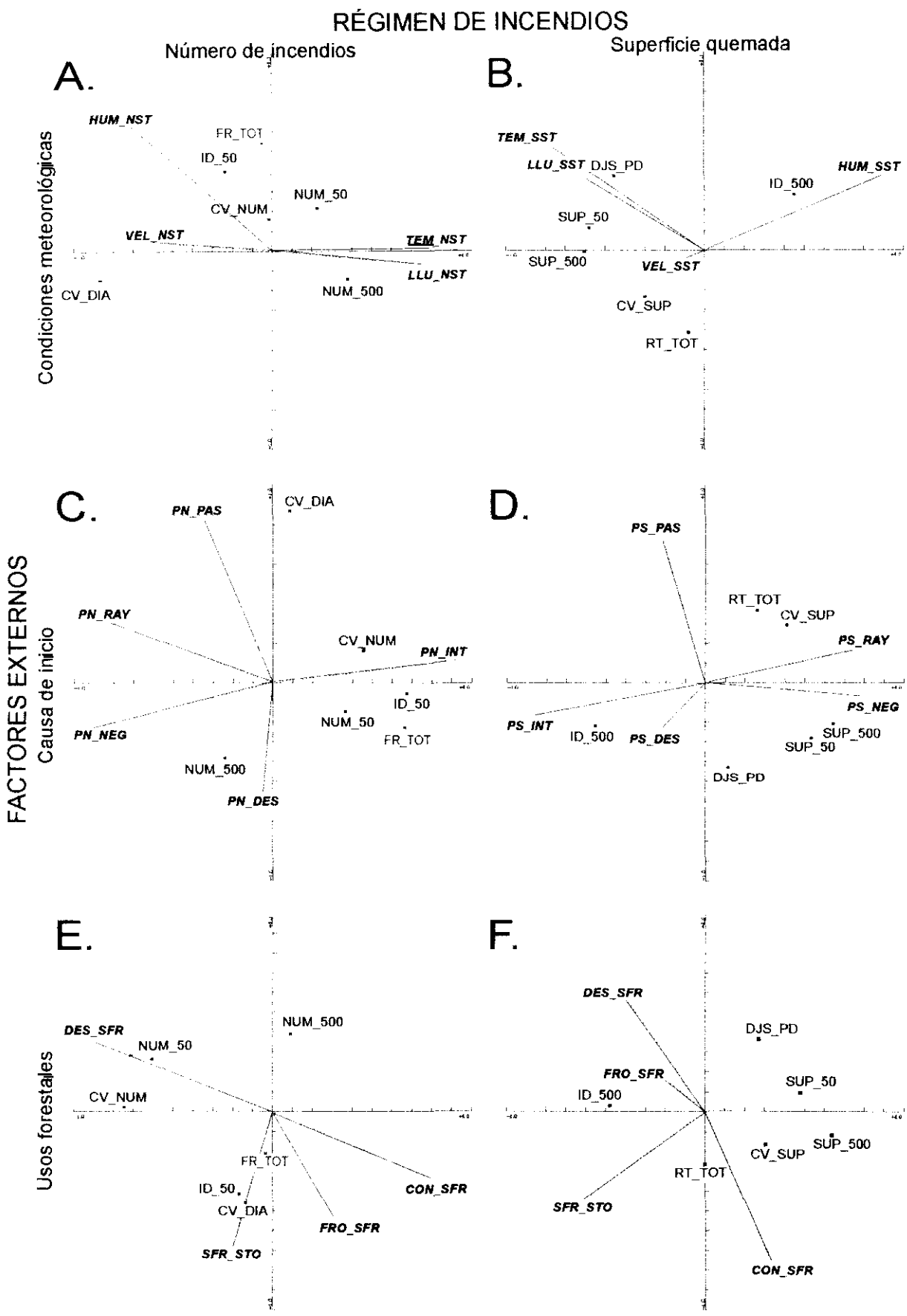


Figura 3.5. "Biplot" de correlaciones basados en ordenaciones a partir de Análisis de Redundancia. Los ejes canónicos se basan en los factores externos (representados como

Figura 3.5. (continuación) vectores y con el nombre de la variable en cursiva). Los datos correspondientes a estos diagramas se muestran en la Tabla 3.2. Las relaciones de las variables del régimen relativas al número de incendios se muestran en los diagramas (A) frente a las condiciones meteorológicas no ponderadas; (C) frente a la proporción de incendios por causa de inicio y (E) frente a los usos forestales. Las relaciones de las variables del régimen de incendios relativas a la superficie quemada se muestran en los diagramas (B) frente a las condiciones meteorológicas ponderadas por la superficie quemada; (D) frente a la proporción de superficie quemada por causa de inicio y (F) frente a los usos forestales. Los códigos y definición para las variables del régimen de incendios se detallan en el Apéndice 3.I y para las variables relativas a los factores externos en el Apéndice 3.II.

3.3.2.1. Número de incendios y condiciones meteorológicas

El primer eje (Figura 3.5A) ha presentado correlaciones positivas muy altas con la temperatura (TEM_NST) y el número de días desde la última lluvia (LLU_NST) y correlaciones negativas con la velocidad del viento (VEL_NST) y la humedad relativa (HUM_NST). La única variable con una correlación importante con el segundo eje ha sido la humedad relativa. Los valores de este grupo de variables meteorológicas se muestran en la Figura 3.6A-D.

Las correlaciones positivas más importantes con la temperatura y con los días desde la última lluvia la ha presentado la proporción de incendios grandes mientras que las demás variables o no han estado relacionadas o lo han estado negativamente, como la variabilidad anual en la fecha de inicio. La humedad relativa se ha correlacionado positivamente, de manera principal, con la frecuencia de incendios y con la proporción de cuadrículas con ≥ 50 ha quemadas.

3.3.2.2. Superficie quemada y condiciones meteorológicas

La variable externa más correlacionada con el primer eje (Figura 3.5B) ha sido la humedad relativa (HUM_SST). Además, correlaciones negativas altas con el primer eje se han obtenido para la temperatura (TEM_SST) y el número de días desde la última lluvia (LLU_SST). Estas dos variables han actuado en la misma dirección. La velocidad del viento ha carecido de importancia en esta ordenación. El segundo eje ha presentado correlaciones positivas con las tres variables externas que configuran la ordenación. Los valores de las variables meteorológicas empleadas se muestran en la Figura 3.7A-D.

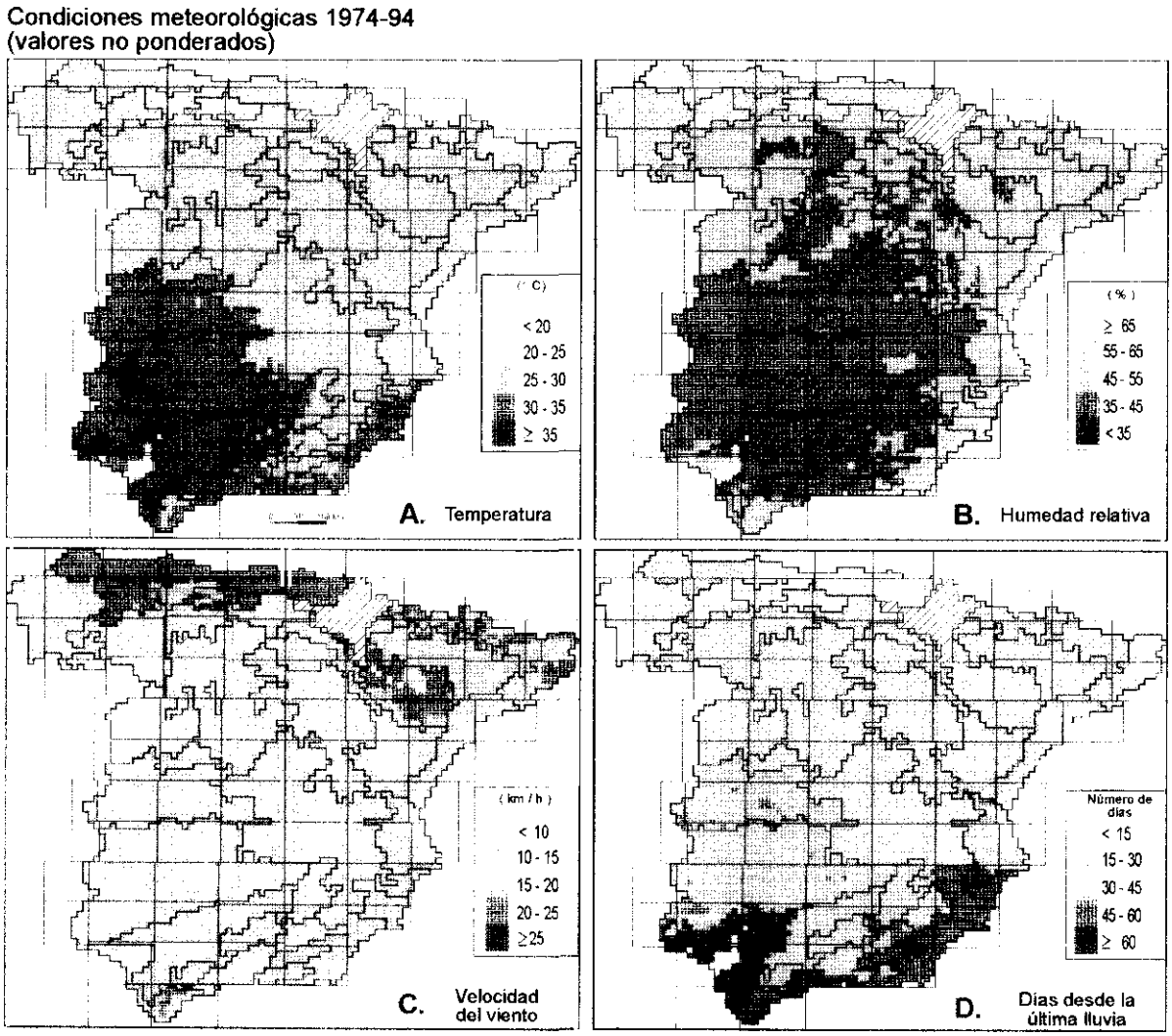


Figura 3.6. Mapas de los valores medios de las variables meteorológicas empleadas en los 43 territorios definidos en la Figura 3.1 durante el periodo 1974-94: (A) temperatura; (B) humedad relativa; (C) velocidad del viento y (D) días desde la última lluvia. (ver el Apéndice 3.II para las definiciones de las variables).

La proporción de cuadrículas con ≥ 500 ha quemadas ha estado asociada a valores elevados de humedad relativa. El resto de las variables del régimen de incendios han estado negativamente correlacionadas con la humedad relativa. Positivamente correlacionadas con la temperatura y el número de días desde la última lluvia se han situado la proporción de superficie quemada por incendios medianos/grandes y el día medio de inicio (ponderado por la superficie quemada). Periodos de rotación altos y variabilidades anuales elevadas se correlacionan negativamente con la humedad relativa (Figura 3.5B)

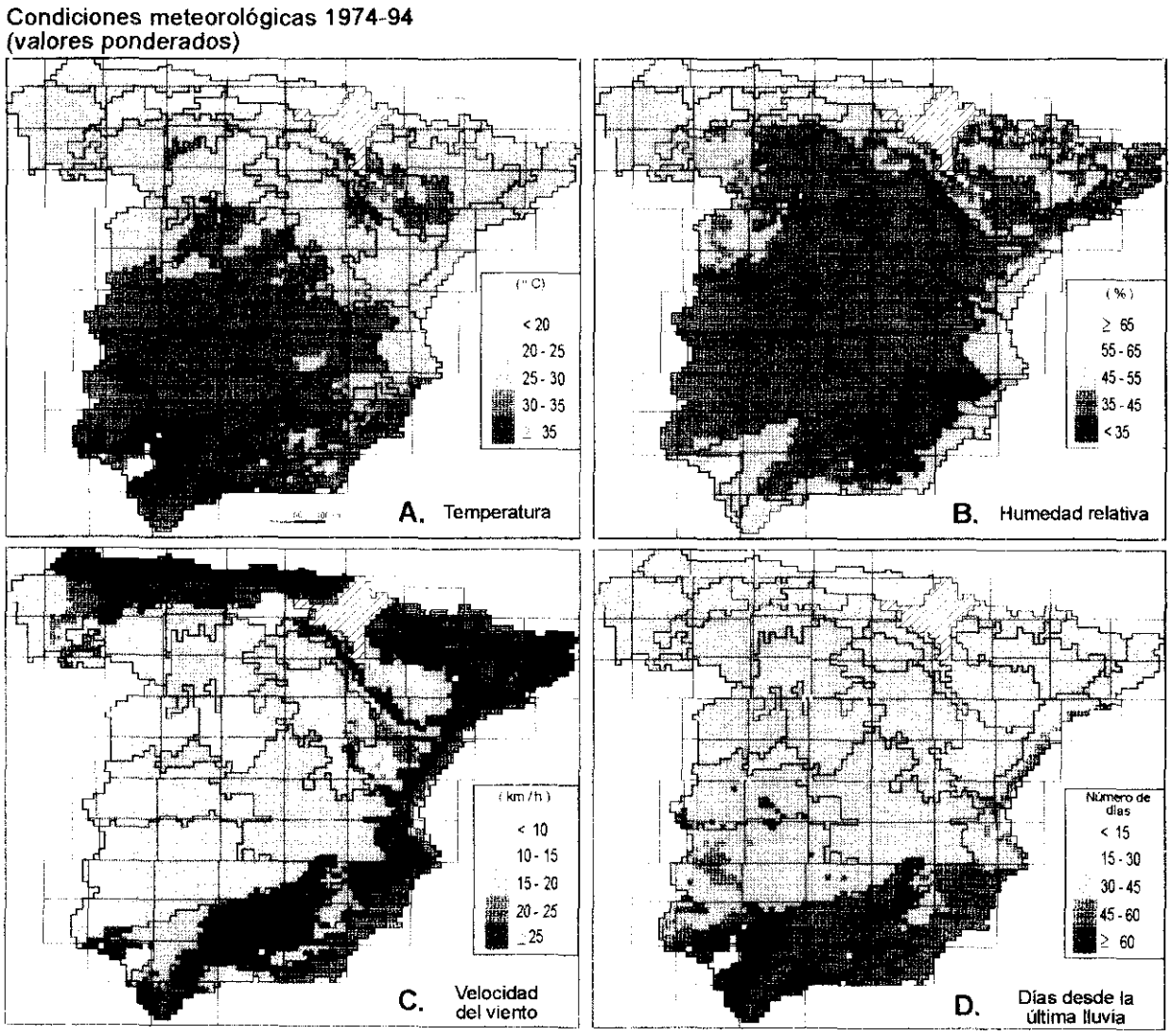


Figura 3.7. Mapas de los valores medios, ponderados por la superficie quemada en cada incendio, de las variables meteorológicas empleadas en los 43 territorios definidos en la Figura 3.1 durante el periodo 1974-94: (A) temperatura; (B) humedad relativa; (C) velocidad del viento y (D) días desde la última lluvia. (ver el Apéndice 3.II para las definiciones de las variables).

3.3.2.3. Número de incendios y causa de inicio

El primer eje (Figura 3.5C) define un claro gradiente entre una proporción alta de incendios intencionados (PN_INT) y una proporción alta de incendios originados por rayos (PN_RAY) y por negligencias (PN_NEG). El segundo eje separa proporciones altas de incendios de quema de pastos (PN_PAS) (correlación positiva muy alta) e incendios de origen desconocido (PN_DES). Esta última ha sido la variable externa menos importante en la explicación de las variables del régimen de incendios. Los valores de este grupo de variables, proporción de incendios por causa de inicio, se muestran en la Figura 3.8A-E.

La frecuencia de incendios y la proporción de cuadrículas afectadas han estado muy correlacionadas con una proporción alta de incendios intencionados. La variabilidad anual alta en el número de incendios ha estado muy correlacionada con los incendios de quema de pastos mientras que la proporción alta de incendios grandes ha estado muy correlacionada con proporciones altas de incendios de origen desconocido (Figura 3.5C)

3.3.2.4. Superficie quemada y causa de inicio

El primer eje (Figura 3.5D) ha definido un gradiente entre proporciones elevadas de superficie quemada de incendios intencionados (PS_INT) (correlaciones negativas) e incendios originados por rayos (PS_RAY) o por negligencias (PS_NEG). Estas dos últimas variables han estado bastante correlacionadas entre sí. El segundo eje ha estado asociado a proporciones elevadas de superficie quemada por incendios de quema de pastos (PS_PAS) y en mucha menor medida (correlaciones negativas) a incendios intencionados y de origen desconocido (PS_DES). La proporción de superficie quemada para cada una de las cinco causas se muestran en la Figura 3.9A-E.

La proporción elevada de superficie quemada por incendios intencionados ha estado muy correlacionada con la proporción de cuadrículas con $\geq$ 500 ha quemadas y negativamente correlacionada con las restantes variables del régimen de incendios. Las proporciones de superficie quemada por incendios originados por negligencias y por rayos han presentado un patrón inverso al descrito y se relacionan positivamente con la mayoría de las variables del régimen. La única excepción a este patrón ha sido la fecha media de inicio (ponderada por la superficie quemada) que únicamente ha estado asociada, de manera negativa, a proporciones elevadas de incendios originados por quema de pastos.

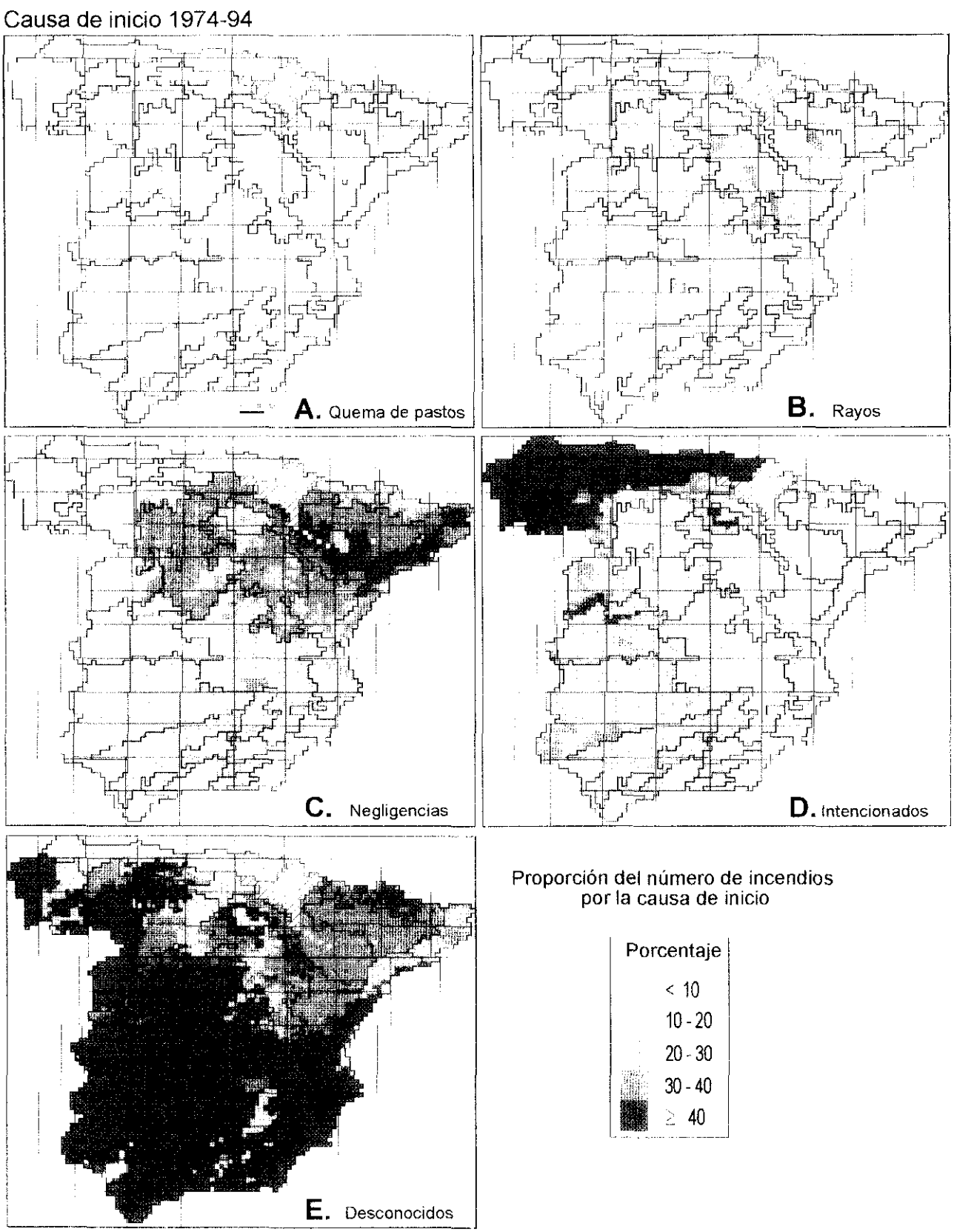


Figura 3.8. Mapas de la proporción del número de incendios originados por las cinco causas de inicio en los 43 territorios definidos en la Figura 3.1 durante el periodo 1974-94: (A) quema de pastos; (B) rayos; (C) negligencias; (D) intencionados y (E) desconocidos.

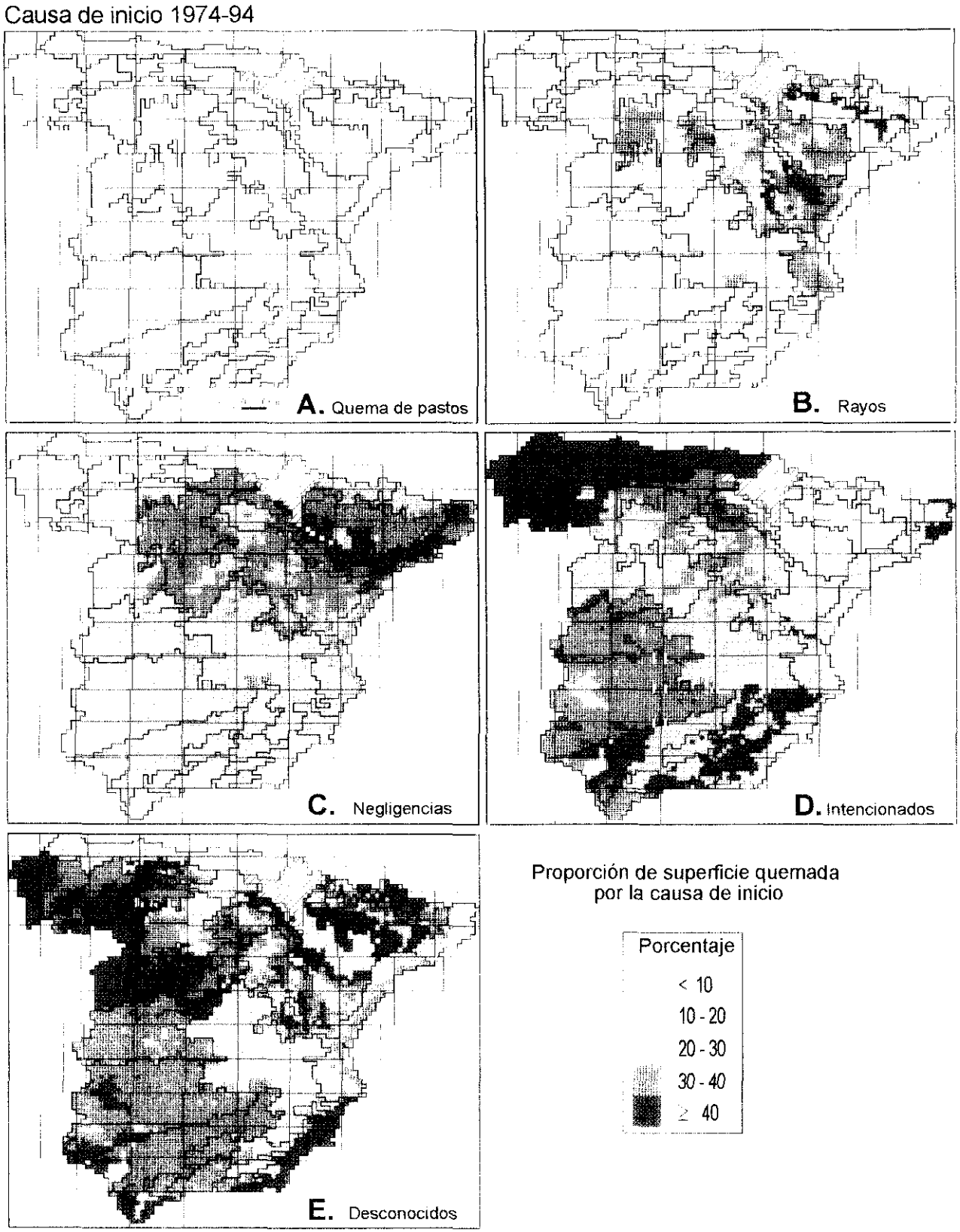


Figura 3.9. Mapas de la proporción de superficie quemada en incendios originados por las cinco causas de inicio en los 43 territorios definidos en la Figura 3.1 durante el periodo 1974-94: (A) quema de pastos; (B) rayos; (C) negligencias; (D) intencionados y (E) desconocidos.

3.3.2.5. Número de incendios y usos forestales

Los usos forestales de los territorios han definido en el primer eje (Figura 3.5E) un gradiente entre proporciones altas de superficie desarbolada (DES_SFR) (correlación negativa muy alta) y proporciones altas de coníferas (correlación positiva) (CON_SFR). En el segundo eje, y correlacionadas negativamente con él, se han situado las proporciones altas de superficie forestal frente a la superficie total del territorio (SFR_STO) y la proporción de frondosas (FRO_SFR). Esta última variable es la menos correlacionada, con los ejes mostrados, de las cuatro variables empleadas. Los valores de estas variables se muestran en la Figura 3.10A-D.

La proporción de incendios medianos/grandes y la variabilidad anual en el número de incendios han estado muy correlacionadas con una proporción alta de superficie desarbolada. La frecuencia de incendios no ha estado correlacionada de manera importante con ninguna de las cuatro variables externas. Correlacionadas positivamente con la superficie forestal total aparecen la proporción de cuadrículas con ≥ 50 hectáreas quemadas y la variabilidad en la fecha de inicio de los incendios. La proporción relativa alta de incendios grandes ha estado negativamente correlacionada con la proporción de superficie forestal total (Figura 3.5E).

3.3.2.6. Superficie quemada y usos forestales

La proporción de superficie forestal frente al total del territorio es la variable más correlacionada, negativamente, con el primer eje (Figura 3.5F) seguida de la proporción de superficie desarbolada. El segundo eje ha definido un gradiente entre proporciones altas de coníferas y de superficie forestal total, correlaciones negativas en los dos casos, y la proporción de superficie desarbolada, con correlación positiva. El grupo de variables referentes al uso forestal (Figura 3.10A-D) es el mismo empleado en el cruce con los aspectos del régimen relacionados con el número de incendios.

El periodo de rotación ha presentado correlaciones muy bajas con las proporciones altas de superficie forestal total y de coníferas. Algo más correlacionada con la proporción de superficie forestal total se ha situado la proporción de cuadrículas con ≥500 ha quemadas. La mayoría de las variables del régimen de incendios han estado correlacionadas negativamente con la proporción de superficie forestal total. Alguna de ellas, como la proporción de superficie quemada por incendios grandes, ha estado relacionada en cierta medida con proporciones elevadas de coníferas (Figura 3.5F).

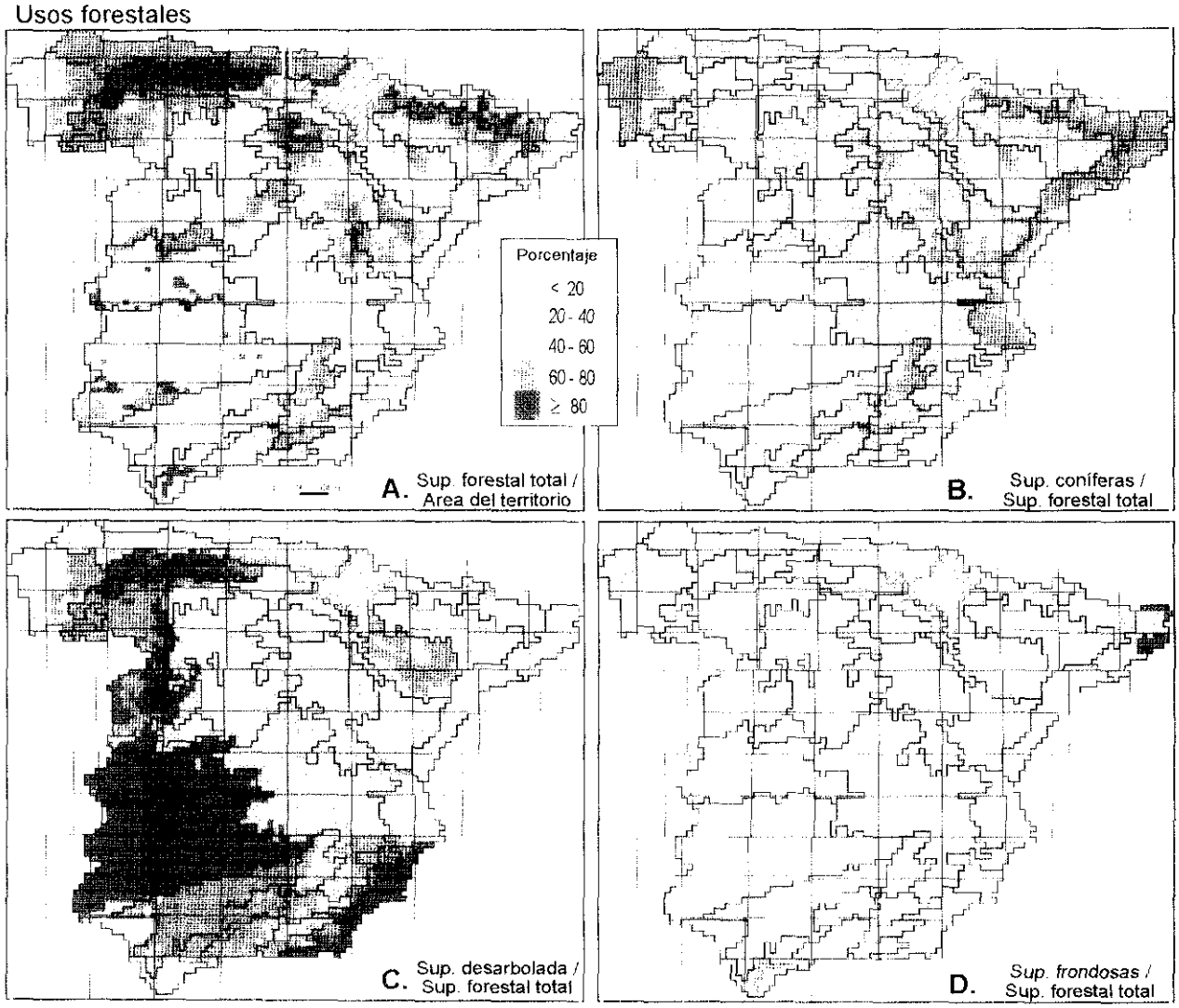


Figura 3.10 Mapas de la proporción de los distintos usos forestales en los 43 territorios definidos en la Figura 3.1 estimada a partir del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos a escala 1:1.000.000: (A) superficie forestal total frente al área total del territorio; (B) superficie de coníferas frente a la superficie forestal total; (C) superficie desarbolada frente a la superficie forestal total y (D) superficie de frondosas frente a la superficie forestal total; (ver también el Anexo 12).

3.4. DISCUSIÓN

3.4.1. Valoración de la aproximación efectuada

Hay diversos aspectos que es necesario tener presentes para una interpretación adecuada de los territorios que han servido de base en el análisis regional efectuado y que han estado delimitados a partir de las series de vegetación potencial.

(1) El concepto de serie de vegetación indica la vegetación potencial que podría encontrarse en un determinado lugar. No obstante, los porcentajes de persistencia de la vegetación natural son muy variables para los distintos territorios y, en cualquier caso, escasos. La superficie forestal total en cada territorio (Tabla 3.1 y Figura 3.10A) representa una cuantificación de los territorios no dedicados a usos agrarios o urbanos. El uso agrario continuado en zonas de determinadas series de vegetación ha hecho que su representación en la actualidad sea muy diferente a la del territorio potencial de este tipo de vegetación. La gran extensión ocupada por coníferas frente a la escasa representación de las frondosas (especies dominantes en la mayor parte de las series de vegetación) es significativo de la importancia de las transformaciones, en ocasiones muy antiguas, ocurridas en la cobertura vegetal de muchos territorios (Figura 3.10B y D). Estos elementos introducen distorsiones entre la vegetación potencial y la actual que hay que evaluar en la interpretación de los resultados. Por otro lado, el concepto de serie de vegetación integra un espacio geográfico con características macroclimáticas y edáficas homogéneas. Y es en este sentido en el que está plenamente justificada su utilización como territorios de referencia en este trabajo.

(2) Los incendios forestales han incidido de manera preponderante sobre determinadas especies. Así, de los incendios que han afectado a especies arbóreas en este periodo, sólo en un 14% de los casos se han registrado daños sobre especies del género *Quercus* y otras frondosas (excluidos eucaliptos) mientras que las coníferas se han visto afectadas en un 68% y los eucaliptos en un 18% de los casos (Capítulo 1). A pesar de la infravaloración de las especies del género *Quercus* en las estadísticas de incendios debido a su carácter no maderable, las diferencias resultan muy importantes. Además, los incendios en los que sólo se ha quemado superficie desarbolada han representado un 45% del total de incendios (Capítulo 1).

(3) La mayor incidencia de los incendios forestales se ha registrado en áreas de montaña (ver el Capítulo 1) en las que los gradientes bioclimáticos dan lugar a una

mayor variabilidad espacial en las series de vegetación y también a mayores dificultades para cartografiar esa variabilidad a la escala a la que se ha muestreado (10x10 km). Esta mayor incidencia se justifica por la mayor proporción de superficie forestal y por la mayor facilidad en la propagación de los incendios.

(4) El cálculo regional de alguna de las variables del régimen de incendios implica teóricamente que las áreas afectadas por incendios no se solapan entre sí. La cartografía detallada de incendios en determinadas zonas de la península como la Sierra de Gredos (Salas, 1994; y Capítulo 7) muestran patrones de agregación importantes. Esto es, zonas que se han visto afectadas más intensamente que otras y que en periodos cortos de tiempo se han visto recorridas por más de un incendio. Esto significaría que las frecuencias de incendios serían más bajas que las calculadas en numerosas áreas y los periodos de rotación más largos que los calculados para la mayor parte de la superficie analizada, exceptuando las zonas de alta incidencia de incendios.

3.4.1. Régimen de incendios y tipo de vegetación

La hipótesis inicial planteada era que los territorios delimitados a partir de especies de vegetación potencial similar deberían comportarse de manera relativamente homogénea en cuanto al régimen de incendios histórico debido a que comparten características climáticas (Moreno et al., 1990). Los resultados obtenidos justifican en parte esta hipótesis. Los grupos de variables relativos al número de incendios y a la superficie quemada han proporcionado resultados similares en las dos ordenaciones. Parece detectarse un gradiente entre territorios de *robledal-rebollar-quejigar* asociado a frecuencias de incendio altas y a periodos de rotación cortos. Los territorios de *encinar* han presentado comportamientos muy dispares, y justificados dada su gran extensión geográfica, y engloban en la mayor parte de los casos a los territorios de *alcornocal*. Los territorios agrupados en *coscojares*, *pinares* y *hayedos* se han presentado agrupados en los dos análisis y se han asociado a frecuencias bajas de incendios y a una variabilidad importante tanto en el número de incendios como en la superficie quemada anualmente y en el momento en que se producen. El solapamiento entre territorios asociados a distintos tipos de vegetación potencial sugiere la existencia de otros elementos importantes en el régimen de incendios. Entre estos factores cabe destacar la distinta configuración del paisaje, como consecuencia de la gran variedad de usos y manejos asociados a las diferentes regiones, aun para territorios asociados a las mismas series de vegetación. No obstante, se aprecia un gradiente en el que la mayor incidencia de incendios (frecuencias elevadas, proporciones altas de cuadrículas afectadas, y proporciones relativas bajas de superficie quemada por incendios grandes) se relaciona

con territorios de mayor productividad asociados fundamentalmente a especies caducifolias.

3.4.2. Régimen de incendios y variables externas

El segundo objetivo de este trabajo ha sido valorar el régimen de incendios histórico frente a factores relacionados con el mismo, y que pueden haberlo condicionado, tomando como referencia los territorios delimitados a partir de series de vegetación. ¿En qué medida las condiciones meteorológicas en las que se han producido los incendios explicarían el régimen histórico? ¿Cuál ha sido el papel del hombre? y ¿Existe alguna relación entre la estructura forestal del territorio y el régimen de incendios? Estas tres preguntas, que sintetizan los factores externos analizados, son una aproximación a las circunstancias que han rodeado a los incendios en territorios tan dispares (desde el punto de vista medioambiental y social) y en un periodo de tiempo amplio (por los cambios en la sociedad y por tanto en su relación con el entorno natural) pero relativamente corto desde el punto de vista de la dinámica de la vegetación y el paisaje. No obstante, dada la extensión del territorio analizado, y los objetivos del trabajo, se considera una aproximación adecuada.

3.4.2.1. Condiciones meteorológicas

Las dos aproximaciones realizadas a las condiciones meteorológicas reflejan aspectos diferentes. Las relacionadas con los aspectos del régimen relativos al número de incendios representan las condiciones medias en las que éstos se han producido y corresponden a la época de mayor número de incendios en el conjunto de los 21 años empleados. Por otro lado, la ponderación por la superficie quemada representaría condiciones más extremas, en las que se ha quemado la mayor parte de la superficie total, normalmente atribuida a unos pocos incendios. Numerosos estudios han puesto de manifiesto la importancia de las condiciones meteorológicas extremas tanto a nivel anual (Capítulo 4), como mensual (Flannigan y Harrington, 1988) o diario (Davis y Michaelsen, 1995) en la explicación de la incidencia de los incendios. Sin embargo, los dos conjuntos de datos empleados para valorar las condiciones meteorológicas en las que se han producido los incendios han presentado patrones muy similares. La velocidad del viento ha sido la variable menos importante en relación al número de incendios y pierde toda importancia en la explicación de los patrones obtenidos al relacionarla con los aspectos del régimen relativos a la superficie quemada.

La contradicción aparente es que, tanto una frecuencia de incendios alta como periodos de rotación cortos, han estado asociados a territorios en los que los incendios se han producido en condiciones menos extremas, esto es, con mayor humedad relativa, temperaturas más bajas y menor número de días desde la última lluvia. Igualmente, son los territorios en los que los incendios se han producido con humedad relativa alta los que han mostrado una mayor incidencia espacial. Esto ha sido así tanto para los aspectos del régimen relativos al número de incendios como para los relativos a la superficie quemada.

En cuanto a las proporciones, en número y superficie, atribuidas a los incendios de distintos tamaños el patrón obtenido es consistente con los comentarios anteriores. En territorios en los que los incendios se han producido en condiciones más extremas (humedad relativa baja y valores elevados de temperatura y días sin lluvia) la proporción de incendios medianos/grandes y grandes ha sido elevada. Dadas las condiciones extremas se puede esperar que la velocidad de propagación sea más alta y por tanto que alguno de los incendios que se produzcan (una proporción alta) sean grandes. Con respecto a la superficie quemada por estos incendios el patrón ha sido idéntico.

3.4.2.2. Causa de inicio

La intencionalidad en el uso del fuego ha sido muy diferente en los distintos territorios. Como aproximación a la relación entre el grado de intervención del hombre y el régimen de incendios resultante se han empleado las proporciones, en número de incendios y en superficie quemada, de cada una de las cinco causas consideradas. Proporciones altas de incendios de rayos indicarían una mayor proximidad a un régimen "natural" (ver el Capítulo 2). La intencionalidad elevada reflejaría un uso más intenso del fuego mientras que territorios con proporciones altas de incendios de quema de pastos indicarían zonas en las que un cierto tipo de manejo tradicional se mantiene con más vigencia. Proporciones altas de negligencias están asociadas a un uso recreacional importante. En cualquier caso, estas variables reflejarían el grado de intervención del hombre en los distintos territorios. Los patrones de relación obtenidos frente a los aspectos del régimen relativos al número de incendios y a la superficie quemada han sido muy similares. Los gradientes entre incendios originados por negligencias o rayos (noreste peninsular) frente a los originados intencionadamente (noroeste peninsular) son claros y se reflejan en las ordenaciones. Los incendios de quema de pastos tienen una cierta importancia proporcional en unas pocas zonas lo que hace que se destaquen claramente los territorios en los que así sucede. La proporción de incendios desconocidos ha sido más variable en relación a la superficie quemada que en relación al

número de incendios y pierde importancia en la explicación de los datos del régimen de incendios referidos a la superficie quemada.

De las relaciones obtenidas queda claro que frecuencias altas, y periodos de rotación cortos, han estado asociados a territorios en los que la intencionalidad ha sido elevada. Las proporciones altas de cuadrículas afectadas se han asociado también con una mayor intencionalidad. La importancia, que en proporción al total de incendios, han tenido los incendios medianos/grandes y grandes no ha estado relacionada de manera importante con las proporciones obtenidas para las distintas causas de inicio en relación a los aspectos del régimen relativos al número de incendios, pero sí con los relativos a la superficie quemada. Así, proporciones altas de superficie quemada por incendios grandes han estado muy relacionadas con territorios en los que la proporción de superficie quemada por incendios originados por rayos o por negligencias ha sido alta.

3.4.2.3. Usos forestales

La caracterización de los distintos territorios ha sido limitada dado que no se han valorado los usos forestales a nivel de paisaje sino a nivel regional. Las variables empleadas describen, por un lado, la proporción del territorio susceptible de verse afectada por incendios forestales (superficie forestal total) y, por otro, una aproximación al tipo de vegetación, esto es, la proporción de coníferas, frondosas y desarbolado a nivel regional. El patrón de distribución espacial de las manchas de superficie forestal en cada uno de los territorios puede condicionar más la propagación de los incendios que el valor total en el territorio. Además, no se han valorado aspectos tan importantes como la continuidad entre masas forestales, la acumulación de combustibles o la inflamabilidad de éstos. Ciertos autores han establecido mediante simulación valores críticos de ocupación del territorio a partir de los cuales la propagación de perturbaciones se alteraría notablemente (Turner et al., 1989a). Estudios a largo plazo (siglos) en territorios no perturbados por el hombre han puesto de manifiesto que la incidencia de los incendios ha dependido fundamentalmente de la acumulación de combustibles (Clark, 1989b) y de la variación interanual en el balance hídrico (Clark, 1989a) que condiciona los contenidos de humedad de los combustibles acumulados.

Para los territorios analizados no se han apreciado tendencias claras en función de los usos del territorio. Los patrones de relación obtenidos entre los usos forestales de los distintos territorios y el régimen de incendios ha sido bastante similar para los dos grupos de variables empleados en la descripción del régimen. La superficie ocupada por frondosas es la variable con menor relación respecto a los patrones relativos al número de incendios y prácticamente sin relación con los relativos a la superficie quemada. Los

territorios con proporciones altas de coníferas no han estado relacionados de manera importante con una mayor frecuencia de incendios y escasamente con periodos de rotación más largos. Sin embargo, la superficie forestal total del territorio sí ha estado relacionada, fundamentalmente, con la distribución espacial de los incendios, Es decir, territorios con proporciones altas de superficie forestal han presentado proporciones elevadas de cuadrículas afectadas. Estos resultados están en consonancia con la extensión durante los últimos años de los incendios a cada vez una mayor proporción del territorio (Capítulo 1).

Apéndice 3.I. Variables descriptoras del régimen de incendios: (A) relativas al número de incendios (Figura 3.2) y (B) relativas a la superficie quemada (Figura 3.3). Códigos empleados y definiciones.

Variables del régimen de incendios	*Código*	*Definición*
(A) Relativas al número de incendios		
A. Frecuencia de incendios	FR_TOT	Número de incendios registrados en 10.000 ha de superficie forestal y año
B. Variabilidad en el número de incendios	CV_NUM	Coeficiente de variación anual del número de incendios
C. Variabilidad estacional	CV_DIA	Coeficiente de variación anual del *día juliano medio de inicio* del incendio
D. Incidencia espacial	ID_50	Proporción de cuadrículas con ≥50 hectáreas quemadas
E. Importancia relativa de los incendios medianos/grandes	NUM_50	Proporción de incendios ≥ 50 hectáreas frente al total de incendios
F. Importancia relativa de los incendios grandes	NUM_500	Proporción de incendios ≥ 500 hectáreas frente al total de incendios
(B) Relativas a la superficie quemada		
A. Periodo de rotación	RT_TOT	Años necesarios para que se queme una extensión igual a la superficie forestal
B. Variabilidad en la superficie quemada	CV_SUP	Coeficiente de variación anual de la superficie quemada cada año
C. Estacionalidad	DJS_PD	Media del día de inicio ponderado por la superficie quemada en cada incendio
D. Incidencia espacial	ID_500	Proporción de cuadrículas con ≥ 500 hectáreas quemadas
E. Importancia relativa de los incendios medianos/grandes	SUP_50	Proporción de superficie quemada por incendios de ≥ 50 hectáreas
F. Importancia relativa de los incendios grandes	SUP_500	Proporción de superficie quemada por incendios ≥ 500 hectáreas

Apéndice 3.II. Variables descriptoras de los tres grupos de factores externos: (A) Condiciones meteorológicas (Figuras 3.6 y 3.7); (B) causa de origen del incendio (Figuras 3.8 y 3.9) y (C) usos forestales (Figura 3.10). Códigos empleados y definiciones de las variables.

Grupos de factores externos	*Código*	*Definición*
(A) Condiciones meteorológicas		
Relativas al número de incendios		
	TEM_NST	A. Media de la temperatura máxima dada en cada incendio
	HUM_NST	B. Media de la humedad relativa dada en cada incendio
	VEL_NST	C. Media de la velocidad del viento dada en cada incendio
	LLU_NST	D. Media de los días desde la última lluvia dados en cada incendio
Relativas a la superficie quemada		
	TEM_SST	A. Media ponderada de la temperatura máxima dada en cada incendio
	HUM_SST	B. Media ponderada de la humedad relativa dada en cada incendio
	VEL_SST	C. Media ponderada de la velocidad del viento dada en cada incendio
	LLU_SST	D. Media ponderada de los días desde la última lluvia dados en cada incendio
(B) Causa de origen		
Relativas al número de incendios		
	PN_PAS	A. Proporción de incendios originados por quema de pastos frente al total registrado
	PN_RAY	B. Proporción de incendios originados por rayos frente al total registrado
	PN_NEG	C. Proporción de incendios originados por negligencias frente al total registrado
	PN_INT	D. Proporción de incendios de origen intencionado frente al total registrado
	PN_DES	F. Proporción de incendios de origen desconocido frente al total registrado
Relativas a la superficie quemada		
	PS_PAS	A. Proporción de superficie quemada por incendios de quema de pastos
	PS_RAY	B. Proporción de superficie quemada por incendios de rayos
	PS_NEG	C. Proporción de superficie quemada por incendios originados por negligencias
	PS_INT	D. Proporción de superficie quemada por incendios de origen intencionado
	PS_DES	F. Proporción de superficie quemada por incendios de origen desconocido
(C) Usos forestal del territorio		
	SFR_STO	A. Proporción de superficie forestal frente a la superficie total del territorio
	CON_SFR	B. Proporción de superficie ocupada por coníferas frente a la superficie forestal total
	DES_SFR	C. Proporción de superficie desarbolada frente a la superficie forestal total
	FRO_SFR	D. Proporción de superficie ocupada por frondosas frente a la superficie forestal total

Capítulo 4

Relaciones entre la incidencia anual de incendios y variables climáticas en zonas mediterráneas y atlánticas de España

4.1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son un fenómeno común en la mayor parte de España, tanto en las áreas de clima mediterráneo como en las de clima atlántico (Capítulo 1). La incidencia anual de los incendios, entendida como el número de incendios registrados y la superficie quemada anualmente, está determinada por un conjunto muy amplio de factores entre los que se pueden citar: la presencia de fuentes de ignición, la cantidad, el tipo y la disposición de los combustibles (a diversas escalas espaciales), la topografía, la eficacia en la prevención y extinción y las condiciones climáticas (Rothermel, 1983; Chandler et al., 1983).

Las condiciones climáticas ejercen un papel crucial en el desarrollo de los incendios y ciertas variables relacionadas con el clima son la base de la mayor parte de los sistemas de predicción del riesgo de incendios (Chandler et al., 1983). No obstante, las variables más relevantes para estos fines suelen no estar disponibles en muchos observatorios. Las comparaciones de la incidencia de incendios entre diferentes áreas se ve pues dificultada por la falta de información. Por el contrario, variables climáticas simples como la temperatura media o la precipitación total están disponibles en la mayoría de los observatorios. Basándose en este tipo de variables, Flannigan y Harrington (1988) fueron capaces de explicar hasta un 30% de la varianza en la superficie quemada mensualmente en diversas provincias de Canadá. Aunque este valor no es muy elevado, es similar al obtenido empleando otros componentes del Índice Meteorológico de Incendios (Fire Weather Index) (Harrington et al., 1983) lo que indica el potencial de este tipo de datos en la predicción de la incidencia de incendios en un área.

La exploración de las relaciones entre la incidencia anual de incendios y variables climáticas es interesante por al menos dos razones: primera, si un porcentaje importante de la varianza es explicado, estas relaciones podrían ayudarnos a entender qué variables juegan un papel crítico, y usarlas eventualmente como ayuda en la predicción de la incidencia de los incendios para un periodo dado. Segunda, a la vista de las predicciones sobre el cambio climático, las relaciones entre variables climáticas y la incidencia de incendios pueden ayudar a explorar riesgos futuros. Esta dependencia de los incendios frente a condiciones meteorológicas es interesante, además, al haberse demostrado cómo el clima ha determinado la incidencia de incendios en ecosistemas

"naturales" a varias escalas temporales. Desde variaciones del orden de décadas a siglos (Clark, 1988, 1990; Baisan y Swetnam, 1990; Johnson y Larsen, 1991), a ciclos de periodo más corto asociados a eventos tales como "El Niño" (Swetnan y Bettancourt, 1990; Brenner, 1991).

Las extrapolaciones hacia el futuro han de ser realizadas con cautela, dadas las muchas asunciones necesarias en la prolongación de patrones actuales (o pasados) en futuros, especialmente en áreas donde los incendios están originados fundamentalmente por el hombre y éste ejerce un papel determinante en los usos del territorio. No obstante, ésta puede ser una aproximación válida en áreas climáticamente complejas y variables como el Mediterráneo (Millán et al., 1991). Además, dada la resolución actual de los Modelos de Circulación Global (Dickinson, 1986), las dificultades asociadas con el empleo de predicciones generadas por estos modelos en tales áreas, hará difícil el empleo de aproximaciones más convencionales para este tipo de ensayos (Flannigan y Van Wagner, 1991).

Algunas de las cuestiones planteadas en este trabajo son: (1) ¿La incidencia de incendios está relacionada de manera significativa con variables climáticas simples? (2) ¿Esta relación es similar en zonas con clima diferente? (3) ¿Cuáles son las mejores variables climáticas en la predicción de la incidencia de incendios? (4) ¿Estas variables son las mismas en diferentes zonas? (5) Dentro de una misma zona, ¿los incendios originados por distinta causa son igualmente predecibles a partir de variables climáticas? y (6) ¿Las mismas variables climáticas explican la incidencia de los incendios originados por distinta causa?

Los razonamientos e hipótesis iniciales son: (1) Las condiciones meteorológicas ejercen un papel importante en la incidencia de los incendios, pero existen otros factores que están también involucrados. Se espera por tanto que la relación entre la incidencia de incendios y variables climáticas anuales sea débil. Pero más que los valores absolutos de la relación existente es importante explorar cómo esta relación cambia en áreas con diferente clima. (2) Cuanto más propicia sea un área para sustentar incendios, menos relacionada estará con variables climáticas. Consecuentemente, áreas más cálidas y secas deberían estar menos relacionadas con variables climáticas que áreas más frías y húmedas. (3) Las variables climáticas relacionadas con el agua deberían predecir mejor la incidencia de incendios, y además, esta capacidad de predicción debería incrementarse de áreas secas a húmedas. Esto debería ser así dado que la variabilidad en las precipitaciones se incrementa al disminuir la precipitación total (Montero de Burgos y González, 1973; Le Houreou, 1982). (4) Dado que los incendios difieren en la fuente de ignición, se considera que aquéllos originados bajo condiciones

más específicas (por ejemplo los incendios originados por quema de pastos, por rayos o los de origen intencionado) deberían ser menos predecibles que los incendios originados en condiciones más aleatorias (originados accidentalmente).

4.2. MATERIAL Y MÉTODOS

4.2.1. Zona de estudio

Se seleccionaron tres zonas dentro de España peninsular (Figura 4.1). La zona Norte incluye una gran parte del territorio español encuadrado dentro de la región biogeográfica Eurosiberiana (Rivas-Martínez, 1981, 1987b; Moreno et al., 1990). Esta zona se caracteriza por registrar unas precipitaciones elevadas a lo largo del año y unas temperaturas moderadas (Figura 4.2A). La zona Centro comprende la mayor parte del territorio circundante al Sistema Central, y se incluye fundamentalmente en la provincia biogeográfica Carpetano-Ibérico-Leonesa, dentro de la región Mediterránea (Rivas-Martínez, 1987b). Presenta un carácter más continental, la precipitación total es menor y se distingue más claramente un periodo estival seco (Figura 4.2B). La tercera zona, Levante, es una banda estrecha a lo largo de la costa Mediterránea que incluye el sector Valenciano-Tarraconense de la provincia biogeográfica Catalano-Valenciano-Provenzal-Balear (Rivas-Martínez, 1987b). Esta zona se caracteriza por un clima más cálido y seco que las dos primeras (Figura 4.2C). Además, los patrones de precipitaciones para el Norte y Centro están más relacionados con situaciones climáticas provenientes del noroeste o sudoeste mientras que en Levante están más relacionados con situaciones provenientes del este (Villa et al., 1985).

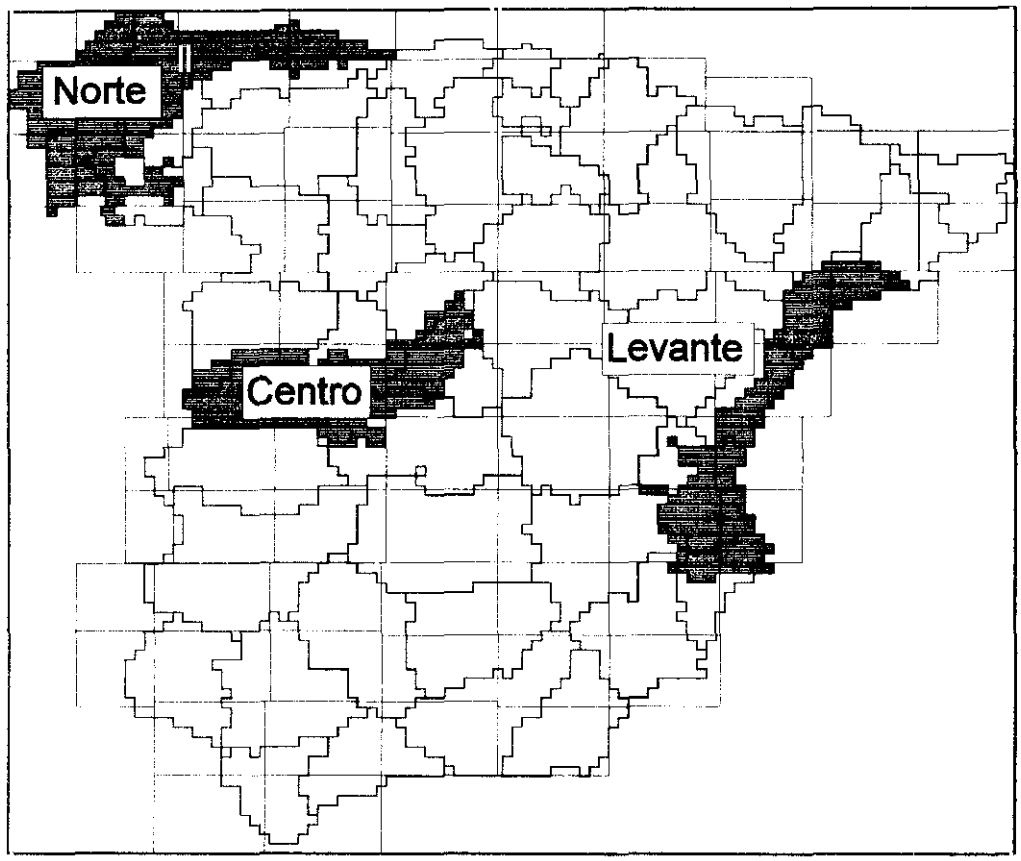


Figura 4.1. Localización de las tres zonas analizadas dentro de España peninsular.

4.2.2. Datos de incendios

Se han empleado los datos de los incendios correspondientes al periodo 1974-88 (descritos en el Capítulo 1). Para la zona de Levante no se han empleado los años 1979 y 1988 al no estar completa la información correspondiente a esos dos años. Los datos posteriores a 1988 no estuvieron disponibles cuando se realizó este trabajo. La delimitación de las tres zonas se realizó a partir de las cuadrículas de 10x10 km descritas en el Capítulo 1. En base a la información suministrada en los registros de incendio se han definido cinco tipos en función de la causa de inicio: incendios originados como consecuencia de una quema de pastos, incendios originados por rayos, incendios originados a partir de negligencias, incendios provocados intencionadamente e incendios de origen desconocido. En el grupo negligencias (incendios accidentales) se han incluido todas las demás causas codificadas originalmente.

4.2.3. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos considerados como representativos de cada zona están basados en 19 estaciones meteorológicas distribuidas dentro de cada una de ellas. Los datos iniciales fueron series mensuales. Los valores correspondientes a meses (o periodos más amplios) no disponibles se completaron por medio de regresiones múltiples, para cada variable, a partir de los valores de las demás estaciones de cada zona. A partir de los valores medios de todas las estaciones de cada zona, en los 180 meses, se derivaron las variables anuales empleadas. Entre las variables climáticas disponibles se seleccionaron las 10 siguientes:

Variables relacionadas con las precipitaciones:

Ptot	Precipitación total anual
Dp1	Número de días al año con precipitación $\geq$ 1 mm
Dp10	Número de días al año con precipitación $\geq$ 10 mm
Dp30	Número de días al año con precipitación $\geq$ 30 mm
Dtor	Número de días al año con tormenta

Variables relacionadas con las temperaturas:

Tm	Temperatura media anual de las medias mensuales
Tmx	Temperatura media anual de las máximas mensuales
Dm20	Número de días al año con temperatura mínima $\geq$ 20 ºC
DM25	Número de días al año con temperatura máxima $\geq$ 25 ºC
DM30	Número de días al año con temperatura máxima $\geq$ 30 ºC

Los valores obtenidos para la precipitación total y la temperatura media anual para la tres zonas en los 15 años analizados, junto a los diagramas climáticos para este periodo, se muestran en la Figura 4.2A-F.

4.2.4. Procedimientos

Para establecer la relación entre las diez variables climáticas y el número de incendios y la superficie quemada anualmente se realizaron regresiones por el método de mínimos cuadrados y ajustes lineares.

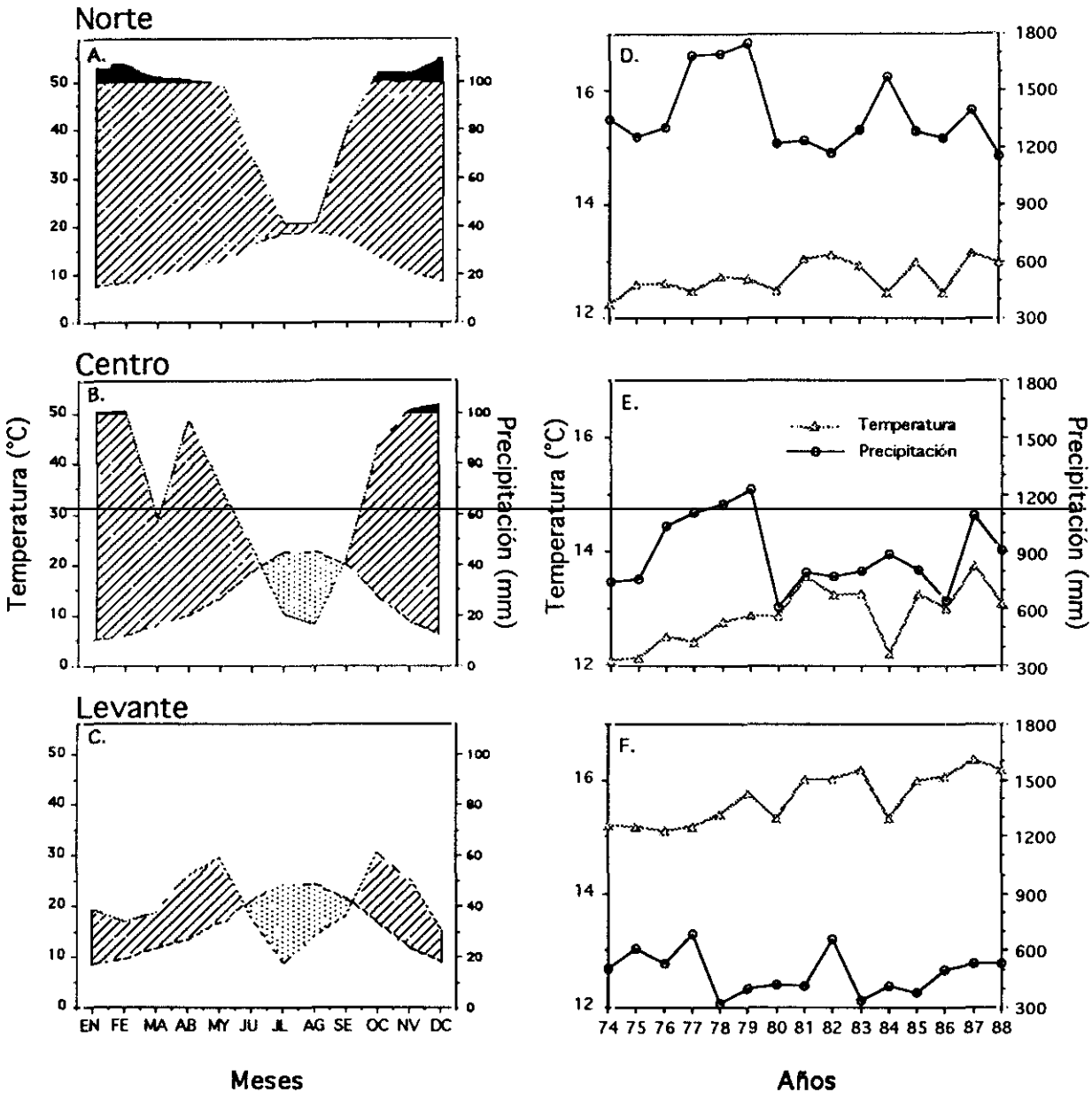


Figura 4.2. Diagramas climáticos y evolución de la temperatura media y la precipitación total en los 15 años analizados para las zonas Norte (A y D), Centro (B y E) y Levante (C y F). Los valores representados corresponden a las medias de las 19 estaciones consideradas para cada zona.

Además de inspeccionar visualmente los diagramas obtenidos de cada regresión, se probaron otros ajustes que no proporcionaron valores de los coeficientes de determinación (r^2) mayores a los obtenidos.

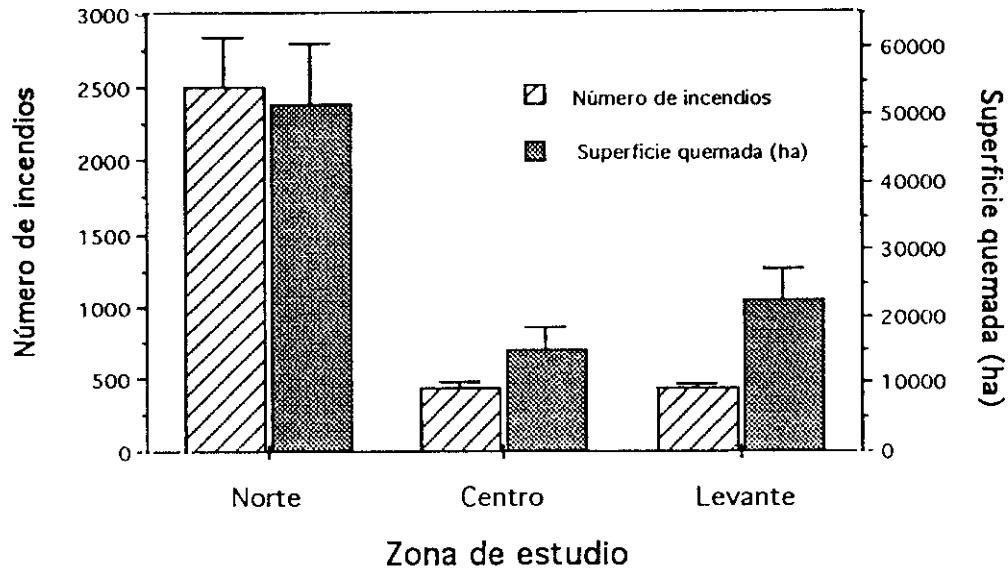


Figura 4.3. Media anual del número de incendios y de la superficie quemada (± error estándar) para las tres zonas de estudio durante el periodo 1974-88. Para Levante no están incluidos los datos correspondientes a los años 1979 y 1988.

Estas regresiones se realizaron para todos los incendios registrados en cada zona y de manera independiente para los cinco tipos definidos a partir de la causa de inicio. Las dos variables dependientes (número de incendios y superficie quemada) se sometieron a transformaciones logarítmicas. El número de años empleados ha sido de 15 en las zonas Norte y Centro y de 13 en Levante.

4.3. RESULTADOS

4.3.1. Relaciones en las tres zonas

El número medio de incendios registrado anualmente ha sido bastante elevado y han afectado a una superficie considerable en las tres zonas (Figura 4.3). Estas tres zonas

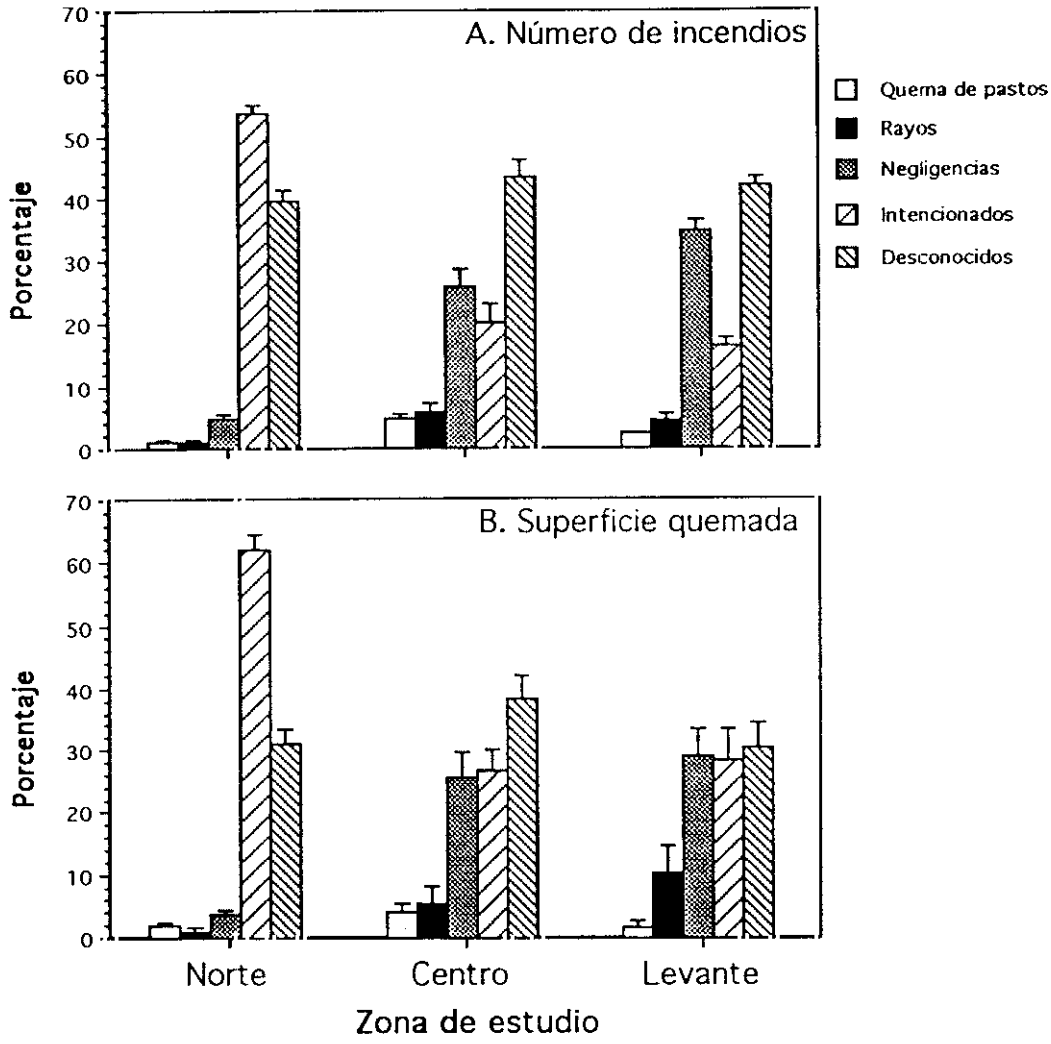


Figura 4.4. Proporción de incendios originados por los cinco tipos de causa considerados para las tres zonas de estudio: (A) número de incendios y (B) superficie quemada.

han contabilizado aproximadamente un 47% de los incendios que han afectado a un 39% de la superficie quemada en España peninsular durante los 15 años utilizados en este análisis. Los incendios originados por quema de pastos y por rayos han representado una fracción pequeña del total, tanto en el número de incendios como en la superficie afectada (Figura 4.4A-B). Se aprecia, no obstante, un aumento en la superficie quemada por rayos desde la zona Norte a Levante, en la que han supuesto aproximadamente un 10% de la superficie total quemada. La mayoría de los incendios han estado relacionados con la actividad humana. Las diferencias entre la proporción de incendios intencionados para las tres zonas son notables, con un porcentaje muy elevado en la zona Norte. Los incendios de origen desconocido han representado un porcentaje también bastante elevado y no muy distinto en las tres zonas.

Tanto el número de incendios como la superficie quemada anualmente han estado bien relacionados con alguna de las variables climáticas empleadas (Figura 4.5A-F). En las tres zonas se han alcanzado valores del coeficiente de determinación por encima de 0,5 para alguna de las variables. Para el número de incendios los valores más elevados se obtuvieron en las zonas Centro y Levante (r^2=0,68). En relación a la superficie quemada el valor más alto se obtuvo en la zona Norte (r^2=0,71) y el más bajo en Levante. Se puede apreciar un patrón consistente en cuanto a la relación de las zonas Norte y Centro con variables relativas a las temperaturas (parte derecha de cada gráfica individual) mientras que en Levante la relación ha sido más fuerte con variables relativas a las precipitaciones (parte izquierda de cada gráfica individual). El número de días por encima de una cierta temperatura, generalmente 30 °C, fue el mejor predictor del número de incendios y de la superficie quemada anualmente en las zonas Norte y Centro. Por otro lado el número de días con precipitación superior a 10 mm, o la precipitación total, fueron los mejores predictores del número de incendios y de la superficie quemada en Levante. El hecho de que se obtengan relaciones importantes con varias variables climáticas a la vez no es sorprendente y se justifica en que muchas de las variables están fuertemente relacionadas entre sí.

4.3.2. Relaciones para incendios de distinta causa

Los incendios originados por quema de pastos estuvieron poco relacionados con la mayoría de las variables climáticas empleadas (Figura 4.6A-F). Aún así, se obtuvieron regresiones estadísticamente significativas en las zonas Centro y Levante, en esta última únicamente para el número de incendios. La superficie quemada por incendios de quema de pastos en el Norte no ha estado relacionada con ninguna de las variables empleadas. En general, el patrón de relaciones frente a las variables relativas a las temperaturas y a las precipitaciones se mantiene, aunque más claramente para la superficie quemada.

Los incendios originados por rayos han estado poco relacionados con las variables climáticas a nivel anual (Figura 4.7A-F), y en relación inversa a la incidencia de este tipo de incendios en las tres zonas (Figura 4.4A-B). De hecho, Levante fue la menos relacionada mientras que en el Norte las relaciones con las variables climáticas fueron algo más fuertes.

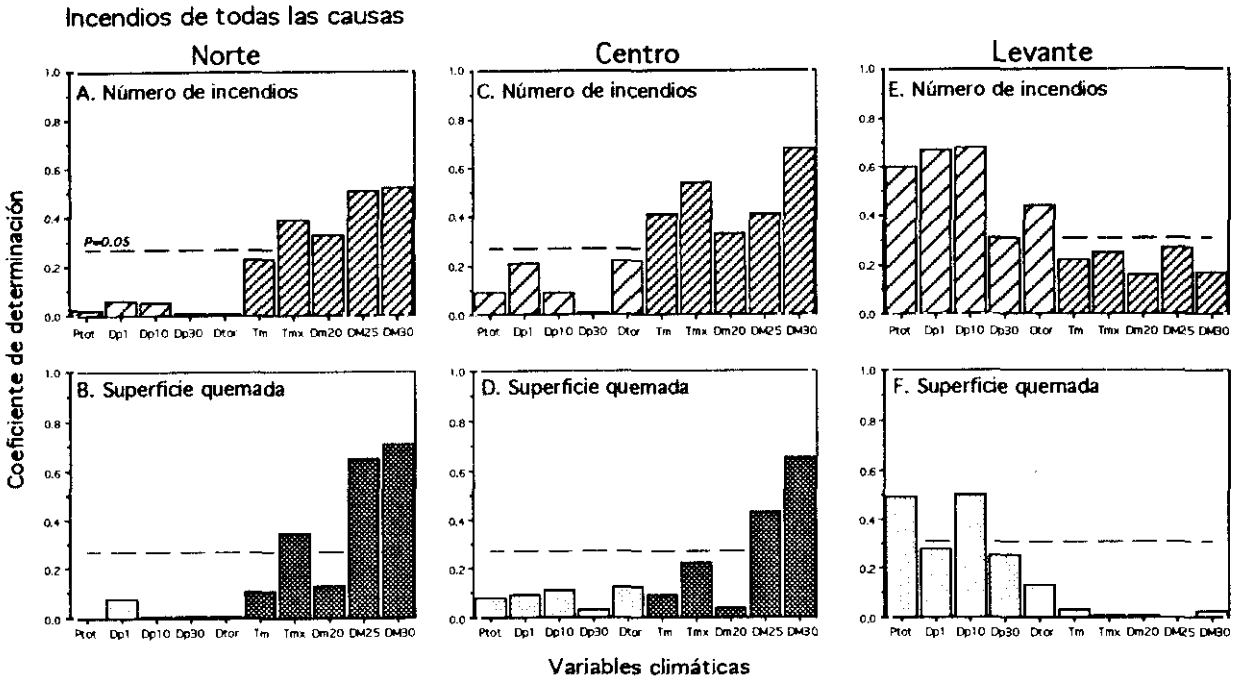


Figura 4.5. Valores de los coeficientes de determinación (r^2) obtenidos en las regresiones efectuadas entre el número de incendios (A, C y E) y la superficie quemada anualmente (B, D y F) para los incendios originados por todas las causas y las variables climáticas anuales en las tres zonas de estudio. (Ver el pie de la Figura 4.6).

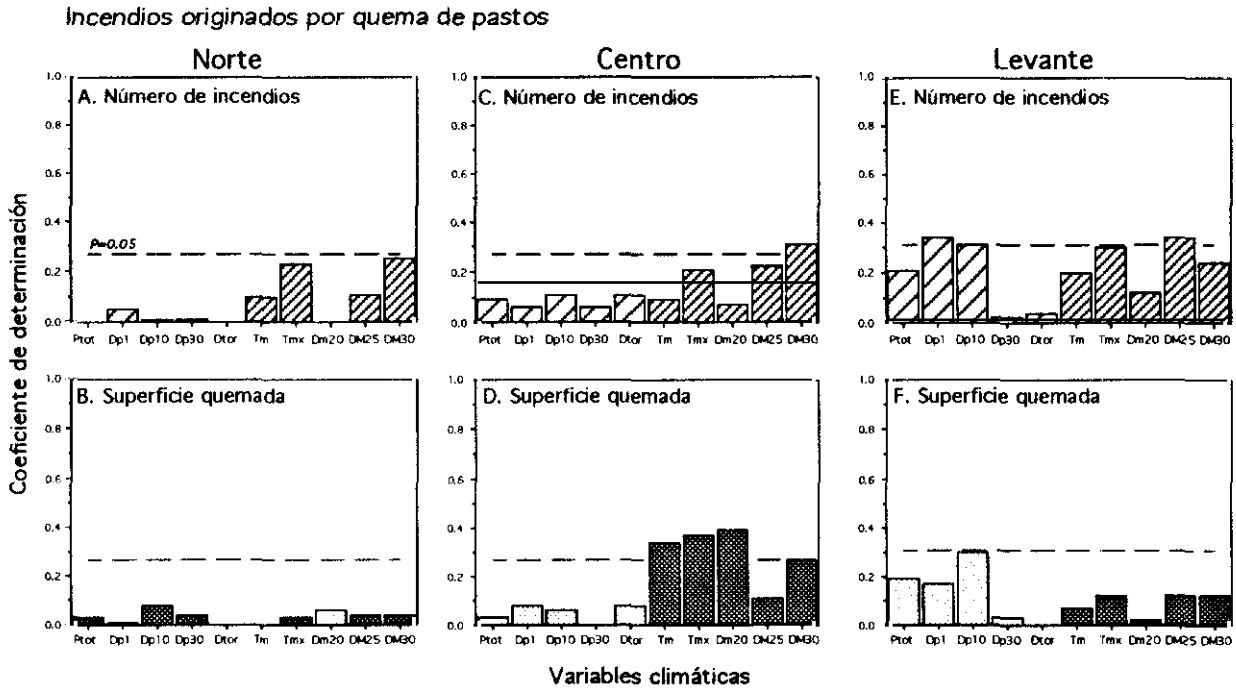


Figura 4.6. Valores de los coeficientes de determinación (r^2) obtenidos en las regresiones efectuadas entre el número de incendios (A, C y E) y la superficie quemada anualmente (B, D y F) para los incendios originados por quema de pastos y las variables

Figura 4.6. (Continuación) climáticas anuales en las tres zonas de estudio. El signo de la regresión está representado por la densidad del rayado (para el número de incendios) o del sombreado (para la superficie quemada). Rayado o sombreado denso significa relaciones positivas y rayado o sombreado claro implica relaciones negativas. La línea discontinua indica el valor de r^2 en el que las regresiones comienzan a ser estadísticamente significativas con $P \leq 0,05$. Para los nombres de las variables climáticas ver Material y Métodos.

El número de días de tormenta al año fue un descriptor pobre excepto para el número de incendios en la zona Centro. El patrón de relaciones está también algo cambiado con respecto al general (para todos los incendios) en la zona Norte, donde las precipitaciones han presentado relaciones negativas importantes con el número de incendios y con la superficie quemada.

Los incendios originados por negligencias (accidentales) fueron más predecibles a partir de variables climáticas que los dos tipos de incendios descritos previamente (originados por quema de pastos y por rayos). En este tipo de incendios se reconoce claramente el patrón general de relaciones descrito para todos los incendios. Esto es, las zonas Norte y Centro estuvieron más relacionadas con las temperaturas y Levante más relacionado con las precipitaciones (Figura 4.8A-F). En este caso, no obstante, las variables relativas a las precipitaciones estuvieron también relacionadas (de manera estadísticamente significativa) con el número de incendios y con la superficie quemada en la zona Centro. Para la superficie quemada se obtuvieron mejores relaciones en las zonas Norte y Centro que para el número de incendios. En Levante únicamente el número de incendios se relacionó de manera estadísticamente significativa con alguna de las variables climáticas.

Los incendios de origen intencionado estuvieron muy relacionados con variables climáticas anuales en las tres zonas (Figura 4.9A-F). El patrón obtenido a partir de las regresiones efectuadas fue muy similar al mostrado para el conjunto de todas las causas, lo cual no es sorprendente dado que este tipo de incendios ha representado, en las tres zonas, un porcentaje bastante elevado del total (Figura 4.4A-B). Levante fue la zona menos predecible en términos de superficie quemada. Los incendios originados por causa desconocida estuvieron también muy relacionados con variables climáticas en las tres zonas, aunque los valores de los coeficientes de determinación (para ciertas variables) no llegaron a ser tan altos como para los incendios de origen intencionado (Figura 4.10A-F). El patrón de relaciones obtenido para las distintas variables climáticas fue muy similar al mostrado para los incendios intencionados, especialmente en las zonas Norte y Centro en las que la proporción de incendios intencionados es mayor. El grado de similitud para Levante ha sido menor.

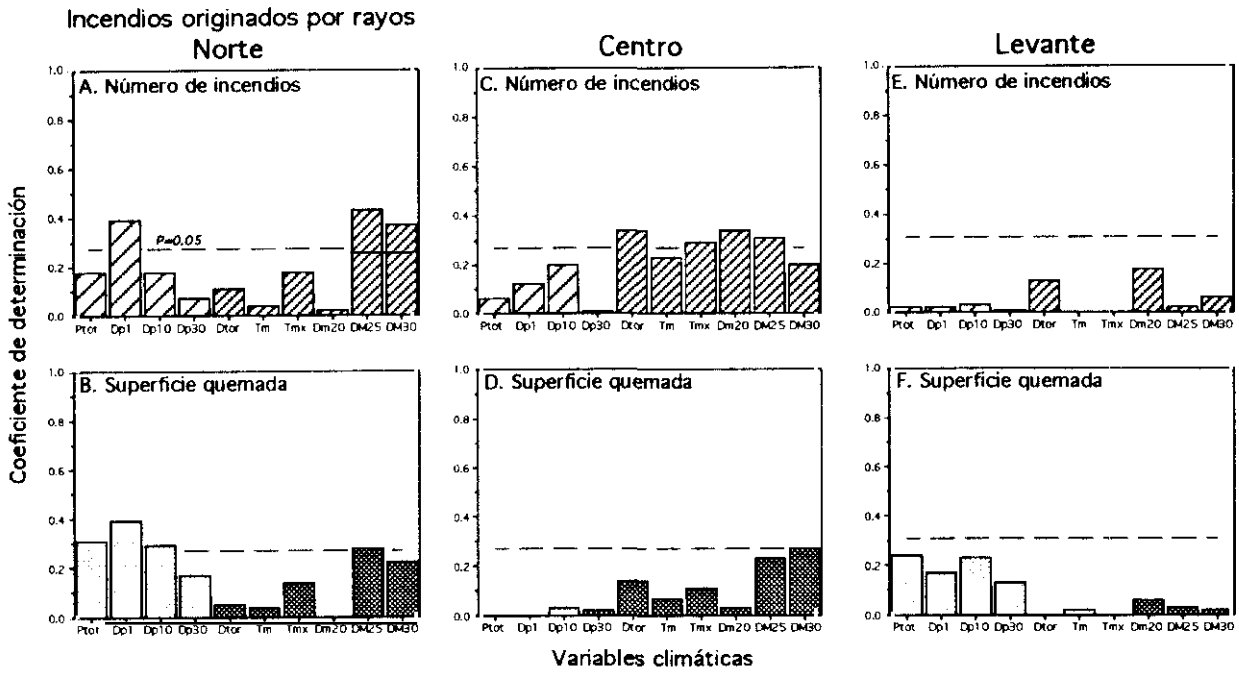


Figura 4.7. Valores de los coeficientes de determinación (r^2) obtenidos en las regresiones efectuadas entre el número de incendios (A, C y E) y la superficie quemada anualmente (B, D y F) para los incendios originados por rayos y las variables climáticas anuales en las tres zonas de estudio. Ver el pie de la Figura 4.6 para más detalles.

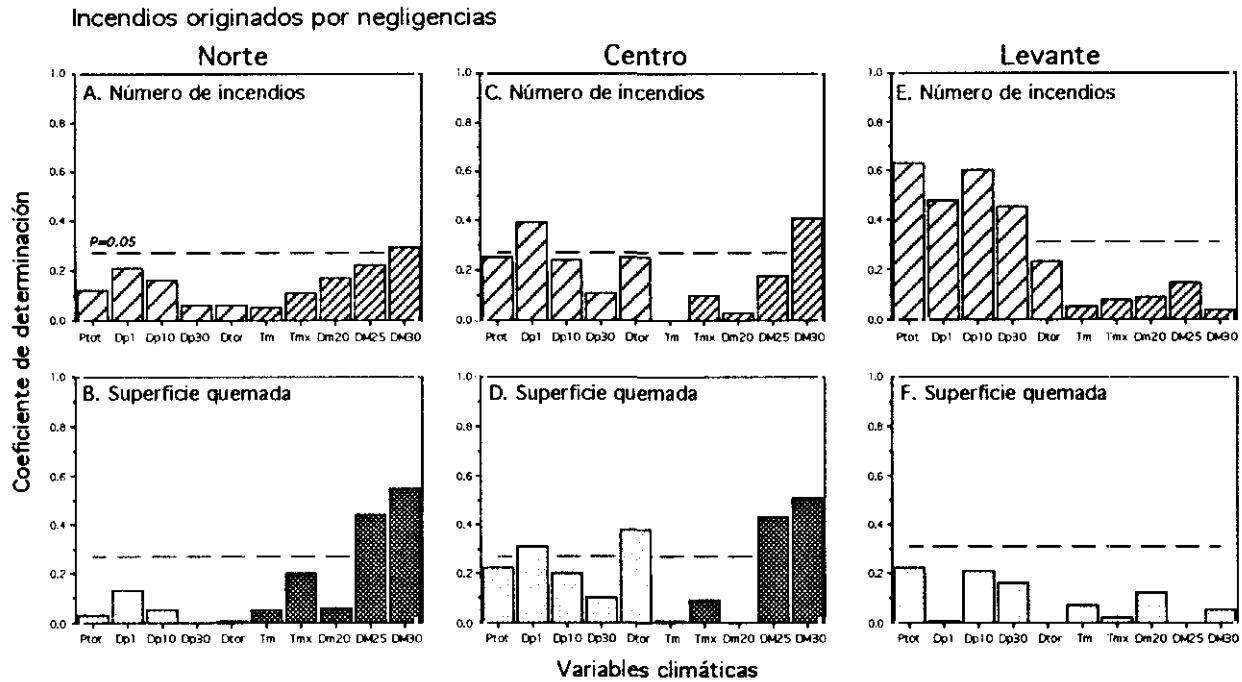


Figura 4.8. Valores de los coeficientes de determinación (r^2) obtenidos en las regresiones efectuadas entre el número de incendios (A, C y E) y la superficie quemada anualmente (B, D y F) para los incendios originados por negligencias y las variables climáticas anuales en las tres zonas de estudio. Ver el pie de la Figura 4.6 para más detalles.

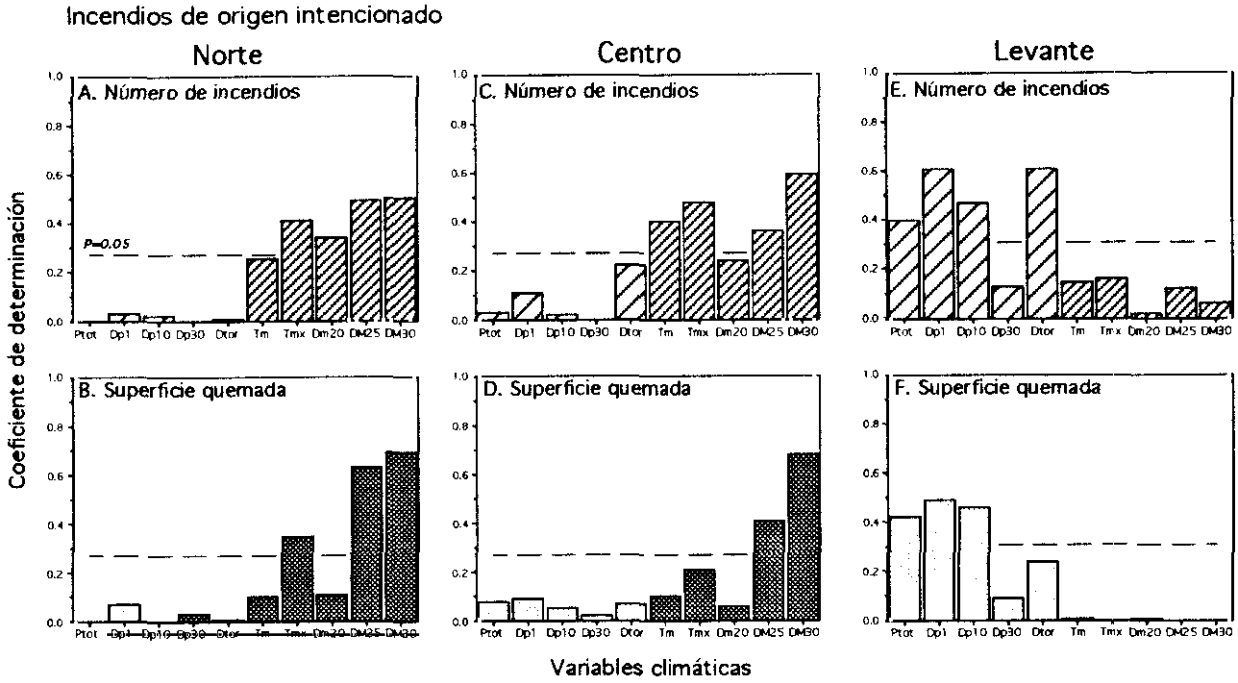


Figura 4.9. Valores de los coeficientes de determinación (r^2) obtenidos en las regresiones efectuadas entre el número de incendios (A, C y E) y la superficie quemada anualmente (B, D y F) para los incendios de origen intencionado y las variables climáticas anuales en las tres zonas de estudio. Ver el pie de la Figura 4.6 para más detalles.

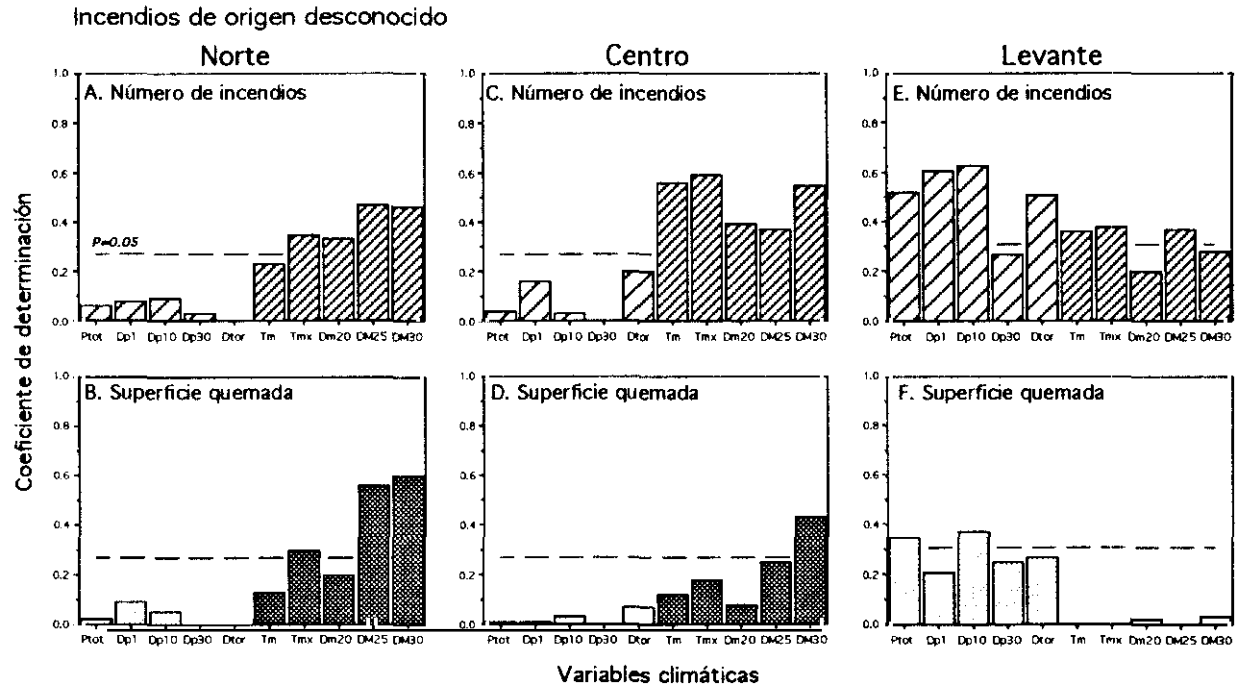


Figura 4.10. Valores de los coeficientes de determinación (r^2) obtenidos en las regresiones efectuadas entre el número de incendios (A, C y E) y la superficie quemada anualmente (B, D y F) para los incendios de origen desconocido y las variables climáticas anuales en las tres zonas de estudio. Ver el pie de la Figura 4.6 para más detalles.

4.4. DISCUSIÓN

Contrariamente a lo que en principio se hubiera esperado, ciertas variables climáticas simples han estado bien relacionadas tanto con el número de incendios como con la superficie quemada anualmente en las tres zonas consideradas. Los valores de los coeficientes de determinación obtenidos de las regresiones entre variables climáticas y el número de incendios o la superficie quemada son mucho más altos que los citados para otras áreas con una intervención humana mucho menor (Flannigan y Harrington, 1988). Algunas de las variables han presentado un poder predictivo notable y podrían ser empleadas eventualmente en la predicción de la incidencia futura de incendios, asumiendo que el resto de los factores relacionados permaneciesen constantes. No obstante, es necesario ser cauto ante las limitaciones de este modelo. Para considerarlo operacional sería necesario asumir que las condiciones climáticas (a distintas escalas temporales) son el único factor que controla la incidencia de los incendios. Esto no se puede asumir dado que tanto el número de incendios (no se consideran los menores de un determinado tamaño) como la superficie quemada han estado muy condicionados por la eficacia en la extinción (para al menos una gran mayoría de ellos) y por los cambios en la estructura del paisaje. Las modificaciones en el paisaje pueden ser consecuencia de los cambios en el uso del territorio y también de los cambios inducidos por los mismos incendios, en la medida en que éstos puedan alterar la susceptibilidad de un cierto territorio para verse afectado nuevamente por el fuego (Capítulo 7). Además, una gran mayoría de los incendios se producen por mediación del hombre, intencionadamente o no, y este elemento puede ser también cambiante en el tiempo. Todas estas cuestiones han de ser tenidas en cuenta e interpretar los resultados con cautela. El hecho de que las distintas zonas se hayan comportado de manera diferente, a pesar de que los diversos factores enumerados previamente puedan haber operado de manera similar, permite la aproximación que se discute a continuación.

4.4.1. Patrones de relación en las tres zonas

Como se había planteado inicialmente, las relaciones entre la incidencia de incendios y las variables climáticas han cambiado de manera importante entre las tres zonas, decreciendo de la más cálida y seca (Levante) a la más fría y húmeda (Norte). No obstante, mientras que en el Centro las condiciones son más cálidas y secas que en el Norte, no se obtuvieron coeficientes de determinación muy distintos. Por tanto, parece

que las relaciones obtenidas pueden ser dependientes de las condiciones generales de temperaturas y precipitaciones pero también de los patrones que éstas siguen a lo largo del año. Las precipitaciones han desempeñado un papel destacado únicamente en Levante, donde son más escasas. En las otras dos zonas han presentado cierta relación con alguno de los tipos de incendio menos importantes (en número y en superficie quemada) pero no con los más abundantes ni con el conjunto de todos ellos. El hecho de que la incidencia de incendios en las zonas Norte y Centro estuviera relacionada con las temperaturas es interesante no sólo por documentar esta relación, sino por el tipo de variable que ha presentado mayor relación. La temperatura media ha jugado un papel menor, mientras que la temperatura máxima y particularmente el número de días por encima de un determinado valor de temperatura, resultaron las variables críticas. Este hecho es importante a la hora de inferir la incidencia de incendios bajo futuros escenarios climáticos, dado que el tipo de alteraciones en la temperatura puede resultar más importante que modificaciones en las medias. Los resultados sugieren que incluso dentro de una misma región biogeográfica, diferentes zonas pueden haber estado respondiendo a patrones meteorológicos diferentes y que las inferencias sobre las consecuencias del futuro cambio climático deberán ser particularizadas. Dada la variabilidad de los climas de tipo mediterráneo (Nahal, 1981), este hecho representa una complicación adicional en la predicción de los efectos del cambio climático en estas regiones.

4.4.2. Patrones de relación por causa del incendio

Como se planteó en las hipótesis iniciales, alguno de los tipos de incendio que se han podido originar bajo situaciones más específicas (quema de pastos, rayos) han estado pobremente relacionados con las variables climáticas anuales. No obstante, ha sido sorprendente que a pesar de la baja incidencia de estos dos tipos de incendio en las tres zonas, aún se obtuvieron relaciones significativas con alguna de las variables climáticas anuales. Este hecho confirma la importancia de los patrones meteorológicos anuales en este tipo de incendios.

Contrariamente a lo planteado en un principio, los incendios de origen intencionado han estado más fuertemente relacionados con las variables climáticas anuales que los incendios de origen accidental (negligencias). Este hecho es sorprendente en la medida en que la hipótesis inicial era que los incendios intencionados se producirían en días y lugares señalados, más difíciles de predecir al no estar necesariamente relacionados con las condiciones medias anuales. En consecuencia, y empleando el argumento contrario, se puede concluir que los incendios de origen intencionado no han sido muy distintos a

los que ocurrirían en situaciones más aleatorias, o al menos que los incendios de origen intencionado no se producen en los lugares y momentos más críticos. El hecho de que los incendios intencionados y los accidentales hayan presentado un patrón similar puede ser indicativo de esta situación. Esta cuestión se ha analizado de manera específica en el sur de California. Mees (1990) analizó si los incendios intencionados comenzaron en las condiciones más críticas y concluyó que no necesariamente. No obstante, los incendios de origen intencionado fueron usualmente más grandes, lo que sugiere que se seleccionaron los lugares de inicio de manera que los incendios se propagasen favorablemente. Esta cuestión conlleva importantes consecuencias desde el punto de vista del manejo del territorio y necesita una mayor profundización. Otro hecho sorprendente fue que el patrón de relaciones entre la incidencia de incendios de causa desconocida y las variables climáticas fue muy similar al obtenido para los incendios intencionados, particularmente en el Norte y Centro. Estos resultados sugieren que muchos de los incendios de origen desconocido puedan tener un origen similar al de los incendios intencionados.

Capítulo 5

Patrones temporales y del tamaño de los incendios en un gradiente climático y sus relaciones con variables climáticas

5.1. INTRODUCCIÓN

Las relaciones entre los incendios forestales y las condiciones climáticas son múltiples. El clima controla la productividad primaria y el tipo de vegetación (Lieth y Whittaker, 1975; Woodward, 1986), y a través de la vegetación, el tipo del combustible, su distribución y las tasas de acumulación de biomasa (Mutch, 1970; Philpot, 1977; Olson, 1981; Rundel, 1981). El clima dominante en una zona dada se puede caracterizar por valores específicos de temperatura, precipitación, déficit de humedad y vientos, entre otras variables, que a su vez, pueden determinar la probabilidad de ignición y propagación del fuego (Rothermel, 1983). Por tanto, cambios en el clima probablemente induzcan variaciones en los factores críticos, bióticos y abióticos, que controlan el régimen de incendios.

Cambios climáticos en el pasado han dado lugar a variaciones en la frecuencia de incendios y en su intensidad, así como a modificaciones en el paisaje (Clark, 1988; Baisan y Swetnam, 1990; Johnson y Larsen, 1991). Meyer et al. (1992) mostraron cómo cambios climáticos, al alterar el tamaño de los incendios y su intensidad, pueden dar lugar a cambios significativos en la estructura y funcionamiento de un sistema aluvial. Incluso cambios en el clima asociados con "El Niño" se ha visto que afectan al régimen de incendios de determinadas áreas (Swetnam y Betancourt, 1990; Brenner, 1991).

Los cambios en la temperatura y en la precipitación, que se espera que ocurran como consecuencia de la liberación de gases con efecto invernadero, pueden incrementar el riesgo de incendios en regiones susceptibles a ello (Beer et al., 1988; Flannigan y Van Wagner, 1991; Torn y Fried, 1992). No obstante, predecir si la frecuencia de incendios y el área quemada se incrementará es más difícil, dado que la incidencia de los incendios depende no sólo de las condiciones climáticas sino también de las fuentes de ignición. Esta predicción no es una tarea simple, particularmente en áreas en las que los incendios están determinados en gran medida por la influencia humana. Por ejemplo, un incremento en la temperatura puede prolongar el periodo de incendios pero también puede modificar los patrones de uso del territorio. Estos cambios pueden interaccionar con el número de igniciones, de diversas fuentes, y afectar la superficie quemada o el momento en el que ocurren, de una manera difícilmente predecible.

Para ayudar a comprender cómo el cambio climático puede modificar la incidencia de los incendios, es preciso entender primero cómo los patrones temporales y de tamaños de los incendios (periodo en el que se producen y la estructura de tamaños) responden a las condiciones climáticas y meteorológicas actuales, y también cómo estos patrones varían en relación a la fuente de ignición de los incendios. Esta última cuestión es particularmente importante en áreas en las que el hombre es la principal fuente de ignición. La mayor parte de los estudios disponibles en relación a variaciones climáticas pasadas están basados en incendios de origen natural, pero en la actualidad éstos ejercen un papel secundario en muchas áreas susceptibles de verse afectadas por incendios. Las extrapolaciones desde escenarios climáticos presentes a otros futuros, en base a los patrones previos, puede no ser realista si se considera que los cambios en la incidencia de incendios están controlados únicamente por las condiciones climáticas. La incidencia de incendios puede estar afectada fuertemente por los patrones de actividad humanos, bien mediante la prevención, o dando lugar a ellos intencionada o accidentalmente.

En este capítulo se explora cómo zonas con diferente clima difieren en la distribución estacional de los incendios y en la distribución de tamaños, en particular en las desigualdades en el tamaño de los incendios. De manera adicional, el estudio a lo largo del gradiente climático se ha completado con el análisis de la variabilidad anual de los patrones mencionados y su relación con variables climáticas. Este análisis se ha llevado a cabo para los diferentes tipos de incendio obtenidos de la causa de origen de los mismos. En un trabajo previo (Vázquez y Moreno, 1993; Capítulo 4) se ha mostrado que la incidencia de incendios (entendida como el número de incendios y la superficie quemada) responde de manera muy diferente a variables climáticas anuales en las diferentes zonas climáticas consideradas. Además, se detectaron relaciones específicas de acuerdo con la zona y la fuente de ignición considerada. El momento del año en el que ocurren los incendios y sus tamaños son importantes desde el punto de vista del manejo del territorio y también desde un punto de vista ecológico. Los impactos del fuego en la vegetación pueden ser sensibles a cambios en estos componentes del régimen de incendios.

Objetivos

(1) Determinar cómo la incidencia de los incendios (número de incendios y superficie quemada) se distribuye a lo largo del año en áreas que difieren en su clima y para incendios originados por diferentes causas, y analizar esta distribución a través de los años para determinar la variabilidad interanual y sus relaciones con las condiciones meteorológicas en el periodo estudiado. (2) Determinar en qué medida la distribución de tamaños de los incendios y sus desigualdades, esto es, la variabilidad en los tamaños,

cambia en zonas con diferente clima y para incendios originados por distinta causa, y determinar la variabilidad interanual en estos patrones y sus relaciones con las condiciones meteorológicas anuales. Las hipótesis principales han sido:

Patrones temporales de los incendios

(1) En general, el periodo en el que ocurren los incendios a lo largo del año será más corto en las áreas más frías y húmedas (esto es, en las zonas menos susceptibles) que en áreas más cálidas y secas. (2) El tiempo necesario para quemar una proporción dada de la superficie total quemada en un año debería ser menor que el tiempo necesario para alcanzar la misma proporción del número total de incendios, dado que las probabilidades de propagación del fuego no son iguales a lo largo del año. (3) El periodo en el que se producen los incendios originados accidentalmente (por negligencias) o por causas naturales debería ser más amplio que el periodo en el que se producen los incendios de origen intencionado. Esto es, incendios que temporalmente se originan con un cierto azar frente a los originados de manera específica para propagarse y por tanto bajo condiciones más restringidas que los primeros. (4) Los incendios originados como consecuencia de quema de pastos (originados cuando escapan al propósito inicial) ocurrirían en periodos más amplios que los de las restantes causas. Las quemas de pastos se pueden producir siempre que las condiciones sean aceptables para propagar el fuego pero no demasiado extremas. Estas condiciones pueden darse en cualquier momento del año. (5) La variabilidad en el periodo en el que se producen los incendios debería ser mayor en áreas cálidas y secas que en las más lluviosas y húmedas debido a la mayor variabilidad en los eventos meteorológicos, en particular en las precipitaciones, en las áreas del primer tipo. (6) Las relaciones entre el periodo en el que se producen los incendios y las variables climáticas debería ser mayor en las áreas frías/húmedas que en las cálidas/secas debido también a la mayor variabilidad climática del segundo tipo de áreas.

Patrones de los tamaños de los incendios

(1) Las desigualdades en el tamaño de los incendios deberían ser mayores en áreas cálidas/secas que en las frías/húmedas debido a la mayor probabilidad, en las primeras, de situaciones críticas (eventos extremos) responsables de los grandes incendios. (2) La variabilidad interanual en las desigualdades en los tamaños de los incendios deberían ser mayores en áreas cálidas/secas que en las frías/húmedas dada la mayor variabilidad de los

climas secos, particularmente en cuanto a la precipitación. (3) Las desigualdades en los tamaños deberían ser mayores en los incendios con probabilidad de originarse bajo condiciones diversas, incluidas las extremas, (incendios originados por negligencias o por rayos) que en los originados bajo un conjunto de condiciones teóricamente más restringidas (como las quemas de pastos o los incendios intencionados). (4) Las relaciones anuales entre la desigualdad en el tamaño de los incendios y las variables climáticas deberían ser mayores en áreas frías/húmedas que en áreas cálidas/secas en las que la probabilidad de eventos extremos puede ser mayor, y los valores medios pueden resultar menos significativos.

5.2. MATERIAL Y MÉTODOS

5.2.1. Datos empleados

Las tres zonas de estudio (Norte, Centro y Levante) y los datos referentes tanto a los incendios registrados en el periodo 1974-88 como a las variables climáticas empleadas son los descritos y analizados en el Capítulo 4 y por tanto no se repiten aquí.

5.2.2. Procedimientos

La fecha de inicio proporcionada en los registros de incendio se transformó a días julianos. Adicionalmente se agruparon todos los incendios por la quincena en la que ocurrieron. Cada mes se dividió en dos quincenas. Con estos datos se construyeron las frecuencias acumuladas del número de incendios y de la superficie quemada por quincenas. A partir de estas distribuciones calculamos el periodo de tiempo necesario para que se produjese el 50% de los incendios o se quemase el 50% de la superficie anual. A este periodo se le ha denominado PFO_{50} y representa el tiempo transcurrido entre la frecuencia acumulada del 25% y la del 75%. Este periodo se calculó para cada zona, año, y para todos los incendios (sin considerar la fuente de ignición). Se calculó también para los originados por negligencias y los intencionados. Debido al escaso número de incendios originados por rayos y por quema de pastos no se consideraron aisladamente en este análisis. Los incendios de causa desconocida tampoco se analizaron

separadamente. Las diferencias entre las tres zonas de estudio para la duración de la estación de incendios, medida por el PFO_{50} tanto para el número de incendios como para la superficie quemada, fueron analizadas estadísticamente por medio del test de rangos-signos y muestras pareadas de Wilcoxon para cada par de zonas de estudio. Estas comparaciones fueron tomadas como planeadas y las dos zonas se consideraron como estadísticamente distintas con $P \leq 0,05$. Las relaciones entre el día juliano medio, su desviación estándar y PFO_{50} fueron analizadas por medio de correlaciones con cada una de las variables climáticas empleadas (descritas en el Capítulo 4). Al estar el interés dirigido fundamentalmente a los patrones de correlación no se realizaron correcciones sobre la significación de estas relaciones.

Las diferencias en la distribución acumulada de tamaños para incendios del mismo tipo entre pares de zonas de estudio, o entre pares de tipos de incendio dentro de la misma zona fue analizada estadísticamente por medio de test de Kolmogorov-Smirnov para dos muestras. Este análisis se realizó para todos los incendios registrados en las tres zonas y con tamaños ≥0,1 ha, ≥10 ha y ≥50 ha. La desigualdad en los tamaños de los incendios entre las tres zonas de estudio, y para los incendios originados por distinta causa, se comparó por medio de la función de proporción extrema *(EP)* y la representación de *EP(p)* frente a *p* (una proporción dada de los incendios mayores). *EP(p)* representa la proporción de superficie quemada que es causada por los mayores (*p*%) incendios (Strauss et al., 1989). La función de proporción extrema se calculó para todos los incendios y aisladamente para cada uno de los cinco tipos de incendio definidos a partir de la causa de inicio. Además, esta función se calculó independientemente para cada año para todos los incendios, y también para los originados por negligencias y los intencionados en aquellos años en los que el número de incendios de estos dos tipos superó los 50. Este análisis anual no fue posible para los incendios originados por quema de pastos o por rayos, debido al pequeño número de incendios disponible para ciertos años en alguna de las zonas empleadas. Los incendios de origen desconocido se excluyeron del análisis anual. Además se ajustaron varias funciones a las representaciones de *EP(p)* frente a *p*. La función de Pareto truncada proporcionó los mejores ajustes y se usó en posteriores análisis. Se empleó el módulo de regresiones no lineares del programa estadístico BMDP, para ajustar los datos reales a la distribución de Pareto truncada. Esta función toma la forma:

$$EP(p) = ((pb^{\alpha} + q)^{1-1/\alpha} - 1) / b^{\alpha - 1} - 1$$

en la que *p* es una proporción dada, $q=(1-p)$, α es un parámetro de forma y b la proporción entre los incendios mayores y los más pequeños. En base a las funciones ajustadas se calculó la proporción de los incendios mayores necesarios para afectar a un

porcentaje dado de la superficie total quemada (P_i; i= 75% ... 95%). Esta proporción se calculó para el conjunto de todos los incendios, los originados por negligencias y los intencionados. Los patrones obtenidos para las distintas zonas fueron bastante similares y sólo se mostrará P_{90} (la más extrema). Los valores de P_{90} anuales fueron comparados entre pares de zonas de estudio por medio del test de la t de Student para muestras pareadas. El nivel de significación de estas comparaciones planeadas se fijó en $P \leq 0,05$. Adicionalmente, estos test se aplicaron también a las comparaciones, dentro de cada zona, de los incendios originados por negligencias y los intencionados, en cuyo caso el nivel de significación se fijó en $P \leq 0,01$. Los test estadísticos mencionados en este apartado se realizaron con el programa estadístico SPSS.

5.3. RESULTADOS

Las tres zonas empleadas (Figura 4.1), el número de incendios y la superficie quemada en cada una de ellas para el periodo 1974-88 (Figura 4.3) y las proporciones para las causas de origen de los incendios (Figura 4.4) se muestran en el Capítulo 4.

5.3.1. Distribución estacional de los incendios por causas y zonas

Los incendios estuvieron menos repartidos a lo largo del año en número y superficie quemada en la zona Centro y más repartidos, en general, en Levante. La zona Norte se situó entre ambas, con un proporción importante de los incendios en primavera (Figura 5.1A-B). La mayor parte de los incendios y de la superficie quemada se registró en apenas unas quincenas en los meses de verano. Los incendios originados por quema de pastos estuvieron muy repartidos a lo largo del año, tanto en el número de incendios como en la superficie quemada, particularmente en el Norte. En las zonas Centro y

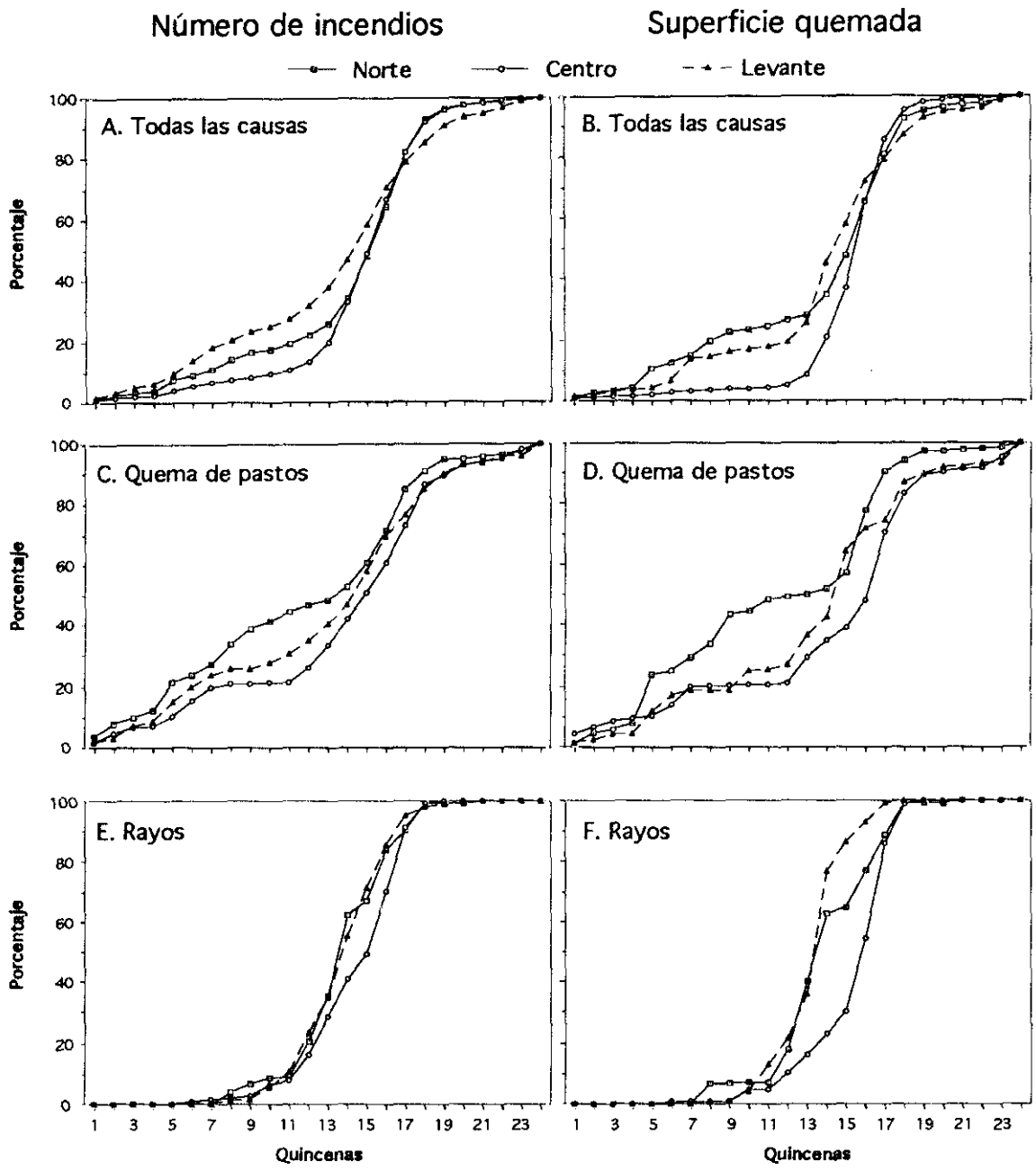


Figura 5.1. Frecuencias acumuladas del número de incendios (parte izquierda) y de la superficie quemada (parte derecha) a lo largo del año (en las 24 quincenas) en los incendios registrados en las zonas Norte, Centro y Levante durante el periodo 1974-88 para incendios originados por: (A-B) todas las causas; (C-D) quema de pastos; (E-F) rayos;

Levante la incidencia de incendios en el verano fue mayor, especialmente en el Centro (Figura 5.1C-D). Los incendios originados por rayos se registraron casi exclusivamente en los meses de verano, más temprano en Levante que en el Centro. La zona Norte se situó entre las dos, con los incendios algo más repartidos (Figura 5.1E-F). Los incendios

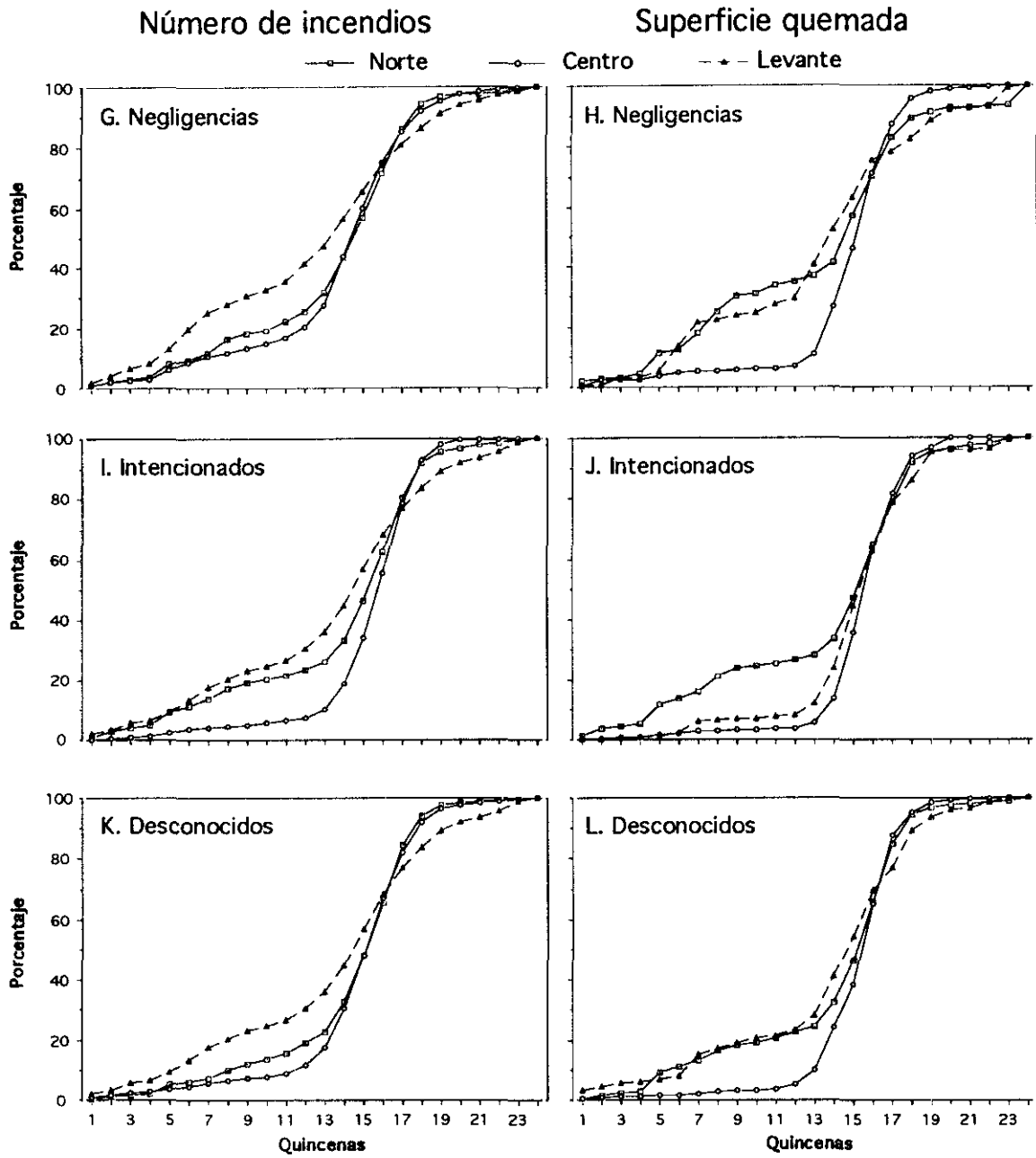


Figura 5.1. *(continuación)* (G-H) negligencias; (I-J) intencionados y (K-L) desconocidos.

originados por negligencias estuvieron más repartidos a lo largo del año en Levante que en las otras dos zonas, en número y también en superficie quemada, aunque en este último caso, también para la zona Norte, se registró una proporción importante de la superficie quemada en primavera. El Centro presentó una concentración importante en los meses de verano (Figura 5.1G-H). Los incendios de origen intencionado se produjeron más repartidos a lo largo del año en el Levante que en el Centro, y más aún para la superficie quemada, que se produjo mucho más agregada en el tiempo que el

situó entre estos dos patrones (Figura 5.1I-J). Los incendios de origen desconocidos presentaron un patrón similar al de los intencionados, repartidos en el Levante y concentrados en el Centro, con el Norte entre ambas zonas (Figura 5.1K-L). En general los incendios originados por quema de pastos fueron los más repartidos en el tiempo, seguidos de los originados accidentalmente (negligencias). Por otro lado, los incendios de origen intencionado fueron los más concentrados en el tiempo, seguidos de los originados por rayos. Los incendios de origen desconocido estuvieron próximos a los intencionados en la zona Norte, a los originados por negligencias o intencionados en el Centro, y a los originados por quema de pastos y por negligencias en el Levante.

Tabla 5.1. Coeficiente de correlación (r) entre PFO_{50} (para el número de incendios y la superficie quemada) y variables representativas de las temperaturas anuales en la zona Norte para todos los incendios, los originados por negligencias y los intencionados. Las correlaciones estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$; $n = 15$) están señaladas con *. Para los nombres de las variables climáticas ver Material y Métodos.

Variable	Todas las causas		Negligencias		Intencionados	
	Número de incendios	Superficie quemada	Número de incendios	Superficie quemada	Número de incendios	Superficie quemada
Tm	+ 0,14	+ 0,14	- 0,01	- 0,36	+ 0,01	- 0,01
Tmx	- 0,01	- 0,01	- 0,26	- 0,37	- 0,01	- 0,20
Dm20	- 0,36	- 0,26	- 0,50	+ 0,17	- 0,35	- 0,22
DM25	- 0,50	- 0,50	- 0,51	- 0,36	- 0,51	- 0,50
DM30	- 0,51	- 0,60*	- 0,49	- 0,14	- 0,53*	- 0,54*

El periodo en el que se produjo el 50% (PFO_{50}) del número de incendios de todas las causas fue, de manera estadísticamente significativa, más largo y más variable en el Levante que en el Centro (Figura 5.2A-B). Además, aparece una tendencia en estas dos zonas a que el PFO_{50} para la superficie quemada sea menor que para el número de incendios. Por otro lado el Norte presentó valores similares al PFO_{50} para el número de incendios con el Centro y para la superficie quemada similar al de Levante. La mayor variabilidad en el PFO_{50}, tanto para el número de incendios como para la superficie quemada, correspondió al Norte. Más aún, en esta zona el PFO_{50} para la superficie quemada fue más variable y de similar magnitud a la del número de incendios. Estos patrones fueron similares cuando los incendios se analizaron separadamente por la causa de ignición (negligencias o intencionados) (Figura 5.2A-B). En el caso de PFO_{50} para el número de incendios, las diferencias significativas entre el Centro y Levante se mantuvieron para negligencias y para intencionados.

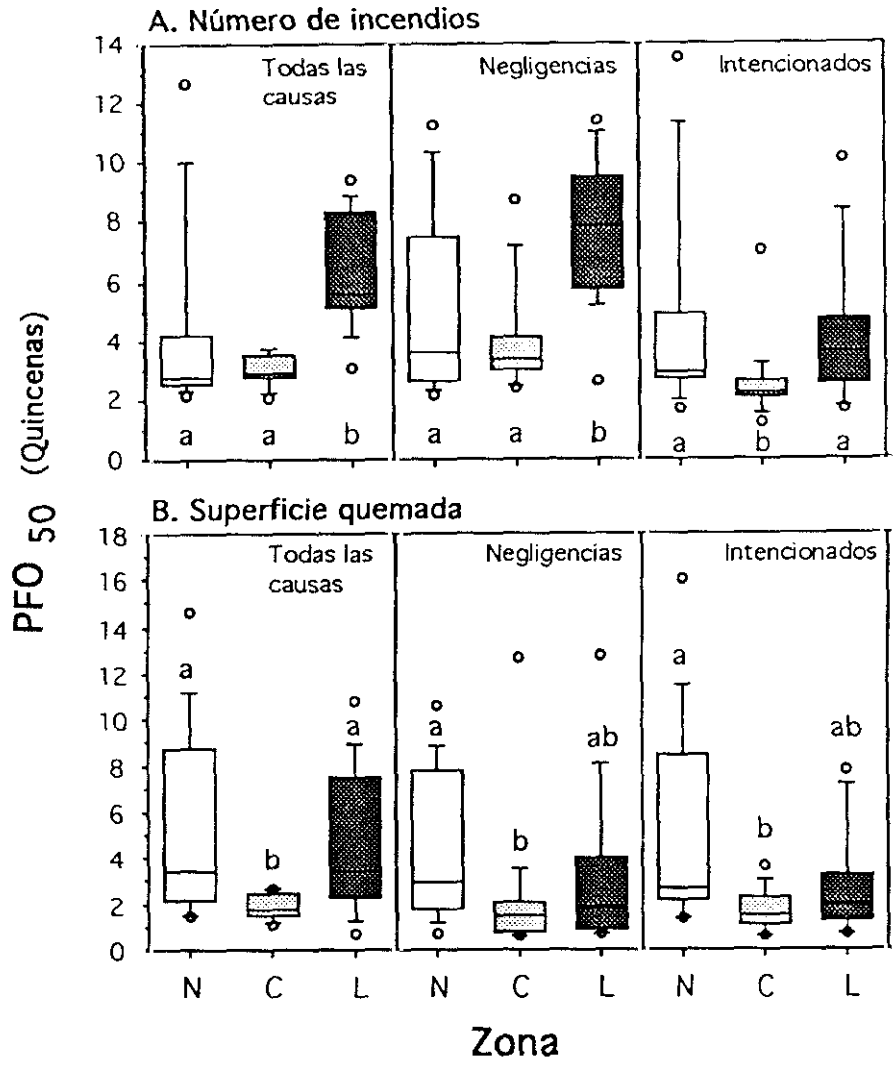


Figura 5.2. Representación de la duración del periodo en el que se ha registrado el 50% (PFO_{50}) del : (A) número de incendios y (B) superficie quemada en cada uno de los 15 años (1974-88) para todos los incendios, los originados por negligencias y los intencionados en las tres zonas. Los diagramas de cajas muestran la mediana, los cuartiles, los percentiles de 10% y 90% y los valores extremos. Para un mismo tipo de incendio, el PFO_{50} de las zonas que comparten la misma letra no ha sido significativamente distinto (P>0,05) de acuerdo con el test de rangos-signos y muestras pareadas de Wilcoxon entre pares de zonas de estudio (N=Norte, C=Centro y L=Levante).

En otros casos fue el Norte el que no presentó diferencias significativas en el valor de PFO_{50} para el número de incendios (intencionados) o la superficie quemada (negligencias o intencionados) al compararlo con Levante.

Las relaciones entre el periodo de incendios y las variables climáticas anuales fueron muy débiles. No se obtuvieron regresiones estadísticamente significativas entre el PFO_{50}

(número de incendios o superficie quemada) y variables relacionadas con las precipitaciones en ninguna de las tres zonas de estudio. En el caso de variables relacionadas con las temperaturas, sólo se obtuvieron regresiones significativas para la zona Norte (Tabla 5-1). El número de días al año con temperaturas máximas superiores a 25 ó 30 °C estuvieron negativamente relacionadas con el PFO_{50}, tanto para el número de incendios como para la superficie quemada, para todos los incendios, los de origen intencionado y algo menos para los originados por negligencias. Por tanto, cuantos más días cálidos se registraron en el año, más concentrados en el tiempo se produjeron los incendios. En la zona Centro, PFO_{50} para el número de incendios y la temperatura media de las máximas mensuales estuvo cerca del nivel de significación en el caso de todos los incendios, aunque en este caso las relaciones fueron positivas, como se habría esperado ($r=+0,51$; $P>0,05$). Por otro lado, el día juliano medio en el que ocurrieron los incendios no estuvo significativamente relacionado con ninguna de las variables climáticas en ninguna de las zonas (no mostrado). La desviación estándar del día juliano, para los incendios originados por todas las causas, estuvo negativa y significativamente relacionada con el número de días por encima de 30 °C en el Norte ($r = -0,59$; $P \leq 0,05$). No se obtuvo ninguna otra relación estadísticamente significativa para las otras zonas o para otras variables.

5.3.2. Patrones de tamaño

El tamaño medio de los incendios (± error estándar) fue de 20,3 (± 0,35), 35,2 (± 2,38) y 53,1 (± 5,36) hectáreas para las zonas Norte, Centro y Levante respectivamente. No obstante, las distribuciones de frecuencias estuvieron muy desviadas hacia los incendios de pequeño tamaño. De hecho, las medianas fueron de 4, 2 y 2 hectáreas para las tres zonas respectivamente (Figura 5.3A). Las diferencias en las distribuciones acumuladas de tamaños de los incendios entre las tres zonas fueron estadísticamente significativas (Figura 5.3 y Tabla 5-2). Las diferencias entre las tres zonas de estudio se mantuvieron cuando los incendios se segregaron a partir de la causa de inicio, excepto para los incendios originados por rayos, en cuyo caso las zonas Norte y Centro no presentaron diferencias estadísticamente significativas (Figura 5.3 y Tabla 5-2).

Dentro de cada una de las tres zonas, las distribuciones de tamaño de los incendios originados por distinta causa fueron en todos los casos significativamente distintas en el Norte. En la zona Centro, excepto para los incendios causados por negligencias y

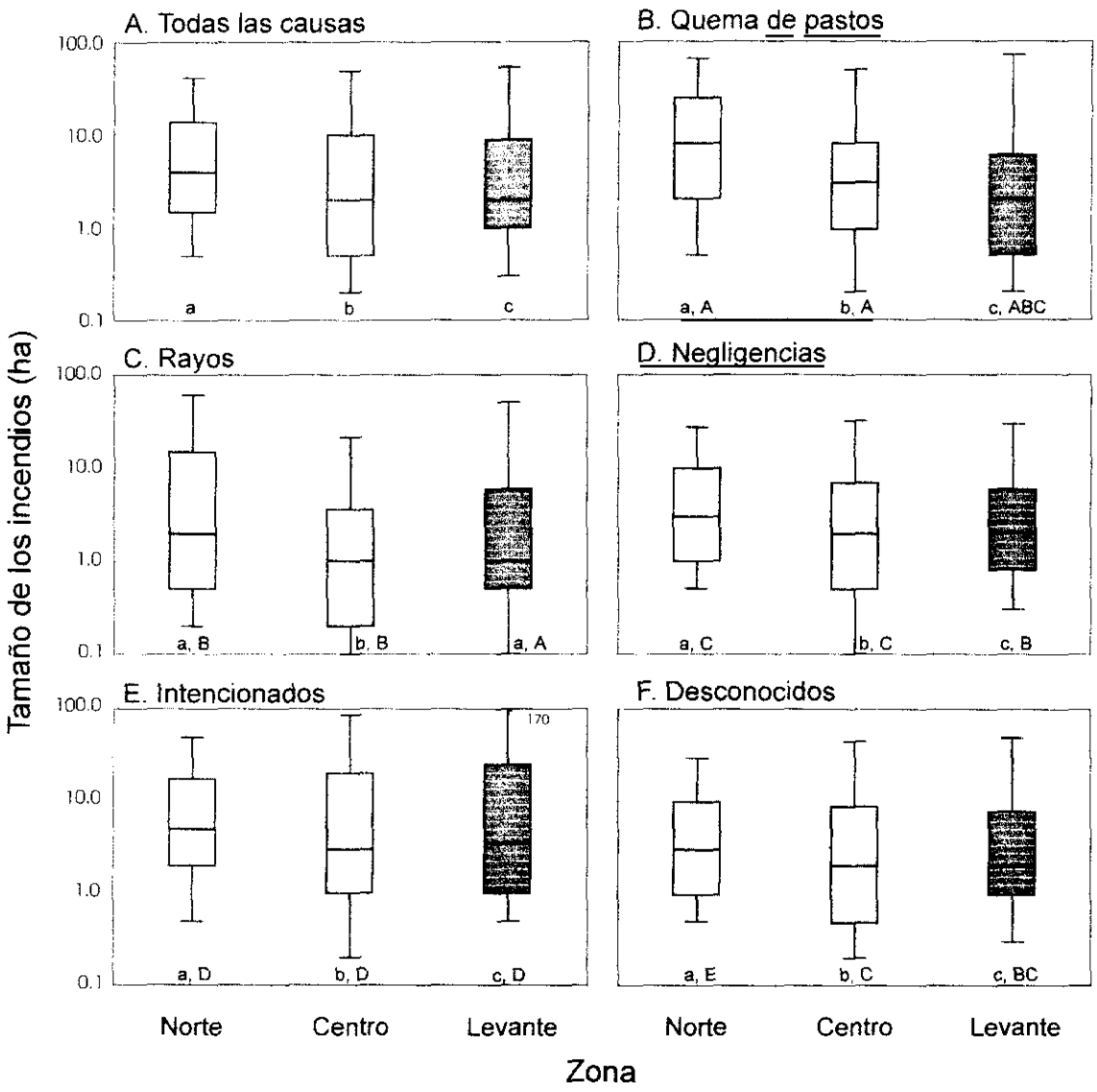


Figura 5.3. Representación de los tamaños registrados en las tres zonas para incendios originados por: (A) todas las causas; (B) quema de pastos; (C) rayos; (D) negligencias; (E) intencionados y (F) desconocidos. Los diagramas de cajas muestran la mediana, los cuartiles y los percentiles de 10% y 90% para los incendios registrados durante 1974-88. Para un mismo tipo de incendio, las zonas que comparten la misma letra (minúscula) no han resultado significativamente distintas (P>0,05) de acuerdo con el test de dos muestras de Kolmogorov-Smirnov. Además, para una misma zona, los tipos de incendios (B-F) que comparten la misma letra (mayúscula) no han sido significativamente distintos (P>0,01) de acuerdo con el mismo test.

desconocidos, las distribuciones de tamaños derivadas de los demás tipos de incendios fueron significativamente distintas entre ellas. Por el contrario, en el Levante sólo las

distribuciones derivadas de los incendios intencionados fueron significativamente distintas a las del resto de las causas (Figura 5.3).

Tabla 5.2. Valor de las significaciones (*P*) del test de Kolmogorov-Smirnov para las distribuciones de los tamaños acumulados para incendios con distinto tamaño umbral (≥0,1, ≥5 y ≥50 ha) entre pares de zonas. Se dan los valores obtenidos para todos los incendios y para los cinco tipos definidos a partir de la causa de inicio. (N=Norte, C=Centro y L= Levante).

Causa de inicio	*Comparación entre zonas*	*Tamaño del incendio*		
		≥ 0,1 ha	≥ 5 ha	≥ 50 ha
Todas las causas				
	N vs. C	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	N vs. L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	C vs. L	< 0,001	0,112	0,130
Quema de pastos				
	N vs. C	< 0,001	0,044	0,755
	N vs. L	< 0,001	0,085	0,057
	C vs. L	0,002	0,028	0,311
Rayos				
	N vs. C	< 0,001	0,645	0,111
	N vs. L	0,059	0,515	0,060
	C vs. L	0,005	0,943	0,996
Negligencias				
	N vs. C	< 0,001	0,001	0,020
	N vs. L	< 0,001	0,003	0,032
	C vs. L	< 0,001	0,969	0,950
Intencionados				
	N vs. C	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	N vs. L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	C vs. L	< 0,001	< 0,001	0,045
Desconocidos				
	N vs. C	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	N vs. L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	C vs. L	< 0,001	0,554	0,785

Cuando las comparaciones entre las tres zonas se realizaron empleando incendios con un tamaño mínimo determinado, ≥5 y ≥50 ha, los patrones de diferencias cambiaron (Tabla 5.2). Para los incendios originados por todas las causas, las diferencias entre la zona Norte y las dos zonas mediterráneas se mantuvieron. No así las diferencias entre el Centro y Levante que a partir del umbral de 5 ha fueron ya similares. Cuando se consideran los incendios derivados de distinta causa, en general, las diferencias en las distribuciones de tamaño entre el Norte y las zonas mediterráneas se mantuvieron para

los incendios intencionados, para los de origen desconocido y en menor medida para los originados por negligencias. Para los incendios originados por rayos y por quema de pastos sólo las diferencias entre Norte y Levante tendieron a mantenerse, pero no las diferencias entre Norte y Centro. En general, las distribuciones entre el Centro y Levante tendieron a no ser, de manera estadísticamente significativa, distintas excepto en el caso de los incendios intencionados.

Dentro de una misma zona, los patrones de relación entre las distribuciones de tamaño de los incendios originados por distinta causa también cambiaron al considerar un tamaño umbral, ≥0,1 y ≥5 ha, (Tabla 5.3). Para los incendios ≥5 ha, de diez comparaciones posibles, en 7 casos las diferencias fueron significativas en el Norte, en 4 ocasiones en el Centro y en 2 ocasiones en el Levante. Al nivel de incendios ≥50 ha todas las comparaciones proporcionaron diferencias estadísticamente no significativas con $P \leq 0,01$ (no mostradas).

Tabla 5.3. Valor de las significaciones (P) del test de Kolmogorov-Smirnov para las distribuciones de tamaños acumulados para los incendios ≥0,1 ha (diagonal izquierda, normal) y ≥5 ha (diagonal derecha, negrita) entre pares de tipos de incendio (quema de pastos, rayos, negligencias, intencionados y desconocidos) dentro de cada una de las tres zonas de estudio.

Zona		Causa de inicio				
		Quema de pastos	Rayos	Negligencias	Intencionados	Desconocidos
Norte						
	Quema de pastos	---	**0,277**	**0,009**	**0,200**	**0,001**
	Rayos	< 0,001	---	**0,001**	**0,024**	**< 0,001**
	Negligencias	< 0,001	< 0,001	---	**< 0,001**	**0,931**
	Intencionados	< 0,001	< 0,001	< 0,001	---	**< 0,001**
	Desconocidos	< 0,001	< 0,001	0,004	< 0,001	---
Centro						
	Quema de pastos	---	**0,680**	**0,518**	**0,002**	**0,034**
	Rayos	< 0,001	---	**0,744**	**0,289**	**0,671**
	Negligencias	0,001	< 0,001	---	**< 0,001**	**0,186**
	Intencionados	0,006	< 0,001	< 0,001	---	**0,003**
	Desconocidos	0,007	< 0,001	0,064	< 0,001	---
Levante						
	Quema de pastos	---	**0,725**	**0,096**	**0,867**	**0,212**
	Rayos	0,402	---	**0,204**	**0,406**	**0,239**
	Negligencias	0,318	0,005	---	**< 0,001**	**0,087**
	Intencionados	< 0,001	< 0,001	< 0,001	---	**< 0,001**
	Desconocidos	0,029	< 0,001	0,014	< 0,001	---

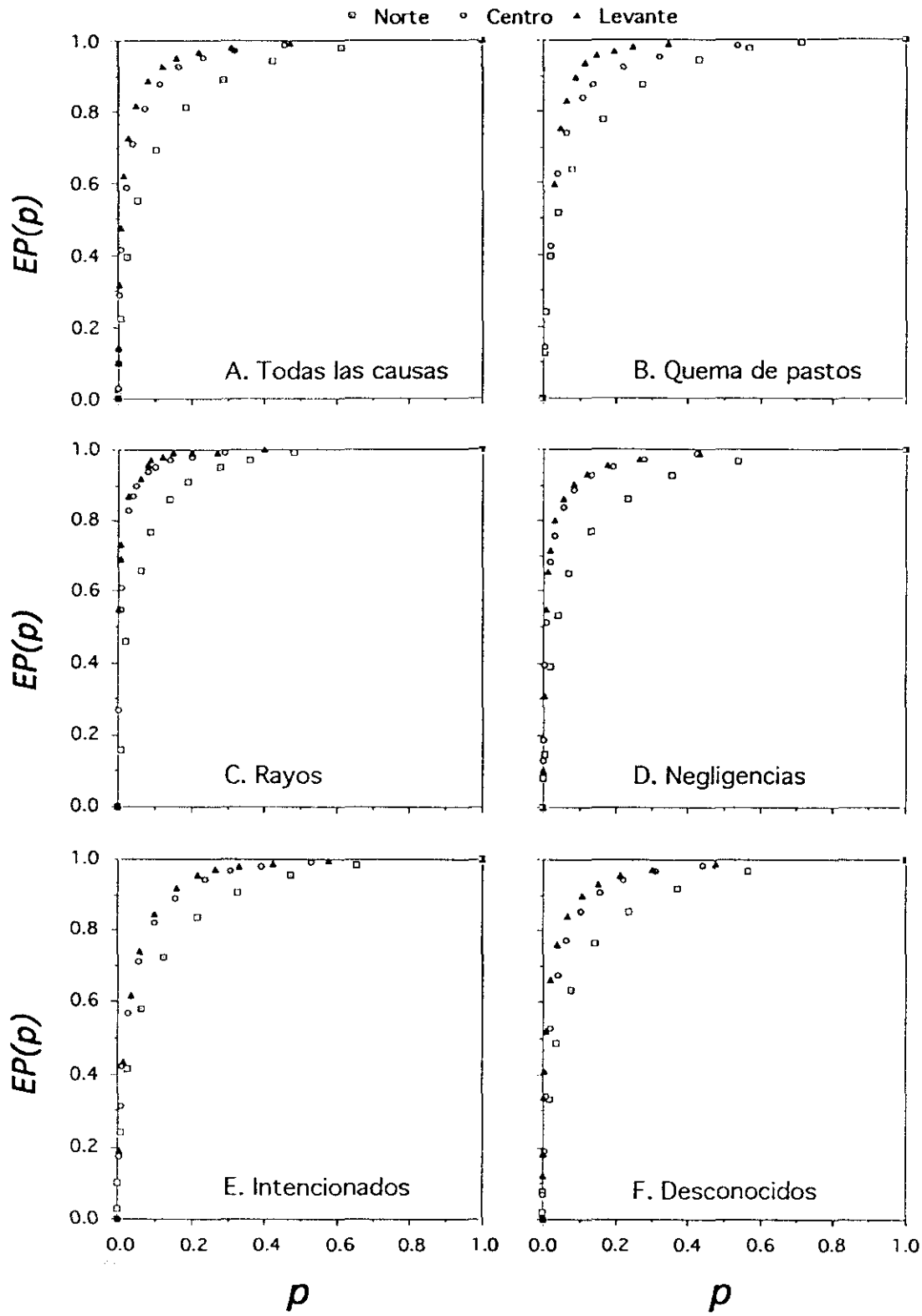


Figura 5.4. Representación de la proporción extrema *EP(p)* (superficie quemada) frente a *p* (una proporción dada de los incendios más grandes) para los incendios registrados en el periodo 1974-88 en cada una de las tres zonas de estudio y originados por: (A) todas las causas; (B) quema de pastos; (C) rayos; (D) negligencias; (E) intencionados y (F) desconocidos.

5.3.3. Desigualdades en el tamaño de los incendios. Representaciones gráficas

La desigualdad en el tamaño de los incendios, determinada por la superficie quemada por una proporción dada de los incendios mayores, fue menor en el Norte y mayor en el Centro y Levante. Estas dos últimas zonas se comportaron de manera bastante similar entre sí (Figura 5.4A). Para los 15 años de estudio el porcentaje de superficie quemada *EP(p)* para una proporción dada, *(p)*, de los incendios mayores fue menor en el Norte y mayor en Levante. De hecho, para este periodo, un 10% de los incendios mayores afectó a cerca de un 70% de la superficie total quemada en el Norte, 90% en el Centro y algo más en el Levante. Además, hubo una variación anual muy considerable para las tres zonas, como se puede observar por medio de las curvas anuales máximas (más convexas) y mínimas (más rectas) obtenidas (Figura 5.5). La zona Norte presentó una variabilidad anual menor a la de las otras dos zonas.

Los patrones de desigualdad en los tamaños, derivados de los incendios originados por distinta causa (Figura 5.4B-F), fueron muy similares a los obtenidos para todos los incendios. No obstante, dentro de la misma zona hubo diferencias entre los distintos tipos de incendio. En general, los incendios originados por rayos tendieron a ser los más extremos, con un porcentaje bajo de los incendios mayores afectando a una proporción muy elevada de la superficie quemada por este tipo de incendio. Es de destacar que en el Centro, y más aún en Levante, un 10% de los incendios mayores han afectado a más de un 95% de la superficie quemada. En contraposición, los incendios originados por quema de pastos o los intencionados dieron lugar a patrones de menor desigualdad, esto es, una mayor homogeneidad en los tamaños de los incendios. Los incendios originados por negligencias se situaron próximos a los originados por rayos y los incendios de origen desconocido próximos a los intencionados o a los originados por quema de pastos. En general, las diferencias entre los distintos tipos de incendio fueron mayores en las zonas Centro y Levante. En el Norte, con la excepción de los incendios originados por rayos, todos los demás tipos de incendio presentaron patrones muy similares, con las curvas solapándose en la mayor parte del rango de valores.

5.3.4. Ajustes de los datos observados

Entre los diversos modelos probados, la función de Pareto truncada proporcionó los mejores ajustes a los datos observados (Figura 5.6). Como se esperaba a partir de las curvas descritas previamente, los valores medios (de los ajustes anuales) del parámetro α

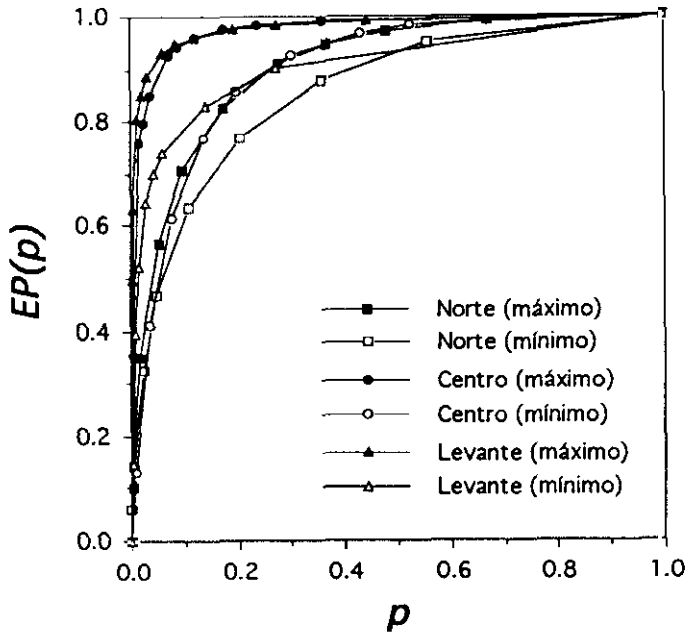


Figura 5.5. Representación de los máximos (curva más convexa) y mínimos (curva menos convexa) anuales de la proporción extrema *EP(p)* (superficie quemada) frente a *p* (una proporción dada de los incendios más grandes) para los incendios registrados en las tres zonas en el periodo 1974-88.

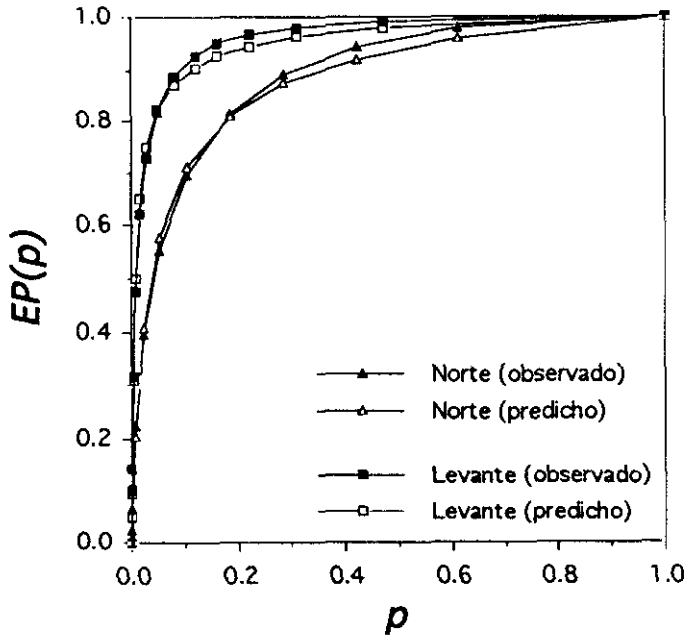


Figura 5.6. Representación de la proporción extrema *EP(p)* frente a *p* para los valores observados y predichos. Estos últimos se han obtenido por medio del ajuste de una función de distribución de Pareto truncada a los tamaños de los incendios registrados en las zonas Norte y Levante durante el periodo 1974-88. Los valores obtenidos para el parámetro α fueron 0,69, 0,61 y 0,63 y para el parámetro b de 450, 3076, y 6754 para las zonas Norte, Centro (no mostrada) y Levante respectivamente.

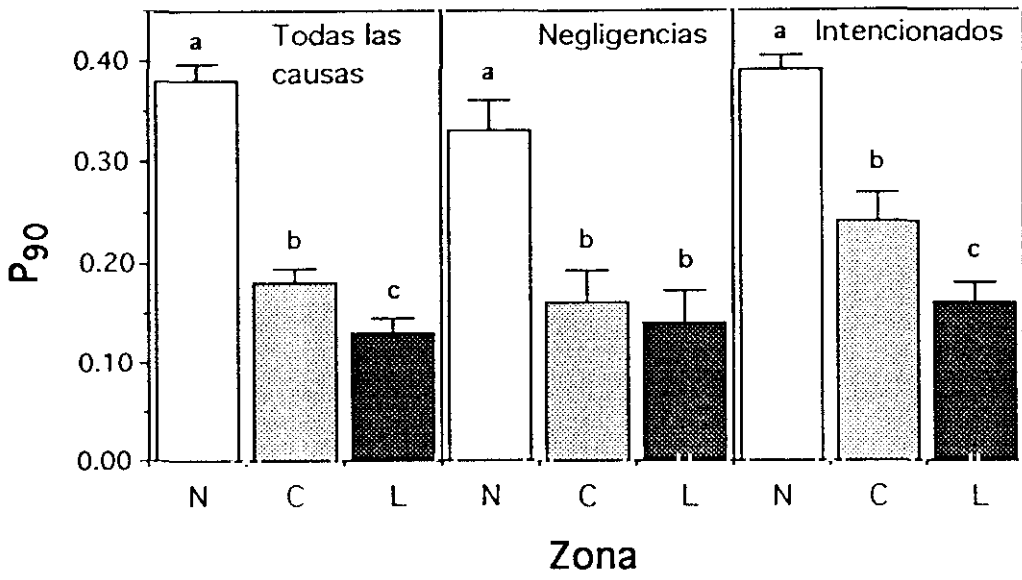


Figura 5.7. Proporción media (± 1 error estándar) de los incendios mayores necesarios para que se vea afectado el 90% de la superficie quemada anualmente (P_{90}) en cada una de las tres zonas de estudio para todos los incendios, los originados por negligencias y los intencionados. Para un mismo tipo de incendio, las zonas que comparten la misma letra no son significativamente distintas (P>0,05) de acuerdo con el test de la t de muestras pareadas entre pares de zonas (N=Norte; C=Centro y L=Levante).

disminuyeron desde la zona Norte a las dos zonas mediterráneas, siendo el valor más bajo para el Centro. Por otro lado el parámetro b aumentó desde el Norte al Levante.

La proporción de incendios mayores necesarios para quemar un 90% de la superficie total (P_{90}), derivado a partir de los parámetros obtenidos al ajustar la función de Pareto truncada a los datos anuales, ha sido significativamente distinta para las tres zonas (Figura 5.7). La zona Norte ha registrado los valores más altos y Levante los más bajos. Las diferencias entre las zonas Centro y Levante fueron reducidas. Este patrón general se mantuvo para los incendios originados por negligencias y para los intencionados. En el primer caso Centro y Levante no presentaron valores significativamente distintos de P_{90}. Es notable que los valores de P_{90} tendieron a ser mayores para los incendios intencionados aunque las diferencias entre los dos tipos de incendio dentro de cada zona no fueron en ningún caso estadísticamente significativas (P >>0,01).

5.3.5. Relaciones de P_{90} con las variables climáticas

De las correlaciones entre los diversos valores de P_i (de P_{75} a P_{95} en incrementos de 5%) y las variables climáticas anuales no se ha obtenido ninguna relación estadísticamente significativa para Levante. En el Centro, P_i y el número de días al año con temperatura ≥ 30 °C (DM30) tendieron a presentar un patrón de relaciones significativas al nivel de P_{75} (y proporciones menores) para los incendios de todas las causas (Figura 5.8). En la zona Centro no se obtuvo ninguna otra relación para los otros tipos de incendios y variables climáticas. En la zona Norte se obtuvieron patrones similares entre P_i y DM30 para el conjunto de todos los incendios y los de origen intencionado (Figura 5.8). En ambos casos se obtuvo una relación negativa, lo que indica que cuanto mayor sea el número de días con temperatura ≥ 30 °C menor es el valor de P_i, esto es, una menor proporción de los incendios será necesaria para afectar a una proporción dada de la superficie quemada. Los coeficientes de determinación obtenidos en este análisis fueron bajos (el más alto fue de r^2=0,36 para los incendios intencionados y P_{75} en la zona Norte). Por otra parte, en el Norte se obtuvo un patrón similar, aunque más débil, entre la temperatura media de las máximas mensuales (Tmx) y los dos tipos de incendios significativos en el anterior análisis: incendios de todas las causas (P=0,096 para P_{75}) y de origen intencionado (P=0,033 para P_{75}) (no mostrado)

Por otro lado, y también en la zona Norte, se obtuvo un patrón de correlaciones en aumento entre P_i (desde P_{75} a P_{95}) y la temperatura media de las medias mensuales (Tm) (P=0,05; r=+0,58 para P_{90}) o para el número de días con temperatura mínima ≥ 20 °C (Dm20) (P=0,05; r=+0,58 para P_{90}) (no mostrado). Estas relaciones indicarían que cuanto más altas sean las temperaturas medias mensuales o más elevado el número de días con mínimas ≥ 20 °C mayor será la proporción de los incendios mayores requeridos para quemar el 90% de la superficie. Estas relaciones han proporcionado valores estadísticamente significativos únicamente para los incendios originados por negligencias. Para las variables relacionadas con las precipitaciones no se obtuvo ninguna otra correlación significativa (con $P \leq 0,05$), o patrón de correlaciones claro, para ninguno de los tipos de incendio y en ninguna de las tres zonas (no mostrado).

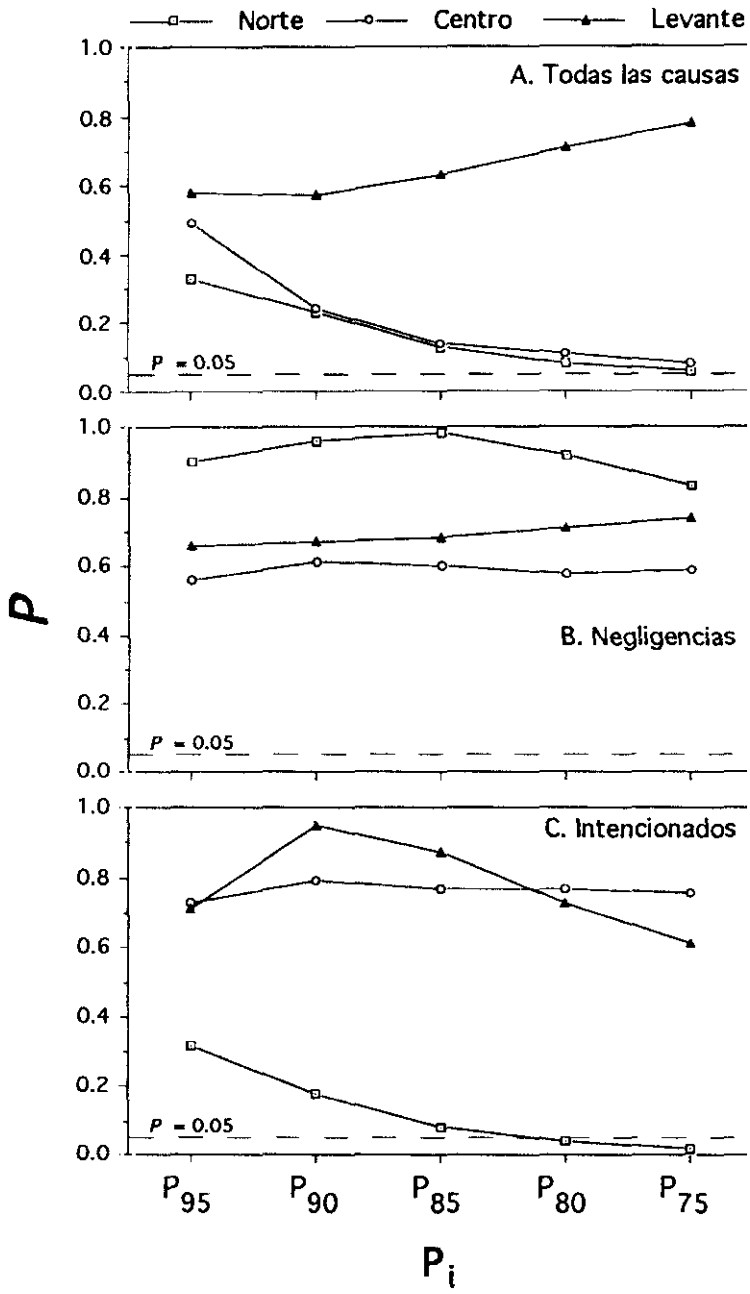


Figura 5.8. Valor de la significación (*P*) de las correlaciones entre varios valores de P_i (de P_{75} a P_{95}) y el número de días de temperatura máxima ≥ 30 °C en las tres zonas de estudio para los incendios originados por: (A) todas las causas; (B) negligencias y (C) intencionados. Los puntos situados por debajo de la línea punteada (*P*=0,05) presentarían correlaciones estadísticamente significativas.

5.4. DISCUSIÓN

5.4.1. Patrones temporales

El periodo en el que se produjeron los incendios se comportó de acuerdo con las hipótesis iniciales en las zonas Centro y Levante, pero no así en el Norte. De hecho, el periodo de actividad de incendios fue más largo y más variable anualmente en el Levante que en el Centro. La superficie quemada se ha mostrado más concentrada en el tiempo que el número total de incendios. Los incendios intencionados se han producido más agrupados en el tiempo que los incendios originados por rayos o por negligencias. Los incendios originados por quema de pastos se han presentado muy repartidos a lo largo del año, aunque en el Levante no mucho más que los originados por negligencias o por causas desconocidas. Estas tendencias fueron totalmente distintas en el Norte. En esta zona, el periodo en el que se produjeron los incendios fue largo, casi tanto como en Levante; el área quemada estuvo menos concentrada en el tiempo que el número de incendios; los incendios intencionados estuvieron más ampliamente repartidos que los incendios de origen natural (rayos) y de manera similar a los incendios iniciados por negligencias. La única hipótesis que se mantuvo fue que los incendios de quema de pastos serían los más ampliamente repartidos en el tiempo, con incendios prácticamente durante todo el año.

Las diferencias entre las tres zonas, y particularmente el fuerte contraste entre el Norte y las otras dos zonas, en un manera casi impredecible, indica la fuerte influencia que el hombre ejerce en los patrones de los incendios a lo largo del año. De manera no sorprendente, la zona con una mayor incidencia de incendios intencionados fue la más impredecible. Incluso los incendios originados por negligencias se comportaron de manera distinta a la esperada, lo que sugiere que las negligencias (incendios accidentales) pueden no estar asociadas a los mismos factores en las tres zonas.

Estos hechos señalan hacia un importante elemento en la predicción de los efectos del cambio global en cómo ocurren los incendios, que es que el papel fundamental del hombre no se debe olvidar. La manera en la que el hombre responda al cambio global puede influir en gran medida en cómo se producirán los incendios. Los cambios en el uso del territorio pueden afectar a este comportamiento y dar lugar a cambios importantes en el régimen de incendios. Por ejemplo, en las zonas Centro y Levante los incendios

originados intencionadamente se han registrado en el periodo de más riesgo, pero no en el Norte, donde los incendios intencionados y los desconocidos siguen más de cerca el patrón de los incendios de quema de pastos. El patrón de tamaños de los incendios originados por rayos sugiere que éstos podrían ser más catastróficos si ocurrieran en diferentes momentos del año o en diferentes lugares. Por otro lado, cambios en los patrones de inicio de los incendios intencionados podrían, en gran medida, alterar el patrón general de incidencia. En un trabajo previo (Capítulo 4) se señalaba cómo la incidencia de los incendios intencionados en las zonas Norte y Centro fue muy sensible a años cálidos, aumentando el número de incendios y la superficie quemada en los años con temperaturas máximas elevadas.

La relación negativa, y estadisticamente significativa, detectada entre PFO_{50} (para el número de incendios y para la superficie quemada) y el número de días con temperatura máxima elevada en la zona Norte señalaría a que en años cálidos la mayor parte de la superficie quemada se produciría en unos pocos días. Además, como se ha señalado previamente (Capítulo 4), en dichos años la incidencia de los incendios aumenta (en número de incendios y en superficie quemada). Por tanto, el periodo en el que han ocurrido los incendios (PFO_{50}) fue sensible no tanto a un calentamiento en general (temperaturas medias) sino a cómo se ha producido (número de días cálidos) a lo largo del año. Estos elementos señalan hacia una compleja interacción entre cómo ocurren los incendios y el cambio global. El que las relaciones descritas se mantengan es imposible de predecir, pero los servicios responsables deben tener en cuenta no sólo los cambios en la intencionalidad de los incendios, sino también los cambios en cuándo se producen y a la mayor sensibilidad durante los periodos cálidos.

5.4.2. Patrones de tamaño

Los resultados obtenidos han demostrado que las tres zonas han sido muy distintas en relación a los patrones de tamaño. Estas diferencias se han reflejado tanto en la distribución de tamaños, expresada como frecuencias acumuladas, como en las representaciones de la proporción extrema. En concordancia con las hipótesis iniciales, la desigualdad en el tamaño de los incendios fue mayor en la zona más cálida y seca, Levante, que en el Centro, y en ambas mayor que en la zona Norte. Adicionalmente, la variabilidad interanual de la desigualdad en el tamaño de los incendios fue muy alta en las tres zonas. Esta variabilidad tendió a ser mayor en la zona de mayor desigualdad (Levante). Si asumimos que las diferencias en la desigualdad de tamaños (y en su variabilidad interanual) en las tres zonas han respondido al gradiente climático analizado,

entonces los resultados señalarían hacia importantes consecuencias en relación al futuro cambio global. Cuanto más cálida y seca sea un área, mayor la desigualdad en el tamaño de los incendios, esto es, mayor será el peso de los grandes, sin duda los más perjudiciales. Además, dado que el tamaño de un incendio puede relacionarse positivamente con la intensidad del fuego, cambios en el tamaño de los incendios pueden dar lugar a cambios en la dinámica de muchos ecosistemas (Moreno y Oechel, 1994). No obstante, hay que ser prudente en estas interpretaciones dado que la desigualdad en el tamaño de los incendios puede haber respondido a diferencias en el paisaje de las distintas zonas, fundamentalmente en relación a las diferencias estructurales (y coyunturales) entre los territorios comparados y que se manifiestan en diferencias topográficas, de vegetación, de usos y manejos y también en diferencias en la eficacia y política de extinción de incendios (Minnich, 1983, 1989; Turner y Romme, 1994). Dado que estos elementos son muy difíciles de cuantificar en cualquiera de las tres zonas, no se puede excluir que las tendencias detectadas puedan, en cierta medida, haberse debido a estos factores.

5.4.3. Patrones de tamaño y variables climáticas

El patrón de relaciones entre P_i y las variables climáticas confirma la hipótesis planteada en el sentido de que si las hubiera, las relaciones significativas se obtendrían para la zona Norte más que para el Centro o Levante. Las relaciones obtenidas, en general, no fueron importantes lo que indica la existencia de otros elementos determinantes. No obstante es el patrón de relaciones lo que es indicativo de una vinculación estrecha entre variables climáticas y variables derivadas de la distribución de tamaños. Una cuestión de interés es que son los incendios más grandes (que afectan con mayor probabilidad a un 75% de la superficie quemada que a un 95%) los que mejor han estado relacionados con las variables relativas a las temperaturas. Las variables relativas a las precipitaciones no mostraron ninguna relación con la distribución de tamaños, a pesar de sí estar relacionadas con la incidencia (en número de incendios y superficie quemada) registrada en la zona de Levante (Capítulo 4). Los resultados han confirmado (de acuerdo con la hipótesis planteada) que áreas de clima más templado (zona Norte) pueden ser sensibles a cambios en las condiciones climáticas anuales en lo que respecta a los patrones estacionales y de tamaño de los incendios. Paradójicamente, áreas menos susceptibles, en principio, a los incendios, pueden ser un mejor indicador en la detección de modificaciones derivadas del cambio climático que áreas más proclives. Por otro lado, la falta de relaciones significativas entre variables climáticas y la desigualdad en el tamaño de los incendios en Levante, sugiere que variaciones en las condiciones medias

anuales pueden no verse reflejadas en la distribución de tamaños, particularmente en áreas más cálidas y secas. Este hecho puede ser relevante para entender el impacto del cambio climático en los incendios. La estructura de tamaños es muy sensible a los eventos extremos, es decir, a los grandes incendios. Estos incendios se producen bajo condiciones meteorológicas muy específicas, que pueden ser esporádicas y no reflejarse necesariamente en los valores anuales. Parece probable, por tanto, que aumentos en las condiciones extremas puedan resultar más significativos que cambios en las condiciones medias. Por tanto, las predicciones sobre el futuro cambio global basadas sólo en las condiciones medias pueden no reflejar el rango potencial de impactos. En este sentido, se ha señalado que el clima en el futuro puede estar caracterizado por un aumento en la frecuencia de situaciones meteorológicas extremas, tales como periodos de sequía (Rind et al., 1990) o periodos de temperaturas altas (Mearns et al., 1984). Dado el gran peso de los eventos extremos (grandes incendios), que es mayor en áreas más cálidas y secas, parece probable que pequeños cambios en la frecuencia de dichos eventos puedan tener efectos mucho más pronunciados. Una conclusión final podría ser que áreas de clima más templado, que se ha visto que pueden ser más predecibles en términos de interacciones entre clima e incendios, al aumentar la temperatura pueden volverse menos predecibles en términos de estructura de tamaño. Este hecho puede tener importantes consecuencias, tanto socioeconómicas como ecológicas.

Otra conclusión del estudio sobre la distribución de tamaños es que cuanto más cálida y seca sea una zona menos importantes son las variaciones en los elementos que afectarían a esta distribución. Los resultados obtenidos indican que es en la zona mas fría y húmeda en la que incendios de diferente tipo (originados por distinta causa) tienden a producir distribuciones de tamaños más diferenciadas entre sí, incluso cuando se consideran únicamente los incendios relativamente grandes ($\geq$ 50 ha). Parece como si al aumentar el tamaño de los incendios, en general bajo condiciones más extremas, éstas anularan las posibles variaciones introducidas por la fuente de ignición a través del momento o lugar en que se inicia el incendio.

Por otro lado, el tipo de incendio se ha mostrado como un factor importante en las distribuciones de tamaño de los incendios, particularmente en áreas frías y húmedas, y además su significación con respecto a las desigualdades en los tamaños (a partir de las representaciones de la proporción extrema) varía dependiendo de la zona. De hecho, las desigualdades en los tamaños de los incendios fueron generalmente diferentes dependiendo de la fuente de ignición. La única excepción ha sido la zona Norte, en la que excepto para los incendios originados por rayos, los demás tipos han dado lugar a representaciones de la proporción extrema muy similares. El hecho de que las mayores desigualdades en el tamaño de los incendios se obtuvieran para los incendios originados

en condiciones más aleatorias (por rayos y por negligencias) sugiere que el potencial para una mayor importancia de los eventos extremos puede ser mayor que en la actualidad. De acuerdo con una de las hipótesis iniciales, no cumplidas, los incendios intencionados darían lugar a menores desigualdades en los tamaños que los incendios originados en condiciones más aleatorias, lo que indica que los incendios intencionados se producen dentro de un rango de condiciones que pueden no incluir necesariamente las más extremas.

Capítulo 6

Cambios en la estructura del paisaje arbolado de una zona del Sistema Central

6.1. INTRODUCCIÓN

El Sistema Central, al igual que muchas de las áreas de montaña de España, se ha visto sometido en las últimas décadas a importantes cambios en los usos del territorio y, en consecuencia, a modificaciones de la cobertura vegetal que soporta. Estos cambios se han ido produciendo en paralelo a la evolución socioeconómica de sus poblaciones. La tendencia general en las áreas de montaña ha consistido en una disminución de la superficie dedicada a cultivos y pastos, produciéndose un aumento paralelo de las áreas forestales, bien cubiertas por matorrales bien por vegetación arbórea. Esto ha ocurrido tanto en España (Fernández et al., 1992; Lasanta, 1988; Lasanta et al., 1989; Llorente, 1995; Zárate, 1995), como en otros países de nuestro entorno (Debussche et al., 1987; Grove, 1992; Vos, 1993). El aumento del arbolado se ha producido bien por sucesión natural en terrenos abandonados, bien por plantaciones con especies forestales de interés comercial, plantaciones que marcaron la pauta de las acciones forestales durante los años 50 y 60 (MAPA, 1988).

Dentro del ámbito de la ecología se ha definido el paisaje como el conjunto de elementos de un territorio ligados por relaciones de interdependencia (Bernáldez, 1981). Los paisajes, por tanto, están compuestos por unidades espaciales, teselas (Bolós, 1963), o ecosistemas si se prefiere, diferentes en base a la cobertura vegetal que soportan, sus características fisiográficas, tipos de uso, etc., considerando éstos en porciones de territorio del tamaño de kilómetros (Naveh y Lieberman, 1984; Forman y Godron, 1986). Al igual que en los ecosistemas, en los paisajes podemos distinguir tres características fundamentales: estructura, función y cambio (Forman y Godron, 1986; Risser, 1987; Turner, 1989). Por estructura del paisaje entendemos el número, tamaño, forma y configuración espacial de los distintos elementos que lo componen. Las interacciones entre estos distintos elementos (flujos de energía, materiales y especies, propagación de perturbaciones, etc.) definen su funcionamiento. Por último, el cambio hace referencia a las alteraciones en la estructura o el funcionamiento del mosaico paisajístico a lo largo del tiempo resultantes de los cambios en una u otra componente. Por lo que concierne al tema de este trabajo, el interés se centrará en conocer la configuración espacial de elementos estructurales que definen el territorio de estudio por cuanto dicha estructura puede afectar a un proceso de interés: perturbación por el fuego.

Los llamados paisajes culturales, propios de áreas en los que existe o ha existido una influencia humana importante, forman frecuentemente un mosaico espacial complejo, de

grano fino, el mantenimiento de cuya estructura depende básicamente del manejo por el hombre y de los usos y perturbaciones a que se encuentre sometido (Naveh, 1987; Haber, 1990). Naveh (1994) considera a estos paisajes, entre los que se encuentran buena parte de los de tipo mediterráneo, como paisajes "homeorréticos", esto es, dependientes del cambio y de las perturbaciones. Se pueden considerar como paisajes estables en el tiempo pero con un cambio incesante marcado por la actividad humana. Precisamente, en estos paisajes altamente humanizados, los cambios resultantes en modificaciones de la estructura y funcionamiento, están controlados por una combinación de factores naturales y humanos, cada uno de los cuales opera a diferentes escalas espaciales y temporales (Dunn et al., 1990). Además, la influencia que el hombre ejerce sobre el paisaje depende en gran medida de las condiciones sociales del entorno y por tanto es cambiante en el tiempo.

Un concepto intrínseco a la definición de paisaje es el de heterogeneidad. La heterogeneidad adquiere un sentido claro en oposición a homogeneidad, y hace referencia a la medida de los tipos, abundancias o distribución proporcional de los distintos elementos del paisaje. Sin embargo, su percepción dependerá del nivel de observación, tanto espacial como temporal, que se establezca en el estudio (Kolasa y Rollo, 1991). A nivel espacial es además importante definir dos aspectos de la escala: por un lado la escala de medida (o tamaño de grano) que hace referencia al grado de resolución alcanzado en el muestreo o la interpretación realizada y, por otro lado, la escala espacial (o extensión) que representa el ámbito territorial del estudio (Allen y Hoekstra, 1991; Meentemeyer y Box, 1987).

Las interacciones entre la estructura de un paisaje y las perturbaciones son un tema de actualidad en la ecología del paisaje (Godron y Forman, 1983; Turner, 1989). Las modificaciones en los usos del territorio y, por tanto, los cambios que tales usos introducen en el paisaje, se han señalado como elementos determinantes del aumento en el número de incendios y en la superficie quemada registrados en los países europeos de la cuenca mediterránea (Trabaud, 1977; Le Houerou, 1987; Moreno, 1989; Rego, 1991). Estas propuestas tienen su base en una mejor propagación del fuego a través de sistemas con una continuidad alta de los combustibles. Así, se ha podido establecer mediante simulación basada en modelos neutrales (Gardner et al., 1987) cómo la propagación de una perturbación por un territorio aumenta de forma no lineal conforme aumenta la proporción de los elementos del paisaje que son susceptibles de propagar dicha perturbación (Turner et al., 1989a). En otras palabras, las relaciones entre la estructura del paisaje y su funcionamiento, en este caso, su susceptibilidad a una perturbación, no son lineales, antes bien, cambios pequeños en la estructura pueden suponer grandes modificaciones en la susceptibilidad del mismo a dicha perturbación (Knight, 1987;

Turner et al., 1989a). Green et al. (1991) aplican estos conceptos a la simulación espacial del comportamiento del fuego, demostrando igualmente la relación no lineal entre proporción de territorio susceptible de arder y territorio finalmente recorrido por el fuego.

El interés de estas relaciones teóricas para conocer la susceptibilidad de un territorio a los incendios forestales hace que sea imprescindible conocer con el mayor detalle posible estas interacciones en zonas que han sido afectadas por el fuego y, en concreto, conocer los cambios en la estructura paisajística que hayan podido repercutir en los incendios. Por otro lado, es conocido que alteraciones en el régimen de incendios pueden, a su vez, dar lugar a cambios en la estructura del paisaje (Baker, 1992; Davis y Burrows, 1994), cambios que, de nuevo, pueden incidir sobre el propio régimen de incendios. La relación circular que se establece entre estructura y función del paisaje es más clara en zonas afectadas por una perturbación como el fuego, y sirve, a su vez, de base para comprobar hipótesis más generales acerca de la interacción estructura-función. Este es otro de los focos de esta investigación que será abordado en este capítulo y en el siguiente.

El objetivo principal de este trabajo ha sido determinar qué cambios se han producido durante las últimas décadas en el paisaje en una zona del Sistema Central fuertemente afectada por los incendios forestales. En concreto, se quería analizar los cambios que se han producido en el arbolado de una zona forestal, en la que el fuego ha desempeñado un papel importante, con el fin último de determinar las posibles interacciones entre la estructura de la masas arboladas y los incendios.

La principal hipótesis de trabajo en relación a la evolución del arbolado en los últimos años se basa en lo siguiente: Los cambios en el uso del territorio, bien por abandono de cultivos marginales y pastos, bien por la realización de plantaciones forestales de interés comercial, habrían originado cambios en la estructura del paisaje resultantes en una mayor densidad del arbolado (más arbolado por unidad de superficie), en un menor número de manchas arboladas, siendo éstas más grandes y con una mayor continuidad entre ellas. De esta manera, se habría pasado de un paisaje forestal con el arbolado disperso por todo el territorio (fragmentado en grupos pequeños) a otro con una mayor agregación en determinadas áreas y formando manchas más densas (con menos claros entre el arbolado). Consecuentemente, la configuración espacial resultante de estos cambios se debería haber traducido en una menor diversidad del paisaje arbolado, detectable a partir de medidas de la complejidad espacial del paisaje arbolado. Los procesos anteriores deberían haber resultado en una mayor superficie arbolada total, sólo contrarrestada por la presencia de los incendios. Además, los incendios habrían tenido una incidencia sobre la matriz forestal distinta a la representada por el aprovechamiento

forestal (cortas de arbolado), debido a las diferencias en la forma y tamaño de las manchas resultantes.

El énfasis de este trabajo se ha dirigido al arbolado al ser éste el principal elemento en la configuración del paisaje en este territorio, y al ser los incendios de copas frecuentes en la zona de estudio. Esto justifica que nos hayamos centrado en elementos que pueden tener una mayor incidencia en este tipo de incendios, los más peligrosos. El procedimiento elegido ha consistido en identificar en fotografías aéreas de dos años (1957 y 1985) las áreas cubiertas por arbolado con los objetivos concretos de: (1) Realizar una cartografía de la distribución de la superficie arbolada en los dos años analizados (1957 y 1985). (2) Analizar la distribución espacial del arbolado (número de manchas, tamaños medios y máximos) en dos fechas separadas entre sí 28 años y comparar las distribuciones de tamaño derivadas de estas manchas. (3) Cuantificar la configuración espacial del arbolado por medio de índices estructurales del paisaje (índices de dominancia, contagio y dimensión fractal) en los dos años que enmarcan el periodo de estudio y determinar si se han producido cambios en dicho periodo. (4) Cuantificar los cambios ocurridos en la distribución espacial del arbolado (ganancias, pérdidas o sin cambios en el arbolado) y analizar de qué manera se han producido. (5) Analizar los cambios en el arbolado en relación a las perturbaciones detectadas (incendios documentados y otras alteraciones en la cobertura arbolada, presumiblemente cortas del arbolado) y (6) Valorar el efecto de la escala de medida sobre las diversas medidas de paisaje realizadas.

6.2. MATERIAL Y MÉTODOS

6.2.1. Área de estudio

La zona de estudio está situada en la vertiente meridional de la Sierra de Gredos, dentro de la comarca de las Cinco Villas (Ávila) y afectando a gran parte de los términos municipales de El Hornillo, Mombeltrán y El Arenal (Figura 6.1). El territorio estudiado está delimitado por las coordenadas UTM 4456-4463 y 320-329 (zona 30T), comprendiendo una extensión de 9x7 km (6300 ha). La zona es muy accidentada, con altitudes que van desde los 600 m en las zonas más bajas a los 2200 m en las zonas de cumbres. La vegetación potencial de la zona pertenece a la serie mesomediterránea húmeda del roble melojo (*Arbuto-Querceto pyrenaicae sigmetum*) en altitudes inferiores a 800 m, a la serie supramediterránea subhúmeda del roble melojo (*Luzulo forsteri-Querceto pyrenaicae sigmetum)* en altitudes comprendidas entre los 800 y 1600 m y a la serie oromediterránea del piorno serrano (*Cytiso purganti-Echinosparteto bardanessi sigmetum)* por encima de los 1600 m y hasta las cumbres (Rivas-Martínez, 1987a). La primera serie estaría enclavada en el sector biogeográfico Luso-Extremadurense y las dos restantes en el Bejarano-Gredense (Rivas-Martínez, 1987b).

La superficie arbolada está dominada fundamentalmente por *Pinus pinaster* Aiton y en altitudes más elevadas por *Pinus sylvestris* L. Los montes, en su mayoría catalogados como de Utilidad Pública, son manejados de manera que se favorece la implantación de pinares por medio del semillado de las zonas incendiadas y el desbroce y limpieza del matorral espontáneo. En la actualidad, el principal aprovechamiento de la zona es la producción de madera. La superficie ocupada por arbolado de coníferas, según el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos a escala 1:50.000 (Ministerio de Agricultura, 1978), predomina en la zona junto a áreas poco importantes de cultivos agrícolas situadas en los alrededores de los tres núcleos de población presentes dentro de la zona estudiada (ver la Figura 7.2 para más detalles sobre los distintos usos).

6.2.2. Interpretación de las fotografías aéreas

La cartografía del arbolado en las dos fechas de estudio (1957 y 1985) se ha efectuado a partir de fotografías aéreas en blanco y negro a una escala nominal de 1:30.000. Los vuelos de ambas colecciones fotográficas fueron realizados por la mañana

y durante los meses de junio del año respectivo, lo que las hace visualmente más homogéneas. La interpretación realizada se ha basado en el rotulado sobre transparencias colocadas encima de las fotografías de las áreas ocupadas por la vegetación arbórea. Solamente se rotularon aquellas manchas que presentaban una estructura arbórea, habiéndose excluido de dicha condición algunos cultivos arbóreos de interés agrícola claramente diferenciables de los forestales (olivares principalmente). La interpretación se realizó con pares fotográficos y usando un estereoscopio para incrementar la precisión en la interpretación. Las transparencias correspondientes a cada fotografía fueron capturadas por medio de un escáner. La captura de una distancia de aproximadamente 1 km, horizontal o vertical, supuso 120 píxeles, por lo que la resolución teórica obtenida, esto es, el tamaño de grano, fue de 8,3 m. Esta resolución fue mayor que la que era posible obtener en el rotulado. Cartersen (1991) estudia la utilidad del escáner en la conversión de formato analógico (transparencias) a digital (imágenes) y la precisión espacial que presentan, concluyendo que este procedimiento es adecuado para estudios como el aquí realizado.

Para minimizar las distorsiones implícitas en las fotografías aéreas, sobre todo en zonas con elevado desnivel como la aquí estudiada, sólo se interpretaron las áreas centrales de cada fotografía, normalmente las comprendidas por un rectángulo de 2x4 km. Además, también se interpretó una banda de, aproximadamente, 750 m en los bordes de cada rectángulo, necesaria para las correcciones geométricas, obteniéndose así un buen solapamiento entre imágenes contiguas. El área total interpretada para 1957 fue de 10x8 km y para 1985 de 9x9 km. Para cada año se emplearon 8 fotografías distintas correspondientes a dos pasadas. El área común resultante para los dos años fue de 9x7 km, siendo ésta la superficie finalmente analizada en este trabajo (Apéndice 6.1).

6.2.3. Correcciones geométricas

Cada una de las 16 imágenes generadas por el escáner fue corregida geométricamente de manera individual, para lo cual se utilizó un conjunto de puntos de control repartidos lo más ampliamente posible en cada imagen. Estos mismos puntos de control se localizaron en mapas topográficos a escala 1:25.000 del Servicio Geográfico Nacional. El Apéndice 6.1 resume el número de puntos de control usados finalmente en las ecuaciones de ajuste y los errores cuadráticos medios (RMSE) (Chuvieco, 1990) obtenidos para cada imagen.

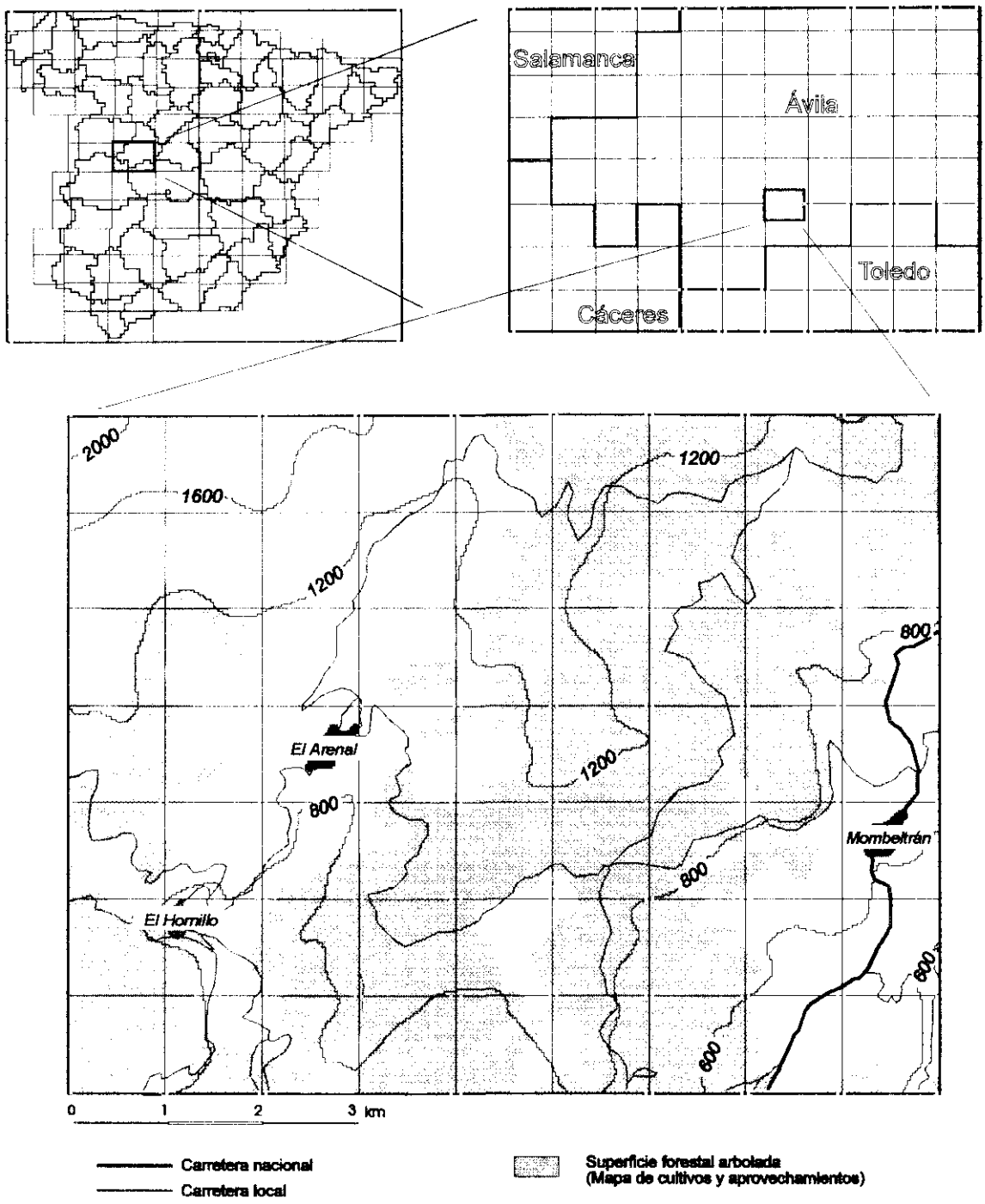


Figura 6.1. Localización de la zona de estudio en España con detalle de la hoja 1:200.000 del Instituto Geográfico del Ejército en la que se encuentra. Las áreas sombreadas dentro de los 9x7 km estudiados corresponden a la superficie forestal arbolada tomada del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos a escala 1:50.000 (MAPA, 1978). Se incluyen las principales curvas de nivel, los núcleos de población y la red de comunicaciones.

Las correcciones se efectuaron usando ecuaciones lineales o cuadráticas dependiendo del ajuste obtenido y por inspección visual de las imágenes resultantes. El método de remuestreo de los píxeles vecinos empleado fue la interpolación bilineal. Las 16 imágenes fueron corregistradas geométricamente de manera independiente usando un sistema de referencia planar alineado con la proyección UTM. El ensamblaje de las 8 imágenes correspondientes a cada año dio lugar a las dos imágenes mostradas más adelante (Figura 6.2).

6.2.4. Análisis de las imágenes

6.2.4.1. Manchas de arbolado

En este trabajo se ha definido como mancha arbolada el conjunto de píxeles contiguos, adyacentes en dirección horizontal o vertical (dos direcciones), y pertenecientes a la misma categoría (arbolado). El número total de manchas de arbolado y la distribución de tamaños obtenida para los dos años se ha cuantificado en las imágenes binarias (arbolado/no arbolado) con un tamaño de píxel de 8,3 m. De manera alternativa se han individualizado las manchas considerando también las conexiones diagonales entre píxeles de la misma categoría (4 direcciones). En general, y salvo que se indique lo contrario, los datos que se muestran más adelante se basan en la consideración de manchas a partir de píxeles contiguos en dos direcciones.

6.2.4.2. Clases de densidad de arbolado

A partir de las imágenes binarias iniciales (píxel=8,3 m) se han derivado imágenes con un tamaño de píxel de 25, 50, 75 y 100 metros, que representan la agregación de 9, 36, 81 y 144 píxeles, respectivamente. En estas nuevas imágenes se han distinguido cuatro clases de densidad de arbolado en función de la proporción de píxeles de arbolado frente al total de píxeles correspondientes a cada nivel de agregación. Las clases de densidad de arbolado definidas han sido:

- Clase 0. *No arbolado*: ninguno de los píxeles de las imágenes originales (8,3 m) que se agregaron para formar el nuevo tamaño de píxel eran de arbolado.
- Clase 1. *Densidad baja*: hasta un 33% de los píxeles agregados para dar el nuevo tamaño de celdilla eran arbolados. Estos píxeles representan manchas pequeñas de arbolado disperso y áreas periféricas de las manchas más densas.

- Clase 2. *Densidad media*: los píxeles agregados para dar el de mayor tamaño eran arbolados entre un 33% y un 66%. Estos píxeles se asocian a los límites de las manchas de arbolado o a zonas de cobertura media.
- Clase 3. *Densidad alta*: los píxeles agregados para dar el de mayor tamaño eran arbolados en más de un 66% de los casos y se corresponderían con áreas de arbolado muy denso y cobertura continua con pocos claros.

6.2.5. Índices estructurales del paisaje arbolado

El análisis de la configuración espacial del arbolado a partir de las tres clases de densidad establecidas (clases 1, 2 y 3) se ha llevado a cabo por medio del cálculo de tres índices utilizados frecuentemente en el estudio de la estructura del paisaje: índices de dominancia, contagio y dimensión fractal. Estos índices se han calculado para cada una de las cuadrículas de 1x1 km en que se ha dividido el territorio, para cada uno de los dos años estudiados y para dos escalas de medida (tamaños de píxel de 25 y 50 m). Cada uno de estos índices está diseñado para medir diferentes aspectos relacionados con la distribución y la complejidad espacial de los distintos elementos del paisaje (Krummel et al., 1987; O'Neill et al., 1988; Turner, 1989). En nuestro caso, los elementos considerados han sido las clases de densidad establecidas para el arbolado. El cálculo de estos tres índices para los polígonos delimitados por las tres clases de densidad en cada cuadrícula se ha realizado mediante los programas desarrollados por Bueno (1992) en lenguaje "C" para el software IPW (Image Procesing Workbench).

6.2.5.1. Índice de dominancia

El primer índice, D, es una medida de la dominancia (homogeneidad) de las clases de densidad presentes en cada cuadrícula (O'Neill et al., 1988). La ecuación empleada para su cálculo está basada en la Teoría de la Información (Shanon y Weaver, 1963).

$$D = \left(H_{max} + \sum_{k=1}^{m} (P_k) \ln (P_k) \right) / H_{max}$$

D = índice de dominancia

m = número de clases

P_k = proporción de píxeles de la clase k.

H_{max} = $\ln(m)$ = diversidad máxima cuando todas las clases están presentes en igual proporción.

La división por H_{max} normaliza el índice para cuadrículas con diferente número de clases y resulta en valores de 0 a 1 (Turner, 1990)

Según este índice, las cuadrículas con un valor de D alto estarían dominadas por una sola clase de densidad de arbolado mientras que valores bajos serían indicativos de un paisaje arbolado con una distribución más equitativa entre las diferentes clases de arbolado. En suma, las cuadrículas con D alto presentarían una baja diversidad paisajística con respecto al arbolado, mientras que aquellas con un índice D bajo tendrían una diversidad más alta.

6.2.5.2. Índice de contagio

El segundo índice, C, informa del grado de agregación o contagio entre píxeles de la misma clase, esto es, el número de lados compartidos entre píxeles de la misma clase de densidad (O'Neill et al., 1988). Al igual que el índice de dominancia está basado en la Teoría de la Información (Shanon y Weaver, 1963).

$$C = (K_{max} + \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} (Q_{ij}) \ln(Q_{ij})) / K_{max}$$

C = índice de contagio

Q_{ij} = proporción de píxeles de clase *i* adyacentes a píxeles de clase *j*. $Q_{ij} = n_{ij} / \sum_{j=1}^{m} n_{ij}$

donde n_{ij} es el número de contactos entre las clases *i* y *j*.

m = número de clases de densidad

$K_{max} = (m)\ln(m)$ = adyacencia máxima equiprobable entre todas las clases, sería el número máximo de contagios.

La división por K_{max} normaliza el índice para cuadrículas con diferente número de clases y da lugar a valores de 0 a 1 (Turner, 1990).

Según este índice, C, cuadrículas con un valor alto se obtendrían cuando los píxeles de la misma clase de densidad de arbolado se presentan juntos (formando agregados) y bajo cuando los píxeles de las distintas clases están muy entremezclados entre sí, sin formar agregados.

6.2.5.3. Dimensión fractal

El tercer índice, δ, es una medida de la complejidad geométrica de las manchas formadas por píxeles de la misma clase de densidad (Krummel et al., 1987). Este índice está basado en la teoría de los fractales (Mandelbrot, 1983). La ecuación usada en la estimación de la dimensión fractal es la siguiente:

$\delta = 2\,\beta_1$

δ = dimensión fractal

β_1 = pendiente de la regresión de ln(área) frente al ln(perímetro/4) para cada mancha (píxeles contiguos) de cada clase de densidad presente.

El valor de δ va desde 1 para una mancha cuadrada hasta 2 para una mancha con el mismo área y un perímetro muchísimo más complejo (O'Neill et al., 1988; Turner, 1989; Sugihara y May, 1990). Esto es, el valor del índice será alto cuando las formas de las manchas de la misma clase de densidad sean geométricamente complejas y bajo cuando las manchas dan lugar a formas geométricamente simples.

La interpretación de estos índices plantea la dificultad de ser dependiente de la escala de medida (en nuestro caso el tamaño de píxel empleado) del paisaje al que se apliquen (Turner, 1990; Bueno, 1992). Esta consideración hace que no se puedan comparar los valores obtenidos en las dos escalas de medida para las que se han computado dichos índices: 25 y 50 metros. En cambio, sí es válida la comparación entre los dos años para cada uno de los dos tamaños de píxel. Otra limitación asociada a estos índices es que están calculados para cuadrículas con un diferente número de píxeles, ya que la proporción de arbolado en cada cuadrícula de 1x1 km no es fija. De las 63 cuadrículas de 1x1 km presentes en el área de estudio se han eliminado las que presentaban en alguno de los dos años una superficie arbolada menor a un 5% de la superficie total de la cuadrícula. La eliminación de estas cuadrículas se hizo *a posteriori*, estando justificada por la falta de significación de los resultados que se obtendrían en el curso de los análisis.

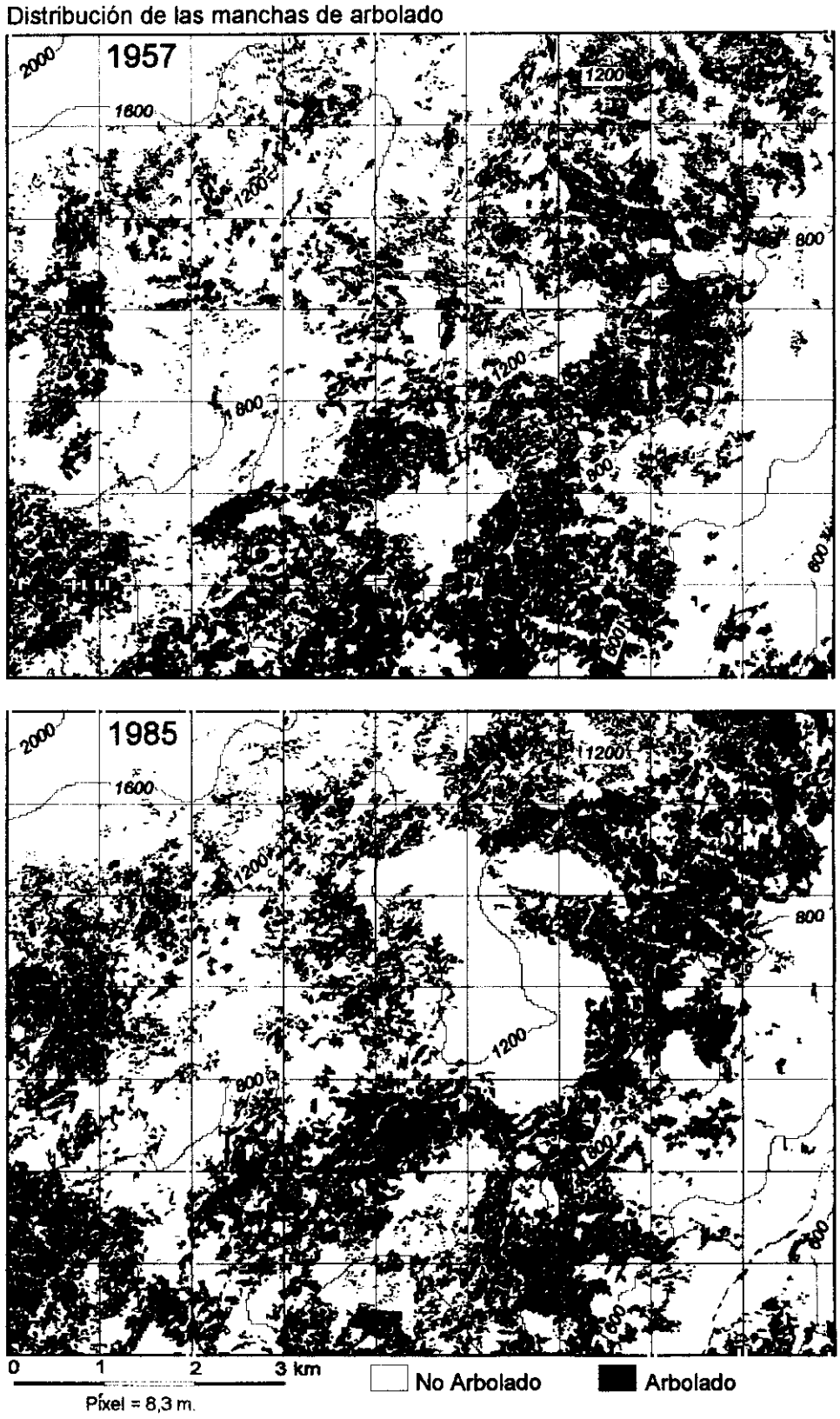


Figura 6.2. Mapas de distribución de la superficie arbolada para: (A) año 1957 y (B) año 1985. Cada imagen está formada por el ensamblaje de 8 imágenes individuales resultantes de la interpretación y corrección de otras tantas fotografías aéreas (ver el Apéndice 6.1 para más detalles).

6.2.6. Cambios en los territorios ocupados por arbolado entre 1957 y 1985

6.2.6.1. Cruce de las imágenes

Las imágenes de las clases de densidad del arbolado obtenidas para 1957 y 1985 con tamaños de píxel de 25 a 100 m fueron reclasificadas, a su vez, en imágenes binarias. Se consideró como *no arbolado* las clases 0 y 1, esto es, píxeles cuya proporción de arbolado fue inferior al 33%, y como *arbolado* las clases 2 y 3, esto es, píxeles con proporción de arbolado superior al 33%. El valor umbral de ≥ 33% de los píxeles iniciales fue fijado para compensar los posibles errores en la corregistración de las imágenes correspondientes a cada año. El cruce de estas imágenes para cada tamaño de píxel informaría sobre los cambios registrados entre los dos años: no arbolado en los dos años, cambios de no arbolado a arbolado, cambios de arbolado a no arbolado y arbolado en los dos años. Es decir, áreas que se han mantenido sin arbolado, que lo han ganado, que lo han perdido y que lo han mantenido entre 1957 y 1985.

Por otra parte, a partir de las imágenes binarias iniciales (píxel =8,3 m) obtenidas para cada año y las imágenes resultantes de los cruces descritos previamente, se han analizado los patrones de cambio del arbolado entre los dos años para tamaños de píxel de 25 y 50 metros, respectivamente. El procedimiento empleado para cuantificar los patrones de establecimiento del arbolado ganado (presente en 1985 pero no en 1957) ha consistido en establecer bandas de distancias respecto al arbolado presente en 1957 y calcular para estas bandas la proporción de arbolado ganado. Se ha analizado también el proceso contrario: es decir, el arbolado perdido (presente en 1957 pero no en 1985) como función del presente en el año 1985. Las bandas de distancia se han definido por medio de la distancia euclídea desde los píxeles de arbolado a los de no arbolado para cada una de las imágenes de referencia (1957 en el primer caso y 1985 en el segundo).

6.2.6.2. Cambios en el arbolado en relación a los incendios y las cortas

Los cambios registrados en la distribución del arbolado en el periodo 1957-85 se han combinado con los datos de los incendios de 4 ó más hectáreas documentados para el periodo 1970-85 que se analizan y describen en el Capítulo 7. Además, se delimitaron las áreas que, sin haberse visto afectadas por los incendios documentados, han cambiado de arbolado a no arbolado entre los pares de vuelos disponibles en la zona (años 1957, 1972, 1982 y 1985) y que, presumiblemente, representan cortas de arbolado. Dada la falta de documentación sobre las cortas, la adscripción de las manchas no puede hacerse

inequívocamente, aún cuando algunas de las manchas que así se califican han sido verificadas en el terreno. En otros casos dicha verificación no ha sido posible, de ahí que, aun cuando nos refiramos a cortas como la causa probable de cambio, debamos mantener la reserva sobre el origen del mismo. El procedimiento empleado para pasar de fotografías aéreas a mapas se describe en detalle en el Capítulo 7. El tamaño de píxel empleado en este apartado (perímetros de incendios y cortas) ha sido de 50 m. El territorio dado como superficie forestal arbolada en el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos a escala 1:50.000 (MAPA, 1978) se ha empleado como área de referencia en la cuantificación de los cambios registrados en el arbolado entre 1957 y 1985 que han sido debidos a los incendios y, presumiblemente, a las cortas.

6.2.7. Análisis estadísticos

La comparación entre las distribuciones de tamaño resultantes de las manchas de arbolado se ha realizado por medio del test no paramétrico de Kolmogorov-Smirnov. Este mismo test se ha empleado para comparar a nivel de cuadrículas la proporción de superficie arbolada en cada uno de los dos años y los valores obtenidos para los tres índices de la estructura del paisaje en los dos años y para cada uno de los tamaños de píxel (25 y 50 m). Además, se han realizado correlaciones paramétricas entre los valores de los tres índices de la estructura del paisaje entre sí y entre éstos y la superficie arbolada presente en cada cuadrícula para cada uno de los dos años. Para la gestión y análisis espacial de las imágenes se ha empleado el Sistema de Información Geográfica IDRISI (Eastman, 1992).

6.3. RESULTADOS

6.3.1. Características estructurales

Los mapas resultantes del ensamblaje de las 8 fotografías aéreas interpretadas para cada año se muestran en la Figura 6.2A-B. Las diferencias más importantes entre los dos años se centran en la configuración aparentemente más densa del arbolado en 1985 y en los grandes claros en torno al centro de la imagen que no estaban presentes en el año 1957. Asimismo, se aprecia también una mayor densidad del arbolado para el año 1985 en las zonas próximas a los tres núcleos de población situados dentro de la zona de estudio (Figura 6.1). La parte noroeste de las dos imágenes ha presentado un arbolado bastante disperso para los dos años, debido a las elevadas altitudes, a diferencia de las zonas más bajas y con mayor densidad de arbolado.

Tabla 6.1. Superficie arbolada, número de manchas de arbolado, tamaño medio y tamaño máximo de las manchas obtenidas a partir de las imágenes correspondientes a los años 1957 y 1985 (tamaño de píxel = 8,3 m.). Las manchas de arbolado se definen como píxeles de la misma categoría contiguos horizontal y verticalmente (2 direcciones). Se incluye también el número de manchas y los tamaños resultantes si se consideran además las conexiones diagonales (4 direcciones).

	Año 1957	Año 1985
Superficie arbolada (ha)	1943	2150
Proporción de superficie arbolada frente al total (%)	30,9	34,1
Manchas de arbolado (2 direcciones)		
Número de manchas	2594	2230
Tamaño medio (ha)	0,75	0,96
Tamaño máximo (ha)	712	1108
Proporción de arbolado ocupado por la mancha mayor (%)	36,6	51,5
Manchas de arbolado (4 direcciones)		
Número de manchas	2041	1695
Tamaño medio (ha)	0,95	1,27
Tamaño máximo (ha)	1006	1150
Proporción de arbolado ocupado por la mancha mayor (%)	51,8	53,5

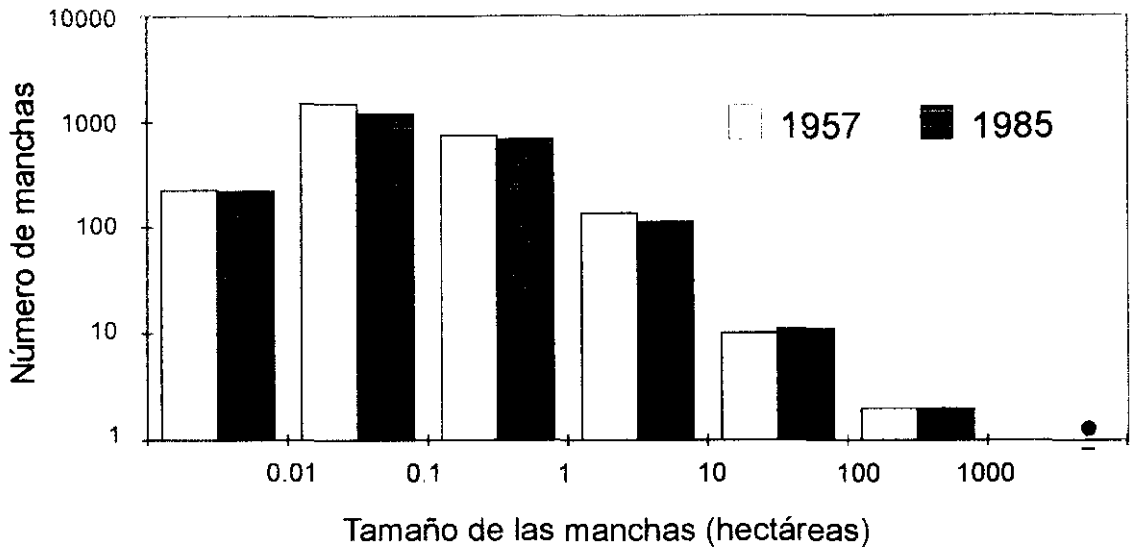


Figura 6.3. Distribución de frecuencias de los tamaños de las manchas de arbolado (píxeles de arbolado contiguos horizontal y/o verticalmente) identificadas en los años 1957 y 1985.

La superficie total cubierta por el arbolado fue de 31% en 1957 y 34% en 1985, esto es, similar en los dos años, aunque algo mayor en el segundo (Tabla 6.1 y Figura 6.2). El número total de manchas de arbolado, entendiendo por tal píxeles de arbolado contiguos en dos direcciones, disminuyó con el tiempo. De las 2594 manchas contabilizadas en 1957 se ha pasado a 2230 en 1985, lo que representa una reducción del 16% en el número de manchas arboladas. Por otro lado, el tamaño medio de las manchas de arbolado aumentó de 0,75 a 0,96 ha (27% de aumento) y la mancha de arbolado más grande pasó de ocupar 712 ha (36,6% del territorio total arbolado) en 1957 a 1108 ha (51,5% del territorio arbolado) en el 1985 (Tabla 6.1). Esto es, en términos relativos se produjo un 56% de incremento en el tamaño de la mayor mancha arbolada detectada en el territorio. El cambio en la definición de las manchas para incluir las conexiones diagonales, además de las horizontales y verticales, modificó todos los parámetros analizados en términos absolutos y relativos para los dos años de estudio. No obstante, tanto el número de manchas como el tamaño medio de las mismas presentó un patrón de cambio entre los dos años similar a lo ya descrito, esto es, disminución del número de manchas con el tiempo y aumento en el tamaño medio de cada una. Por el contrario, a pesar de que el tamaño máximo de mancha también fue mayor en 1985, las diferencias en este caso fueron mucho menores (Tabla 6.1).

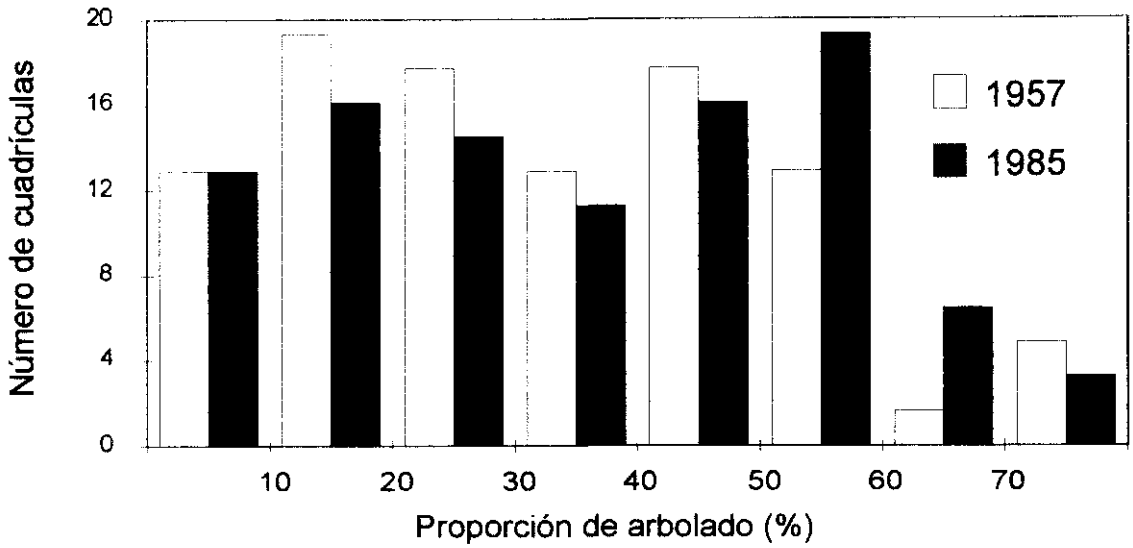


Figura 6.4. Distribución de frecuencias de las cuadrículas de 1x1 km con distinta proporción de superficie arbolada para los años 1957 y 1985.

Las clases de tamaño de las manchas de arbolado más frecuentes en los dos años fueron las comprendidas entre 0,01 y 1 ha, presentando una distribución truncada hacia las clases de tamaño más pequeñas (Figura 6.3). Las diferencias entre los dos años para las distintas clases de tamaño de las manchas fueron pequeñas, con un ligero incremento de las clases de tamaño grandes en 1985. La comparación por medio del test de Kolmogorov-Smirnov de las distribuciones basadas en los tamaños de todas las manchas de arbolado para los dos años no presentó diferencias estadísticamente significativas (P=0,290).

La superficie media de arbolado presente en cada cuadrícula de 1x1 km fue de 30,8 y 34,1 ha en 1957 y 1985, respectivamente. Esto es, no hubo un cambio importante entre los dos años. El análisis de frecuencias para dichas cuadrículas muestra (Figura 6.4) que la proporción de cuadrículas con un porcentaje bajo de arbolado (< 50%) es mayor en el año 1957 mientras que las cuadrículas con porcentajes entre 50 y 70% son más frecuentes en 1985. No obstante, la comparación por medio del test de Kolmogorov-Smirnov de la proporción de arbolado por cuadrícula no ha resultado estadísticamente significativa (P=0,423; n=63).

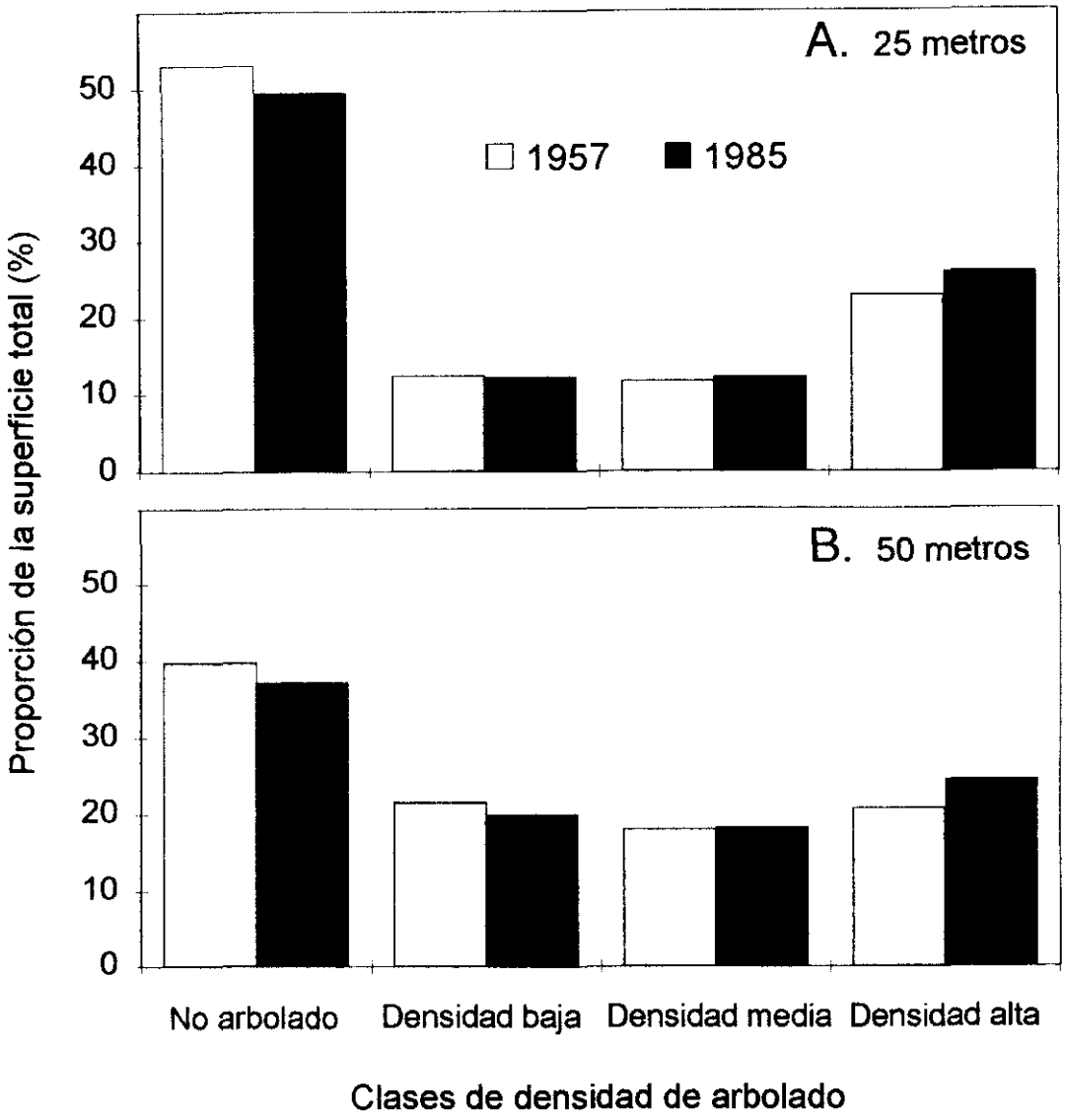


Figura 6.5. Proporción relativa de la superficie total (9x7 km) correspondiente a cada una de las clases de densidad del arbolado definidas para los años 1957 y 1985. (A) Tamaño de píxel de 25 m y (B) tamaño de píxel de 50 m.

6.3.2. Clases de densidad del arbolado

La proporción de la superficie total cubierta por cada una de las cuatro clases de densidad de arbolado varía en función del tamaño de píxel empleado (Figura 6.5A-B). Las diferencias más importantes entre las dos escalas de medida se han dado para la clase 0 (no arbolado) y la clase 3 (arbolado denso), ocupando ambas una mayor proporción de

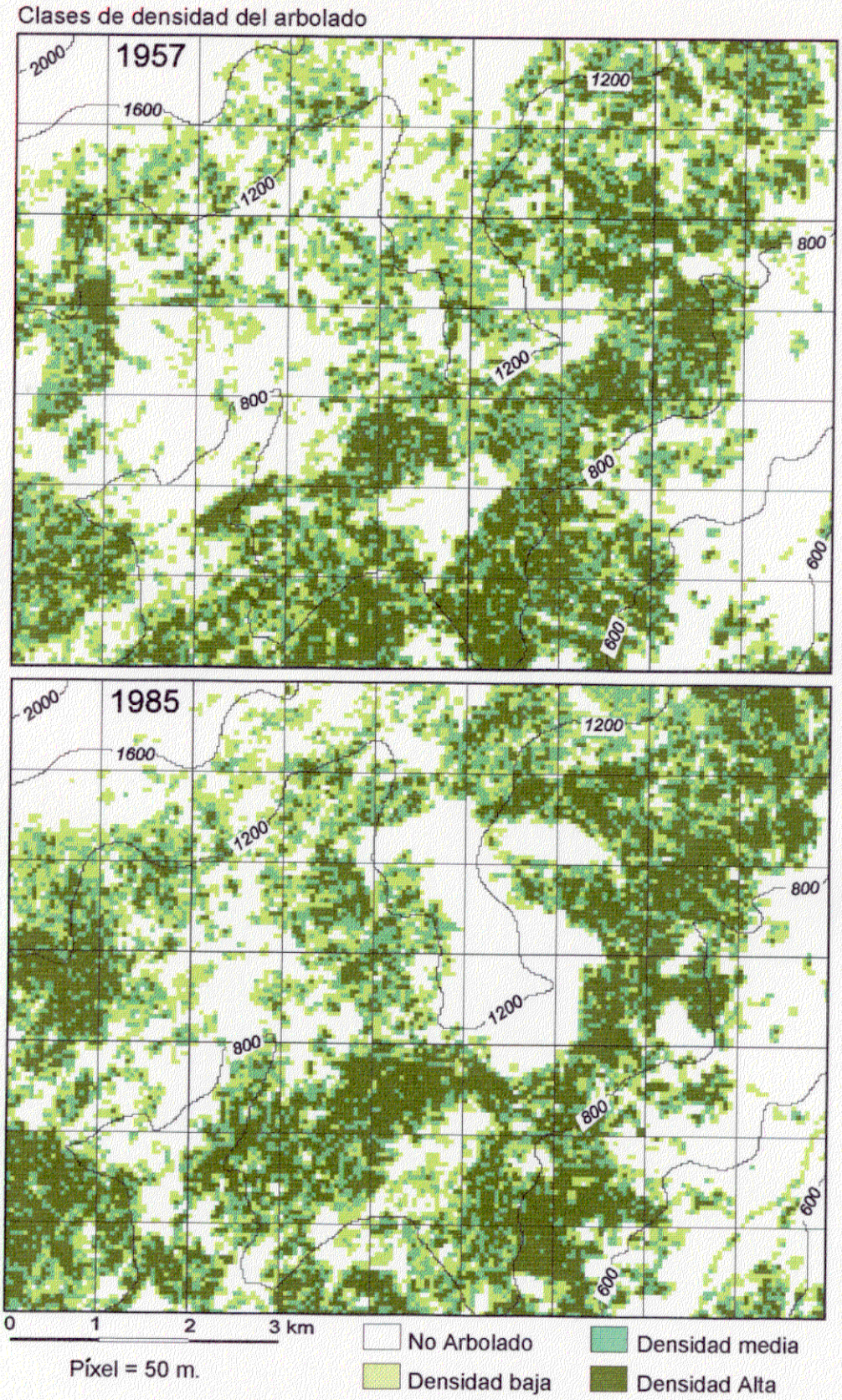


Figura 6.6. Mapas de distribución de las clases de densidad del arbolado obtenidas para 1957 y 1985 en los 9x7 km analizados. El tamaño de pixel empleado en la representación ha sido de 50 m.

territorio para una resolución de 25 m que la correspondiente a 50 m. No obstante, las diferencias relativas entre los dos años de estudio para las distintas clases de arbolado se mantuvieron independientemente de la escala de medida. Así, la clase 0 (no arbolado) fue más abundante en 1957 que en 1985 y la clase 3 (densidad alta) fue más abundante en 1985 que en 1957. Esto es, el estudio por clases de densidad del arbolado reflejaría un enriquecimiento relativo hacia la clase de arbolado denso en detrimento de la clase sin arbolado. La distribución espacial de las distintas clases de densidad del arbolado en los dos años de estudio para un tamaño de píxel de 50 m (Figura 6.6) muestra aspectos similares a los ya descritos para las imágenes iniciales (tamaño de píxel de 8,3 m), siendo destacables las grandes manchas de arbolado denso que aparecen en la imagen de 1985 frente a la de 1957.

6.3.3. Índices de la estructura del paisaje arbolado

Los valores medios de los índices de dominancia, contagio y la dimensión fractal calculados a nivel de cuadrículas de 1x1 km para las 3 clases de densidad de arbolado han presentado valores muy similares para los dos años (Tabla 6.2). Además, ninguno de estos tres parámetros ha presentado diferencias estadísticamente significativas entre las dos fechas estudiadas y para cada una de las dos escalas sobre las que se han calculado (25 y 50 m, respectivamente) (P>>0,05; n=55), en las seis comparaciones realizadas por medio del test de Kolmogorov-Smirnov.

Tabla 6.2. Valores medios y desviación estándar de los índices de dominancia, contagio y dimensión fractal calculados sobre mapas de clases de densidad de arbolado con un tamaño de píxel de 25 y 50 m para los años 1957 y 1985 respectivamente. Las medias mostradas se derivan de los valores obtenidos para las 55 cuadrículas de 1x1 km en las que más de un 5% de la superficie era arbolada en los dos años considerados.

Tamaño de píxel (m)	Índice	Año 1957		Año 1985	
		Media	Des. est.	Media	Des. est.
25	Dominancia	0,07	0,08	0,09	0,08
25	Contagio	0,36	0,03	0,37	0,03
25	Dimensión fractal	1,28	0,02	1,28	0,01
50	Dominancia	0,09	0,10	0,09	0,09
50	Contagio	0,37	0,04	0,38	0,04
50	Dimensión fractal	1,31	0,03	1,31	0,02

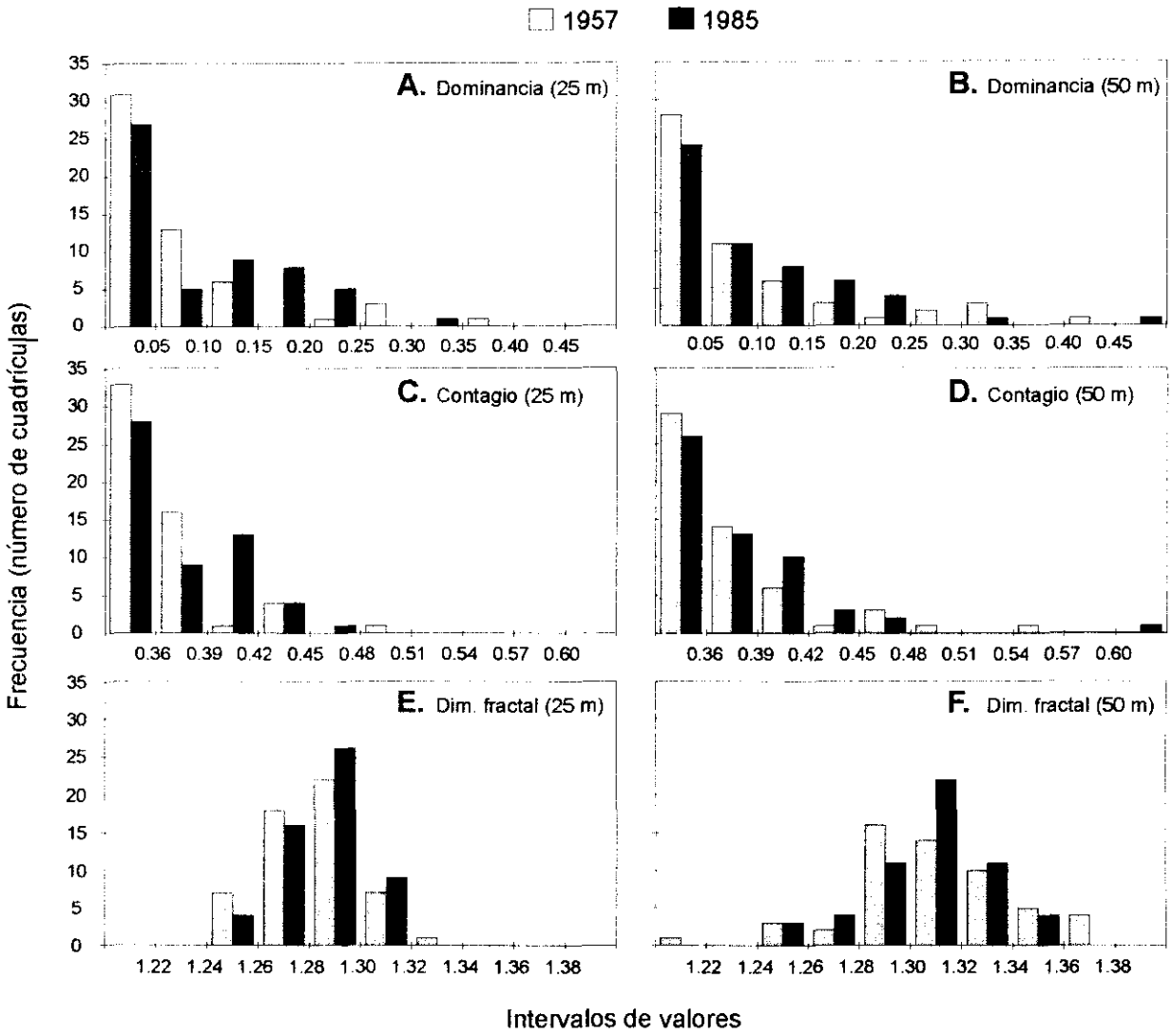


Figura 6.7. Histogramas de frecuencias (número de cuadrículas de 1x1 km) de los valores obtenidos para los índices de dominancia, de contagio y la dimensión fractal a partir de las clases de densidad de arbolado presentes a nivel de cuadrículas de 1x1 km para los años 1957 y 1985 y para tamaños de píxel de 25 metros (A, C y E) y 50 metros (B, D, F).

El índice de dominancia ha presentado valores muy bajos (medias de 0,07 a 0,09) y similares para los dos años y las dos escalas de medida (Tabla 6.2). La comparación de los histogramas de frecuencias de los dos años y para las dos escalas de medida (Figura 6.7A-B) sugiere la presencia de un mayor número de cuadrículas con valores superiores a 0,10 en el año 1985. Estos valores relativamente altos están asociados con celdas en las que domina una de las clases de densidad, generalmente cuando la ocupación de

arbolado es alta y la clase 3 (densidad alta) predomina sobre las demás, aunque en otros casos es el predominio del arbolado disperso (clase 1) en una determinada cuadrícula lo que da lugar a valores altos. El índice de contagio (con medias de 0,36 a 0,38) (Tabla 6.2) tampoco presenta valores muy distintos para los dos años y las dos escalas de medida, si bien, son más frecuentes los valores más altos en el año 1985 (Figura 6.7C-D). Esto indicaría un menor grado de contactos entre las distintas clases de densidad, es decir, mayor frecuencia de cuadrículas con manchas más compactas (formadas por la misma clase de densidad de arbolado) para 1985. En otras palabras, mayor proporción de agregados formados por el mismo tipo de clase de densidad del arbolado. La dimensión fractal calculada para las tres clases de densidad definidas tampoco mostró diferencias importantes para los dos años estudiados. Los valores medios obtenidos son distintos para las dos escalas de medida (1,28 para 25 m y 1,31 para 50 m) (Tabla 6.2). Los histogramas de frecuencias muestran un mayor número de cuadrículas con valores más elevados para 1985 (Figura 6.7E-F). Esto indicaría, una mayor complejidad en las manchas de la misma clase de densidad presentes en este año.

Tabla 6.3. Proporción de las 55 cuadrículas de 1x1 km en las que ha disminuido, se ha mantenido o ha aumentado el valor obtenido en los índices de dominancia, contagio y dimensión fractal entre los años 1957 y 1985 para tamaños de píxel de 25 y 50 m. Las proporciones mostradas reflejan los cambios entre las clases de valores mostradas en los histogramas de la Figura 6.7 y las imágenes de las Figura 6.8.

Tamaño de píxel	Índice	Cambios entre 1957 y 1985		
		Disminuye	Se mantiene	Aumenta
25 metros				
	Dominancia	40,0%	40,0%	20,0%
	Contagio	36,4%	43,6%	20,0%
	Dim. fractal	34,5%	36,4%	29,1%
50 metros				
	Dominancia	45,5%	23,6%	30,9%
	Contagio	41,8%	29,1%	29,1%
	Dim. fractal	38,2%	20,0%	41,8%

La variación espacial a nivel de cuadrículas de 1x1 km de los valores obtenidos para los 3 índices estructurales utilizados y las dos escalas de medida se muestra en la Figura 6.8. La tendencia general entre los dos años vino marcada por el cambio para los distintos índices y las dos escalas de medida (Tabla 6.3).

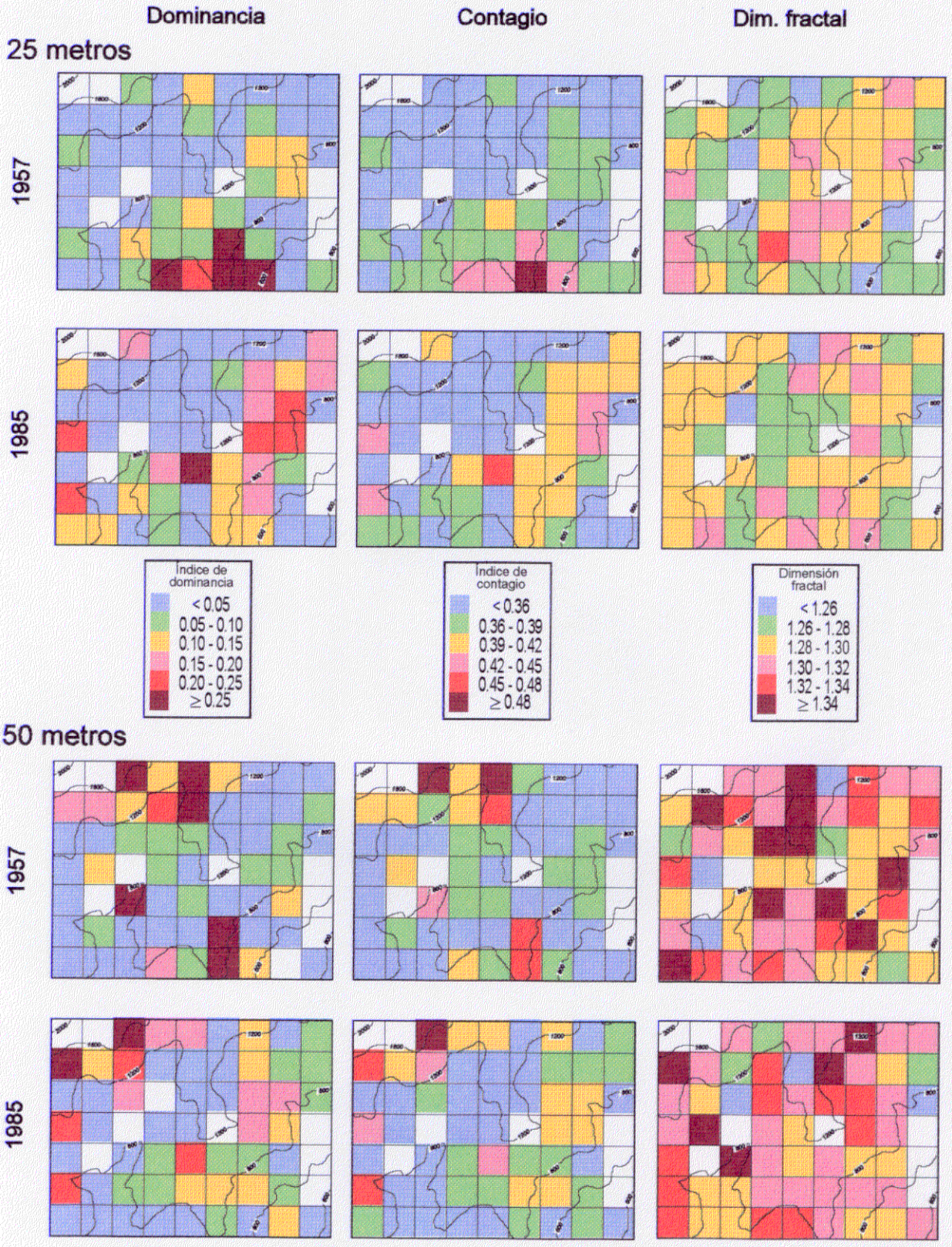


Figura 6.8. Variación espacial de los valores obtenidos para los índices de dominancia, de contagio y la dimensión fractal calculados a partir de las clases de densidad de arbolado a nivel de cuadrículas de 1x1 km para los años 1957 y 1985 y para tamaños de píxel de 25 metros (parte superior) y 50 metros (parte inferior).

Por lo que respecta a la distribución en el territorio de los valores de los tres índices del paisaje y para la escala de medida de 25 metros, podemos resumir las tendencias como sigue: Los valores altos del índice de dominancia se obtuvieron para el año 1957 en la parte sur del territorio, mientras que en 1985 los valores más altos (en general relacionados con el predominio de la clase de densidad de arbolado alto) se registraron en las cuadrículas de la parte este y suroeste del territorio. Para el índice de contagio el patrón obtenido fue muy similar. Por lo que se refiere a la dimensión fractal, en 1957 las áreas con manchas más complejas se situaban hacia el centro y este del territorio, mientras que en 1985 estas áreas han dado paso a manchas menos complejas situándose las manchas de mayor complejidad hacia la periferia de la zona de estudio.

Los patrones de variación de los tres índices entre los dos años de estudio no fueron tan claros para un tamaño de píxel de 50 m. Así, los valores más altos del índice de dominancia se obtuvieron en la parte noroeste del territorio y algo también en la sureste para 1957, mientras que el patrón en 1985 fue similar al obtenido para una resolución de 25 m. En general, en este caso los valores altos del índice de dominancia se relacionaron más frecuentemente con el predominio de la clase de densidad de arbolado baja. La distribución del índice de contagio fue similar a lo descrito para el anterior índice. La dimensión fractal fue muy variable sin patrones claros de agregación espacial, y sin que los que había en 1957 se mantuviesen en 1985.

Tabla 6.4. Coeficientes de determinación (r^2) obtenidos entre los índices de dominancia, de contagio, la dimensión fractal y la superficie forestal en cada cuadrícula de 1x1 km. Se muestran los resultados obtenidos para los años 1957 y 1985 y para dos tamaños de píxel (25 y 50 m). Los valores estadísticamente significativos ($P < 0,01$; n=55) están señalados en negrita. La superficie forestal está calculada en todos los casos a partir de las imágenes iniciales (píxel = 8,3 m).

Tamaño de píxel	Índices	Año 1957			Año 1985		
		Dominancia	Contagio	Dim. fractal	Dominancia	Contagio	Dim. fractal
25 metros	Sup. forestal	**0,50**	**0,54**	**0,23**	**0,52**	**0,55**	**0,18**
"	Dominancia	-	**0,97**	0,00	-	**0,99**	**0,09**
"	Contagio	-	-	0,00	-	-	**0,10**
50 metros	Sup. forestal	0,04	0,02	0,04	0,00	0,00	0,02
"	Dominancia	-	**0,94**	0,02	-	**0,94**	0,00
"	Contagio	-	-	0,04	-	-	0,02

Los índices de dominancia y de contagio calculados para un tamaño de píxel de 25 m han presentado relaciones positivas y estadísticamente significativas con la superficie arbolada presente en cada cuadrícula para cada uno de los dos años (Tabla 6.4). Sin embargo, estas relaciones no se han mantenido cuando se han calculado para tamaños de píxel de 50 m. Además, los índices de dominancia y de contagio han presentado entre sí relaciones muy altas (r^2 superiores a 0,9) para los dos años y las dos escalas de medida (Tabla 6.4). Es decir, cuadrículas en las que las tres clases de densidad están en proporciones equivalentes (índice de dominancia bajo) presentan a su vez índices de contagio bajos (los píxeles de las 3 clases de densidad están muy interconectados entre sí) y a la inversa. La dimensión fractal cuando se calcula para 25 metros presenta relaciones significativas, aunque débiles, con la superficie forestal (r^2 = 0,23 y 0,18 para 1957 y 1985, respectivamente). Sin embargo, para un tamaño de píxel de 50 m se pierden estas relaciones significativas con la superficie forestal. Igualmente, la dimensión fractal ha estado algo relacionada con los índices de dominancia y de contagio pero únicamente para el año 1985 y para un tamaño de píxel de 50 m.

6.3.4. Cambios en la cobertura del arbolado

La proporción de superficie ocupada por cada una de las cuatro categorías de cambio resultantes de los cruces de las imágenes binarias de arbolado/no arbolado, obtenidas de la reclasificación de las cuatro clases de densidad, ha variado en función del tamaño de píxel empleado. Estas variaciones han sido más acentuadas al cambiar de 25 a 50 m, mientras que los cambios detectados para escalas de medida mayores (75 o 100 m) fueron similares a los obtenidos para 50 metros (Figura 6.9). Las variaciones más importantes en las proporciones obtenidas con respecto al tamaño de píxel (nivel de agregación) se dan en la proporción de superficie que se mantiene como arbolado en los dos años, desde un 19% para 25 metros a un 28% para 100 metros. Para 50 metros (Figura 6.9 y Figura 6.10) (un tamaño de píxel mayor que el error esperado en la localización del mismo punto en los dos años) un 43% de la superficie ha permanecido sin arbolado en los dos años y un 24% lo ha mantenido, mientras que las pérdidas de arbolado entre los dos años han supuesto un 15% y las ganancias un 19%.

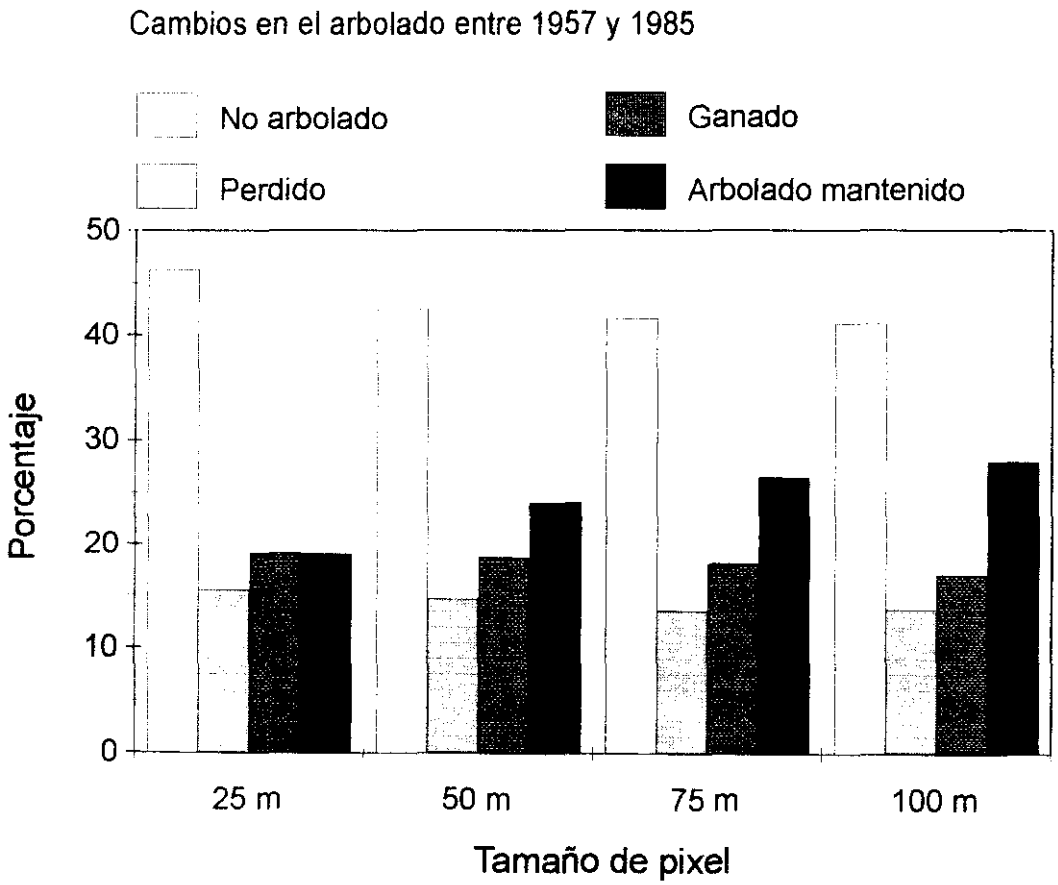


Figura 6.9. Cambios en la superficie arbolada en función del nivel de agregación (tamaños de píxel de 25, 50, 75 y 100 m) resultantes del cruce de imágenes binarias de *arbolado* (clases de densidad 2 y 3) y *no arbolado* (clases de densidad 0 y 1). Para cada tamaño de píxel se representa la proporción obtenida para cada una de las cuatro alternativas de cambio mostradas en la leyenda.

En relación a los patrones de cambio, para este mismo tamaño de píxel (50 m) un 69% del arbolado detectado en 1985 se ha establecido a una distancia inferior a 71 metros del arbolado presente en 1957. El arbolado que se ha perdido entre 1957 y 1985 ha presentado un patrón muy similar: un 65% del perdido (detectado en 1957 pero no en 1985) se encontraba a menos de 71 metros del arbolado presente en 1985. Las proporciones, tanto para el arbolado ganado como para el perdido entre los dos años, han decrecido rápidamente con la distancia. Estos datos sugieren que una proporción importante del arbolado detectado en 1985 se ha registrado en las proximidades del presente en 1957 y que una proporción importante del que se ha perdido se encontraba próximo a áreas arboladas en 1985.

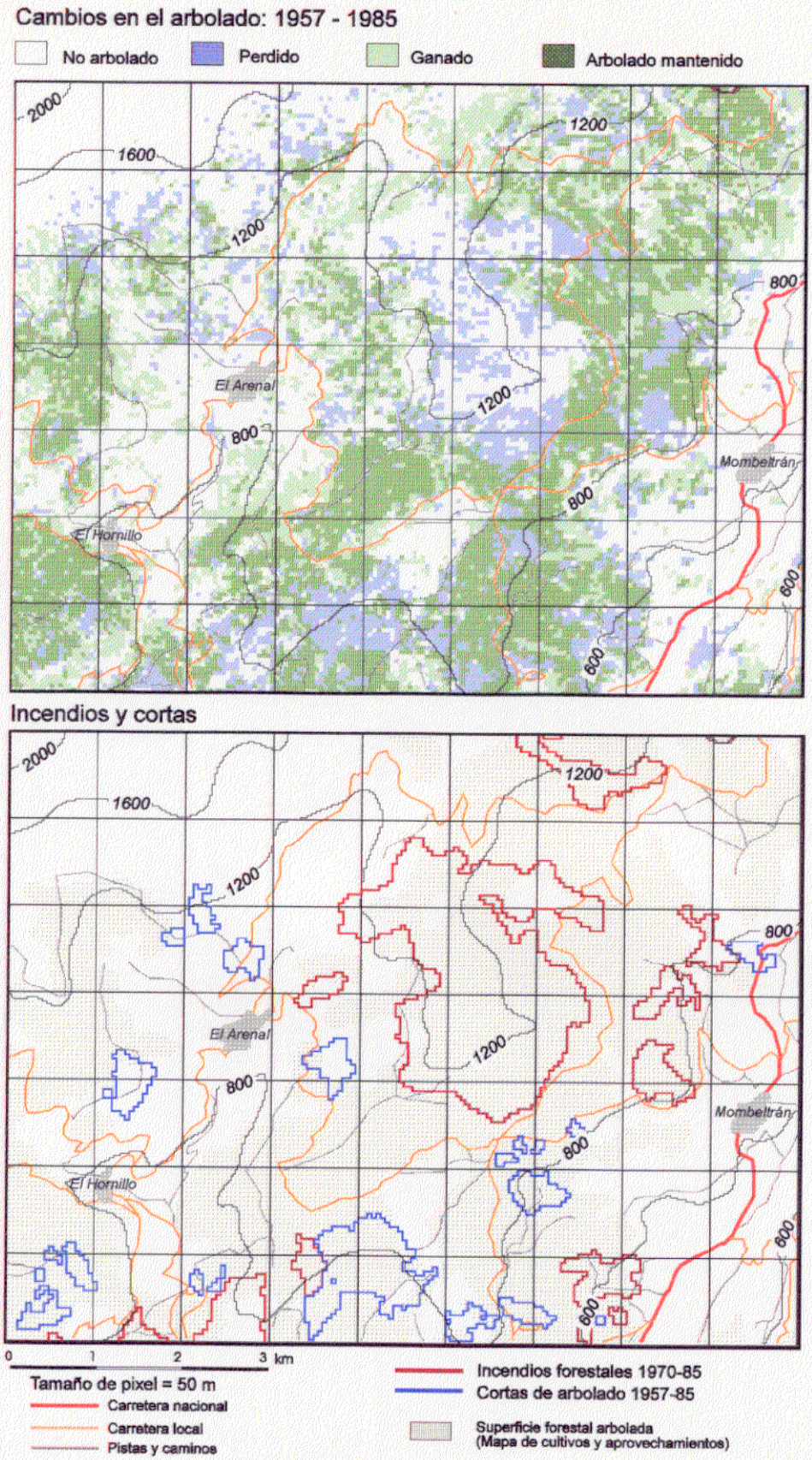


Figura 6.10. (Parte superior) Mapa resultante del cruce de las imágenes binarias de *arbolado* (clases de densidad 2 y 3) y *no arbolado* (clases de densidad 0 y 1) con un tamaño de pixel de 50 m correspondientes a los años 1957 y 1985. Las proporciones obtenidas para cada

Figura. 6.10 (continuación) una de las cuatro alternativas de cambio (*No arbolado*: no arbolado en 1957 ni en 1985; *Perdido*: arbolado en 1957 y no en 1985; *Ganado*: no arbolado en 1957 y arbolado en 1985 y *Arbolado mantenido*: arbolado en 1957 y en 1985) se muestran en la Figura 6.9 para distintos tamaños de píxel. (Parte inferior) Perímetros de las áreas afectadas por los incendios ≥ 4 ha (periodo 1970-85) y cortas (periodo 1957-85) cartografiados para la zona de estudio. Las áreas sombreadas corresponden a la superficie forestal arbolada tomada del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos a escala 1:50.000 (MAPA, 1978) y empleada como máscara en ciertos análisis. Ver la Figura 7.5 para más detalles sobre las áreas afectadas por incendios.

Tabla 6.5. Número de áreas y superficie afectada por los incendios (≥ 4 ha) y las cortas de arbolado de distinto tamaño detectados y cartografiados en la zona de estudio y mostrados en la Figura 6.10. Los distintos periodos mostrados para las cortas vienen dados por las fotografías aéreas disponibles. Ver Material y Métodos para más detalles sobre las limitaciones asociadas a las cortas. Para más detalles sobre los incendios ver el Capítulo 7.

Tipo de perturbación cartografiada	Periodo	Número de áreas afectadas			Superficie afectada (hectáreas)		
		< 5 ha	5 - 50 ha	≥ 50 ha	< 5 ha	5 - 50 ha	≥ 50 ha
Cortas	1957-72	1	1	0	2,1	7,9	0,0
Cortas	1972-82	3	7	1	10,8	111,7	70,2
Cortas	1982-85	4	6	0	12,4	65,3	0,0
Incendios	1970-90	2	14	2	4,1	298,1	465,6

6.3.5. Incendios, cortas y cambios en el arbolado

La atribución de una causa a los cambios registrados en el arbolado entre 1957 y 1985 viene limitada por el hecho de que sólo se han podido reconstruir y representar espacialmente las áreas afectadas por incendios a partir de 1970. Otro tanto puede decirse de lo que hemos denominado cortas, con las salvedades hechas anteriormente. Por tanto los cambios que hayan sido motivados por incendios o cortas anteriores a 1970 han sido atribuidos a causas no identificadas. El análisis de los cambios detectados en la superficie arbolada en función de los incendios (1970-85) y cortas (1957-85) cartografiados en los 9x7 km analizados muestra que los cambios de arbolado (1957) a no arbolado (1985) se han debido fundamentalmente a los incendios (43%) mientras que los atribuidos a cortas representaron sólo el 14% (Figura 6.10 y Figura 6.11). A partir de

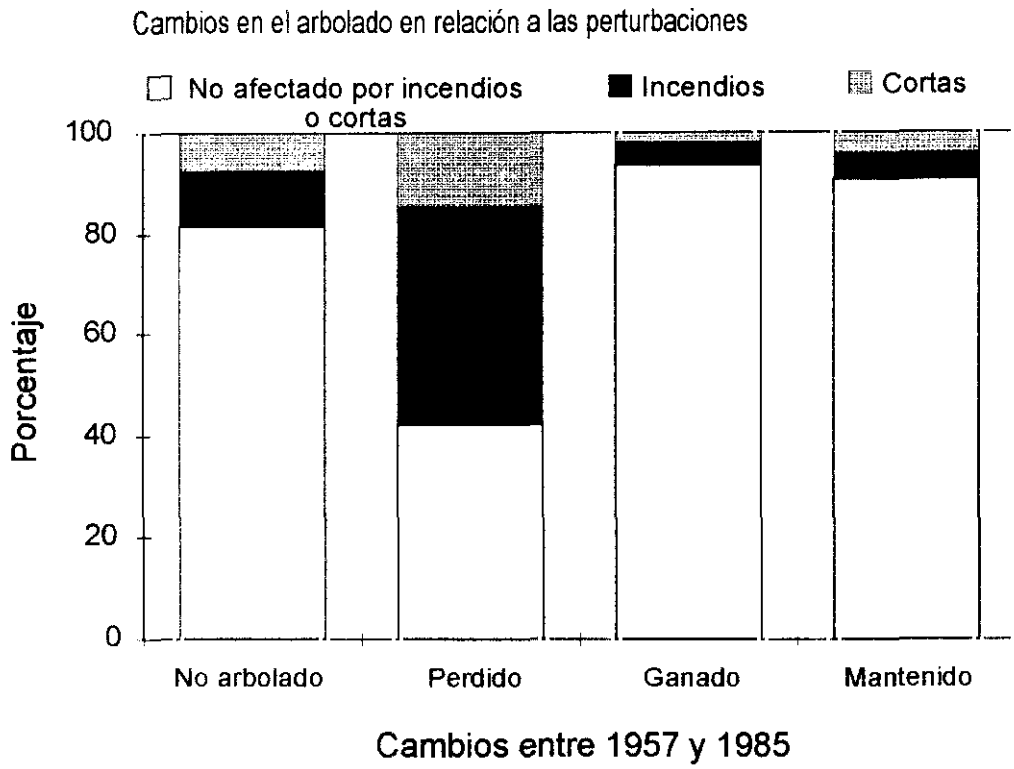


Figura 6.11. Proporción de los cambios registrados en la superficie arbolada entre 1957 y 1985 que han sido explicados por las perturbaciones (incendios y cortas) cartografiadas para la zona de estudio (Figura 6.10, parte inferior). Las cuatro alternativas de cambio (*No arbolado*: no arbolado en 1957 ni en 1985; *Perdido*: arbolado en 1957 y no en 1985; *Ganado*: no arbolado en 1957 y arbolado en 1985 y *Arbolado mantenido*: arbolado en 1957 y en 1985) se han obtenido del cruce de las imágenes binarias de arbolado (clases de densidad 2 y 3) y no arbolado (clases de densidad 0 y 1) con un tamaño de píxel de 50 m correspondientes a los años 1957 y 1985. La cuantificación mostrada se ha limitado al territorio considerado como superficie forestal arbolada (ver Material y Métodos para más detalles).

la observación de las dos imágenes presentadas en la Figura 6.11 se puede apreciar cómo la aparición de grandes claros sin arbolado en 1985 ha estado motivada fundamentalmente por las áreas afectadas por incendios. Hay que destacar que no sólo fue menor el territorio perdido atribuible a cortas, sino que el tamaño y forma de las manchas originadas por este factor fueron muy diferentes a las originadas por los incendios (Tabla 6.5 y Figura 6.10).

6.4. DISCUSIÓN

6.4.1. Estructura del arbolado

Los resultados obtenidos de la zona estudiada muestran que la proporción de territorio ocupado por arbolado no ha registrado variaciones importantes entre las dos fechas analizadas: 31% en 1957 y 34% en 1985. Estos resultados contrastan con otros estudios realizados en el propio Sistema Central. Así, Zárate (1995) encontró que la evolución de la abundancia de los usos del suelo en la comarca de la Sierra Norte de Madrid para el periodo 1946-91 se caracterizó por un aumento de la superficie ocupada por coníferas (*Pinus pinaster* y *P. sylvestris*) y matorrales a expensas fundamentalmente de las áreas ocupadas previamente por actividades agrícolas y pastorales. Estas tendencias generales en los cambios en el uso del suelo en las últimas décadas se corresponden con las detectadas en otras zonas de España peninsular como áreas del suroeste español (Fernández et al., 1992), algunas comarcas del País Vasco (Atauri, 1995), Pirineos (Lasanta, 1988) y áreas del sur de Francia (Debussche et al., 1987), Italia (Vos, 1993) y Grecia (Grove, 1992).

Los resultados obtenidos para esta zona de estudio permiten dos reflexiones de signo opuesto: Por una parte, contrasta que en una época de predominio de la reforestación y abandono de las zonas de montaña no se haya producido un aumento de la superficie arbolada en una zona de alta productividad forestal como la estudiada. Dado que las cortas detectadas sólo han supuesto una pequeña parte de los cambios habidos, hay que concluir que el papel del fuego ha sido determinante en este caso al impedir un proceso de colonización por especies arbóreas que era esperable. Ciertamente, sumando las superficies arboladas perdidas a las existentes en 1957 y las ganadas en este periodo la superficie arbolada estimada para un tamaño de píxel de 50 metros se hubiese incrementado en 1985 en un 26%, corroborando así la tendencia general que se ha dado en otras zonas de España. Hay que señalar que las zonas anteriormente comentadas objeto de estudio por otros autores no han sufrido una incidencia tan importante de incendios como la aquí estudiada, estando la zona de estudio entre las de mayor incidencia en España (ver el Capítulo 1).

La segunda lectura de estos resultados estaría centrada en señalar que, a pesar de la alta incidencia de incendios registrados en la zona, la cantidad total de superficie

arbolada se ha mantenido en su conjunto. Sin entrar en otras consideraciones acerca del tipo de masas arboladas, riesgos adicionales, etc., como se comentará más adelante, este hecho vendría a aportar datos importantes para una valoración adecuada de los impactos en el ambiente originados por los incendios frente a situaciones pasadas caracterizadas por un mayor uso extensivo del territorio. Sin duda, este hecho es importante en un momento de máxima conciencia ambiental donde el arbolado juega un papel importante en la socioeconomía de los territorios no agrícolas debido a los nuevos usos que se demandan al monte, algunos, en muchos casos, no estrictamente ligados al valor comercial de las masas forestales.

Por otra parte, si el arbolado total no ha sufrido variaciones en su cuantía, nuestros datos sí confirman que su estructura ha variado, variación que ha seguido la pauta hipotetizada y coincidente con lo encontrado por otros autores (Fernández et al., 1992; Vos, 1993). Así, el número de manchas ha tendido a disminuir, el tamaño medio a aumentar y la mancha más grande a ocupar una proporción mayor del territorio. La mayor proporción de arbolado conectado en 1985, la presencia de claros de mayor tamaño (no presentes en 1957) y la mayor proporción de la clase de densidad alta de arbolado en el año 1985 indicarían que la superficie arbolada ha tendido a presentarse de forma más concentrada en determinadas zonas. A pesar de la falta de significación estadística de algunas de estas pautas, parece claro que la ausencia de incendios forestales probablemente hubiese incrementado notablemente algunos de estos valores, al haber afectado algunos de ellos a zonas con un alto nivel de agregación. La continuación de estos procesos agregativos sin duda también supondría riesgos adicionales para la posible propagación de incendios, sobre todo en condiciones de riesgo no extremo que son las situaciones en las que, paradójicamente, la estructura del paisaje puede jugar un mayor papel en la propagación del fuego (Turner y Romme, 1994).

6.4.2. Índices del paisaje

La utilización de diversos índices de la estructura de un paisaje, como herramienta capaz de discriminar entre paisajes con diferentes atributos, es un elemento común e indispensable en los estudios paisajísticos (Turner, 1989). Los primeros en emplear de forma extensiva los índices utilizados en este estudio fueron O'Neill et al. (1988) quienes diferenciaron entre paisajes con distintas proporciones de usos basándose en la combinación de la dimensión fractal y los índices de dominancia y contagio. Además sugieren que estos dos últimos índices son sensibles a diferentes atributos del paisaje. Turner y Ruscher (1988) y Turner (1990) emplearon también estos índices para analizar cambios temporales en el patrón espacial del paisaje. Mladenoff et al. (1993) compararon

dos áreas con una estructura fisiográfica similar en las que el único elemento diferente era el grado de humanización usando como parámetro la dimensión fractal, siendo capaces de discriminar adecuadamente tales paisajes. Krummel et al. (1987) detectaron una dimensión fractal diferente para superficies forestales continuas de distinto tamaño. Zárate (1995) aplicó numerosos índices de diversidad del paisaje basados en la teoría de la información a mapas derivados de los usos del suelo identificados en 5 años que cubren el periodo 1946 a 1991 para la comarca de la Sierra Norte de Madrid. Sus conclusiones señalan hacia un aumento de la diversidad espacial entre 1946 y 1972 y a un descenso posterior, aunque la evolución de los diversos parámetros analizados no fue homogénea en todo el periodo.

En la aproximación realizada en este trabajo hay que valorar el hecho de que los índices empleados, al estar calculados sobre clases de densidad de arbolado, reflejarían únicamente cambios en la configuración de éste. Las dos situaciones extremas posibles serían, por un lado, manchas de arbolado disperso de distintas clases de densidad y, por otro, manchas continuas de una misma clase de densidad. Los resultados muestran que, a nivel global del paisaje, caracterizado éste por sus valores medios para los diferentes índices, los cambios producidos en el territorio durante las dos fechas que marcan el periodo de estudio fueron mínimos, ya que la mayoría de los índices no variaron de forma significativa a ninguna de las dos escalas de medida utilizadas. No obstante, hay que señalar que antes que la estabilidad de los índices en una zona concreta (las cuadrículas de 1x1 km de referencia) el cambio fue la norma ya que, entre un año de estudio y el otro la mayoría de ellas cambiaron para los diferentes índices calculados. Asumiendo que los cambios en la estructura pueden tener repercusión en el funcionamiento del conjunto del sistema, parece claro que, a pesar de que los valores medios se han mantenido ello no quiere decir que el funcionamiento del paisaje estudiado no se haya modificado. Se pone así de manifiesto la importancia de los dos aspectos de la escala (tamaño de grano y extensión del territorio) sobre los resultados obtenidos en los estudios del paisaje (Turner et al., 1989b).

Los resultados muestran que los índices de dominancia y de contagio se han mostrado en todos los casos muy relacionados entre sí. Este hecho no se deriva de la propia concepción de los índices, aunque pueda existir una cierta duplicidad en los rangos extremos (O'Neill et al., 1988). La alta correlación detectada en nuestro caso sugiere que cuando una de las clases de densidad predomina sobre las demás, siendo común que lo sea la clase de densidad alta de arbolado, ésta tiende a formar manchas contiguas, lo que produce un índice de contagio alto. Además, los índices de dominancia y de contagio han estado muy relacionados con la proporción de arbolado presente en cada cuadrícula,

pero únicamente para un tamaño de píxel de 25 metros, lo que sugiere la importancia del número de celdas presentes en los cálculos sobre los valores obtenidos. A un tamaño de píxel de 50 metros los valores obtenidos para los tres parámetros no han estado relacionados con la superficie forestal presente en cada cuadrícula. Estos elementos ponen de relieve, una vez más, la importancia de la escala espacial (en este caso las cuadrículas) y la escala de medida (tamaño del píxel) sobre los resultados obtenidos y limitan su empleo a comparaciones en las que las dos escalas se mantengan constantes. Los efectos de la escala deben considerarse específicamente en la ecología del paisaje dado que la cuantificación del patrón espacial es dependiente de la escala a la que se han hecho las medidas (Turner, 1989, 1990; Mladenoff et al., 1993). Es frecuente que, dependiendo de la escala empleada los resultados puedan ser distintos, tal como señalan Rescia et al. (1994) quienes detectan un aumento en la heterogeneidad espacial a escala local pero no a nivel regional al aplicar índices de la estructura del paisaje en dos fechas distintas. Ello implica que, necesariamente, las escalas han de referirse a los procesos de interés y que las extrapolaciones al cambiar de escala no pueden hacerse de forma simple, siendo éste, sin duda, uno de los problemas actuales más importantes de la ecología en general y de la ecología del paisaje en particular (Turner et al., 1989b; Plotnik et al., 1993)

6.4.3. Cambios en el arbolado

Los cambios registrados en la localización del arbolado en los dos años han sido importantes y reflejan la fuerte dinámica existente en la zona. En la cuantificación de los cambios registrados hay que tener presentes que éstos también son dependientes de la escala de medida empleada (Baker, 1989; Turner, 1989) como se ha mostrado a lo largo de este trabajo. El tamaño de píxel elegido para mostrar gráficamente los cambios entre los dos años (50 m) y la frecuencia umbral empleada en las reclasificaciones (0,33% de los píxeles iniciales) garantizan en cierta medida la fiabilidad de los resultados frente a diferencias en la interpretación o a desajustes debidos a las correcciones geométricas efectuadas. En cualquier caso los porcentajes de cambio obtenidos son altos e indicativos de una dinámica muy importante del paisaje arbolado. Máxime considerando que el tiempo transcurrido entre las dos fechas de estudio (28 años) hace posible que la vegetación haya cambiado de arbolado a no arbolado o viceversa en más lugares de los detectados en los dos años analizados. En cuanto a los patrones de establecimiento del arbolado se ha visto cómo en la mayor parte de los casos éste se ha situado próximo a lugares en los que ya había arbolado, lo que sugiere un proceso de llenado de las antiguas manchas.

6.4.4. Estructura del arbolado e incendios

Los resultados obtenidos muestran el papel predominante de los incendios tanto en la determinación de la cantidad total de superficie arbolada como en la configuración espacial del paisaje. Así, hay que señalar que las mayores alteraciones en la matriz del arbolado han sido originadas por incendios, y que, en general, las manchas producidas por éstos difieren de las originadas por las cortas en su forma, tamaño y ubicación. Los cambios en la configuración del arbolado pueden haberlo convertido en más fácilmente susceptible a la propagación de fuegos de copas, en la medida en que forma manchas más continuas y densas (van Wagner, 1977) aunque el manejo al que esté sometido y la estructura vertical de los combustibles juegan también un papel determinante. Al margen del ulterior manejo o no de las zonas quemadas, cuyas implicaciones en caso negativo se discuten más adelante, parece claro también que una regeneración del arbolado en las zonas quemadas también tendría consecuencias espaciales importantes, cuando menos en favorecer al cabo del tiempo la propia propagación de incendios (van Wagner, 1977; Gardner, 1995), si bien las implicaciones últimas son difíciles de valorar. Asimismo, hay que señalar que a pesar del impacto de las cortas, su significación espacial ha sido mucho más limitada. Por tanto, el predominio del fuego sobre otros aprovechamientos forestales, aún incluyendo las actividades más transformadoras, como las cortas, ha introducido unas pautas de cambio en el paisaje sin precedentes anteriormente. Ésta quizás es una conclusión de capital importancia por cuanto tales modificaciones en la estructura pueden tener ulteriores implicaciones en el funcionamiento del paisaje en su conjunto (Turner et al., 1989a), incluyendo su propio efecto sobre el fuego.

Por otra parte, estudios realizados sobre la dinámica de la vegetación tras el fuego en zonas próximas a la aquí analizada, muestran que al cabo de 5 años tras el incendio en las zonas supramediterráneas existe una tendencia hacia la convergencia de las zonas quemadas, no siendo diferenciables zonas quemadas como pinar o como matorral y, al margen también, de anteriores usos de dichas zonas (Pérez et al., 1996 y B. Pérez comunicación personal). Esta conclusión se ve también avalada por los estudios de cronosecuencias sincrónico y diacrónico realizados por Faraco et al. (1993 y A.M. Faraco comunicación personal), quien demuestra la tendencia hacia la convergencia de las zonas quemadas como pinar o como matorral en un territorio de características bioclimáticas y edáficas similares al aquí estudiado. A.M. Faraco y J.R. Quintana (comunicación personal) han mostrado que estas zonas quemadas acumulan grandes cantidades de biomasa con el tiempo (superior a 10 kg m^{-2} al cabo de 16-17 años, de los que aproximadamente una cuarta parte corresponden a la hojarasca y casi un 30% a

biomasa muerta) lo que implica un notable riesgo de incendio y, de producirse, de probable elevada intensidad.

Asumiendo que dentro de la superficie forestal las áreas no identificadas como arbolado estarían ocupadas por matorral en su mayor parte, el riesgo de incendios basado en una mayor concentración de áreas de las mismas características (áreas extensas de matorral no presentes en 1957 y áreas extensas de arbolado tampoco presentes en 1957) se habría visto alterado. En general, cuando la proporción de un determinado tipo de cobertura aumenta por encima de un valor umbral, un mayor número de manchas tienden a estar altamente conectadas entre sí (Gardner et al., 1987) como se ha visto para la superficie arbolada y, presumiblemente, también ocurre para los matorrales. Por tanto la propagación del fuego (en general de intensidad alta y en condiciones extremas) puede con mayor probabilidad afectar a un área más extensa (Turner et al., 1989a) y con consecuencias más negativas para el medio. Los resultados obtenidos en el Capítulo 7 en relación a la tendencia a la agregación espacial de los incendios y por tanto a que las áreas afectadas formen manchas de cada vez mayor tamaño y la susceptibilidad de las áreas quemadas a verse nuevamente afectadas por incendios ilustran también las tendencias comentadas.

Apéndice 6.1. Fotografías aéreas empleadas (año del vuelo, pasada y código de Oeste a Este y de Norte a Sur) y área interpretada en cada una de ellas. Para cada fotografía se indica el número de puntos de control, el tipo de ecuación empleado y el error medio cuadrático obtenido en las correcciones geométricas a que se sometió cada imagen una vez capturada con el escáner. Los errores están referidos a píxeles (8,3 metros). La interpolación bilineal se utilizó como método de remuestreo de los píxeles vecinos.

Fotografías aéreas				Correcciones geométricas		
Año	Pasada	Código	Área (km)	Puntos de control	Tipo de ecuación	Error medio (RMSE)
1957	1	F92	3 x 4	6	Lineal	0,6
"	1	F93	2 x 4	8	Cuadrática	1,0
"	1	F94	2 x 4	5	Lineal	2,0
"	1	F95	3 x 4	5	Lineal	2,6
1957	2	F47	2 x 4	8	Cuadrática	0,6
"	2	F48	2 x 4	7	Cuadrática	2,1
"	2	F49	3 x 4	10	Cuadrática	2,0
"	2	F50	3 x 4	8	Cuadrática	1,9
1985	1	FK5	3 x 5	9	Cuadrática	1,7
"	1	FK6	2 x 5	8	Cuadrática	1,5
"	1	FK7	2 x 5	8	Cuadrática	0,4
"	1	FK8	2 x 5	8	Cuadrática	1,3
1985	2	FL4	2 x 4	7	Cuadrática	0,6
"	2	FL5	3 x 4	8	Cuadrática	1,3
"	2	FL6	2 x 4	7	Cuadrática	0,3
"	2	FL7	2 x 4	8	Cuadrática	0,6

Capítulo 7

Distribución espacial de los incendios forestales en una zona de la vertiente sur de la Sierra de Gredos

7.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha documentado en el Capítulo 1, la historia reciente de los ecosistemas españoles ha estado marcada por la alta incidencia de los incendios forestales en una buena parte de nuestro territorio. Como se ha señalado también, esta alta incidencia de los incendios no es privativa de España y ha podido estar relacionada con cambios ocurridos en la estructura del paisaje, tal como se analiza en el Capítulo 6. En dicho capítulo ya se introdujo la posible repercusión que los propios incendios pueden tener sobre la configuración del paisaje. En este capítulo se desarrollará específicamente este tema mediante el estudio de la incidencia y la distribución espacial de los incendios en una zona de la Sierra de Gredos.

La motivación de este estudio está relacionada con dos aspectos importantes de la ecología de los ecosistemas terrestres en relación al fuego. El primero de ellos se relaciona directamente con una cuestión prioritaria en el conocimiento de los ecosistemas en su mundo real, esto es, en los paisajes que forman, y está referido a las posibles interacciones entre estructura y función (Turner, 1989). En este caso nos referiremos a los cambios que los propios incendios han podido introducir en el paisaje y valoraremos en qué medida dichos cambios podrán afectar a la propia función del paisaje, en nuestro caso, la susceptibilidad a la propagación de perturbaciones como el fuego. Los fundamentos teóricos de estas relaciones se basan, por una parte, en estudios de la propagación de perturbaciones en modelos neutrales (Gardner et al., 1987; Turner et al., 1989a), así como en las simulaciones de la propagación del fuego a través de paisajes complejos (Green et al., 1991; Baker, 1992; Davis y Burrows, 1994). Como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, la configuración espacial de los distintos elementos del paisaje puede incidir de forma no lineal en su susceptibilidad al fuego. A diferencia del capítulo precedente, en el que la atención se centró en la superficie arbolada, el énfasis aquí se hará en las zonas quemadas, bajo la asunción de que, probablemente, muchas de ellas no se repoblarán de nuevo y darán lugar a manchas que seguirán sus propias dinámicas. Valorar los posibles riesgos de tales manchas es, sin duda, una prioridad de la política de lucha contra los incendios, con implicaciones no sólo prácticas para este territorio sino para otras muchas zonas de España con una incidencia alta del fuego y en las que, por motivos socioeconómicos, no se podrán dedicar a las labores de reforestación y mantenimiento de las masas arboladas los recursos que se dedicaron en el pasado.

Pero, por otra parte, conocer las modificaciones que el fuego introduce en el paisaje puede ser también interesante desde el punto de vista teórico, habida cuenta del territorio del que se parte en comparación con los estudios habituales de esta problemática. En nuestro caso, el sistema de partida es un paisaje caracterizado por usos intensivos en el pasado que han cesado recientemente, dando lugar a modificaciones en su estructura que han podido interaccionar con los incendios. Conocer cómo éstos ayudan a modelar el paisaje es un tema novedoso. Por el contrario, la mayoría de los estudios que abordan las interacciones entre fuego y paisaje se han realizado en zonas con mucha menor presión humana, en algunos casos en ecosistemas más "naturales" o, cuando menos, no tan directamente resultantes de la acción humana (Heinselman, 1973; Johnson y Fryer, 1987; Clark, 1988; Baker et al., 1991; Dansereau y Bergeron, 1993). La acción humana en estos casos está más bien ligada a las modificaciones del régimen de incendios, con la consiguiente modificación de los patrones paisajísticos. La importancia del hombre en la configuración del territorio por medio del fuego la ha puesto de relieve Minnich (1983, 1989), así como las implicaciones de una política forestal que, a través de modificaciones en la configuración del paisaje, puede incidir de forma notable en el propio riesgo de incendio.

Abundando en estos antecedentes, hay que señalar que los incendios, al igual que otras perturbaciones, son normalmente considerados como factores que introducen heterogeneidad espacial (Sousa, 1984; White y Pickett, 1985) con la consiguiente importancia por cuanto esto puede condicionar el funcionamiento de los sistemas a los que afectan. Ciertamente, un aspecto extremo de cómo la estructura puede afectar a la función lo pone de relieve el estudio de los grandes incendios de Yellowstone (Meyer et al., 1992). En este caso, la función estudiada eran los flujos de agua y materiales y la alteración vino ligada a un incendio de proporciones enormes. Pues bien, uno de los objetivos de este trabajo será valorar el grado de alteración que los incendios pueden inducir en un paisaje a través de la proporción del territorio que afectan y que, presumiblemente, homogeneizan (Pérez et al., 1996).

La segunda motivación de este trabajo está relacionada con aspectos de la gestión y, más en concreto, con la valoración del impacto de los incendios. En el Capítulo 1 se ha visto la propensión de muchas zonas de España a que ocurran incendios dentro de ellas, siendo notable la existencia de una gran heterogeneidad espacial. El hecho de que los incendios no se produzcan al azar en cualquier punto, sino que tienen tendencia a agregarse en ciertas zonas del país, tiene implicaciones a todos los niveles de la prevención, lucha, etc., incluida la conservación de los ecosistemas a grandes rasgos. En el Capítulo 2 también se documentó la tendencia hacia una cierta segregación espacial entre los incendios originados por fuentes naturales y los originados por el hombre. La

evidencia en aquel caso era más indirecta, al basarse en datos estadísticos sin poder disponer de una cartografía de los incendios de uno y otro tipo. En este capítulo se pretende justamente eso, representar espacialmente los incendios y conocer cuáles pueden ser las condiciones topográficas, de vecindad con otros incendios, de alteración del patrón paisajístico y de relación con las causas de origen.

Conocer estos aspectos es de enorme interés para tener una valoración más precisa de los posibles impactos y de las tendencias futuras, pues los impactos de los incendios no son indiferentes a los territorios a los que afectan sino que pueden depender de su altitud, pendiente, exposición, etc., entre otros aspectos. Igualmente, conocer las relaciones de vecindad de unos incendios con otros, y las tendencias a la agregación de las zonas quemadas, si es que existen, pueden tener repercusiones importantes de cara a valorar los riesgos futuros. Estudios realizados en otras zonas de tipo mediterráneo muestran que existe una tendencia hacia la agregación espacial de los incendios (Chou et al., 1990, 1993b), lo que vendría a indicar que el riesgo en un territorio no es homogéneo.

Un último aspecto de la investigación que se aborda en este capítulo está relacionado con la necesidad de profundizar en el conocimiento de la historia de los incendios en una zona concreta y, muy en particular, con la necesidad de disponer de cifras menos generales que las que se obtienen con datos estadísticos, tal como se hace en los Capítulos 1, 2 y 3, acerca de los periodos de rotación asociados a los incendios. Las aproximaciones normalmente utilizadas para este aspecto difieren según los datos disponibles, desde reconstrucciones basadas en sedimentos lacustres o marinos (Byrne et al., 1977; Clark, 1988; Clark et al., 1989) a información basada en cicatrices de árboles testigo y en la edad de la vegetación tras el último incendio (Heinselman, 1973; Baisan y Swetnan, 1990; López-Soria y Castell, 1992; Fule y Covington, 1994; Trabaud, 1994; Vega, 1994). Sin duda, la mejor aproximación es la reconstrucción espacial de las áreas afectadas por incendios, bien basada en fotografías aéreas, o para periodos más recientes, utilizando imágenes de satélite (Minnich, 1983, 1989; Davis et al., 1988; Chuvieco y Congalton, 1989; Institut Cartogràphic de Catalunya, 1992; Salas, 1994).

El objetivo fundamental de este trabajo se centra en reconstruir espacialmente la incidencia de los incendios en la superficie forestal de una zona concreta de la Sierra de Gredos. Para ello se han empleado fotografías aéreas e información documental con el fin de elaborar un mapa con las superficies recorridas por el fuego durante el periodo de 21 años que media entre 1970 y 1990. En el Capítulo 6 ya se emplearon algunos datos obtenidos de esta reconstrucción para valorar la incidencia de los incendios en los cambios registrados en el paisaje arbolado. Las tareas concretas abordadas en este

capítulo son: (1) cartografiar los incendios de más de 4 ha registrados en la zona elegida; (2) determinar las áreas afectadas por el fuego en más de una ocasión y valorar su importancia frente a las zonas no quemadas; (3) establecer intervalos de recurrencia para las zonas previamente afectadas por el fuego; (4) valorar los cambios en la configuración del mosaico espacial como consecuencia de los incendios registrados; (5) valorar la influencia de la altitud, la pendiente y la exposición sobre las áreas quemadas en una o en más ocasiones.

Las principales hipótesis de trabajo para este estudio han sido:

1. La distribución espacial de los incendios no es aleatoria dado que las posibles fuentes de ignición no se reparten homogéneamente por el territorio. En el caso de los rayos, éstos tienen tendencia a ocurrir preferentemente en ciertas zonas (ver el Capítulo 2). En el caso de fuentes de ignición humanas, bien intencionadas, bien por negligencias, tampoco es presumible una distribución aleatoria. En el caso de las negligencias la fuente de incendios de este tipo estará ligada a las zonas con mayor influencia humana, y con actividades susceptibles de producir fuentes de ignición. Éstas serán más frecuentes en zonas más bajas, próximas a núcleos urbanos, mejor comunicadas, etc. Basándonos en los argumentos anteriores, cabe suponer también que los incendios naturales y humanos deben presentar patrones espaciales diferentes y afectar diferentes porciones del territorio en cuanto a su altitud, pendiente, exposición, etc.
2. Las diferencias en la susceptibilidad a soportar incendios entre las áreas no quemadas (pinares maduros y, en general, manejados) y las áreas quemadas (matorrales originados tras incendios previos) hará que la incidencia de los incendios posteriores sea mayor en los segundos.
3. Dado que los incendios se propagan mejor pendiente arriba y a favor del viento, igualmente cabría esperar una distribución de los mismos y de las áreas afectadas acordes con estas asunciones, siendo más frecuentes las zonas afectadas con exposiciones más desecantes, de pendientes medias y altas y en el sentido de la circulación de los vientos dominantes.

7.2. MATERIAL Y MÉTODOS

7.2.1. Área de estudio

La zona de estudio ha sido la mitad oriental del valle de las Cinco Villas (Ávila); tiene una extensión de 14 x 14 km y está comprendida por las coordenadas UTM 4450-4464 y 316-330 de la zona 30T (Figura 7.1). El territorio está situado en la vertiente meridional de la Sierra de Gredos, y presenta un acusado gradiente altitudinal en sentido sureste-noroeste, de manera que en poco más de 14 km se pasa de una altitud de 400 m a más de 2200 m en la línea de cumbres.

En la zona de estudio se encuentran representadas cuatro series de vegetación potencial (Rivas-Martínez, 1987a). Por debajo de los 600 m se sitúa la serie mesomediterránea de la encina (*Pyro bourgaeanae-Querceto rotundifoliae sigmetum*). En la zona comprendida entre los 600 a 800 m se encuentra la serie mesomediterránea húmeda del roble melojo (*Arbuto-Querceto pyrenaicae sigmetum*). Entre los 800 y 1600 m se sitúa la serie supramediterránea subhúmeda del roble melojo (*Luzulo forsteri-Querceto pyrenaicae sigmetum*). Por último, por encima de los 1600 m hasta el piso crioromediterráneo se encuentra la serie oromediterránea del piorno serrano (*Cytiso purganti-Echinosparteto bardanessi sigmetum*). Las dos primeras series se encuentran dentro del sector biogeográfico Luso-Extremadurense y las dos últimas dentro del sector Bejarano-Gredense (Rivas-Martínez, 1987b). El substrato está formado fundamentalmente por materiales plutónicos (granitos en su mayor parte) y en las partes bajas por materiales metamórficos, dando lugar a suelos profundos, moderadamente ácidos y relativamente fértiles, capaces de sostener una vegetación arbolada con turnos de corta relativamente cortos.

7.2.2. Interpretación de las fotografías aéreas y restitución a mapas

Las superficies afectadas por los incendios registrados en el periodo 1970-1990 se han delimitado sobre fotografías aéreas a escala 1:20.000 correspondientes a los años 1982 y 1990. Además, para afianzar las áreas delimitadas se han utilizado fotografías aéreas de los años 1957 y 1985 a escala 1:30.000 y del año 1972 a escala 1:25.000. Es decir, se han delimitado los perímetros de las áreas quemadas sobre fotografías correspondientes a dos años, pero se ha seguido la dinámica de las áreas afectadas por los distintos

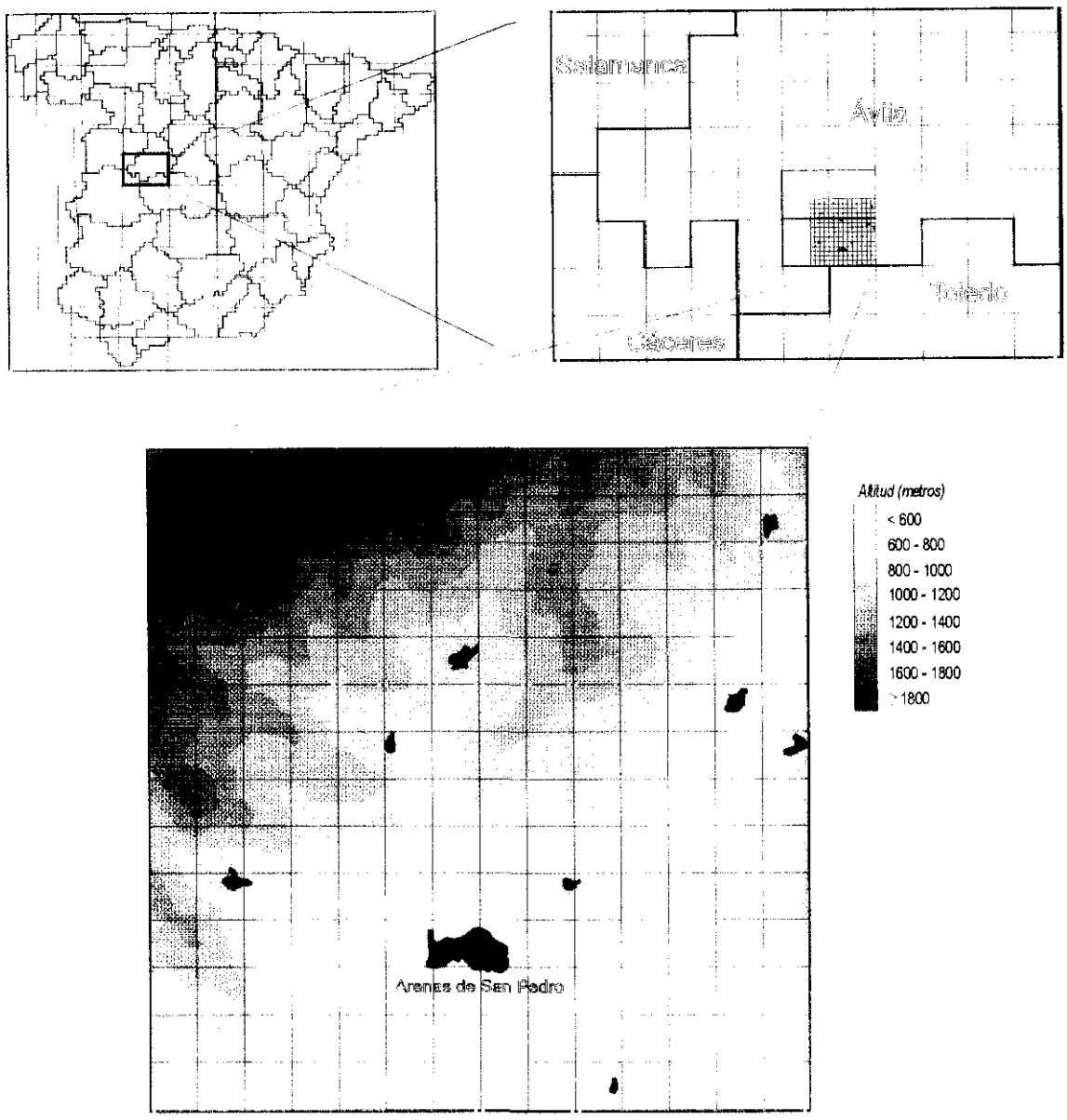


Figura 7.1. Localización de la zona de estudio en España con detalle de la hoja 1:200.000 del Instituto Geográfico del Ejército en la que se encuentra y altitudes en intervalos de 200 metros. Se incluye la ubicación de Arenas de San Pedro y los otros 8 núcleos de población presentes en los 14x14 km analizados.

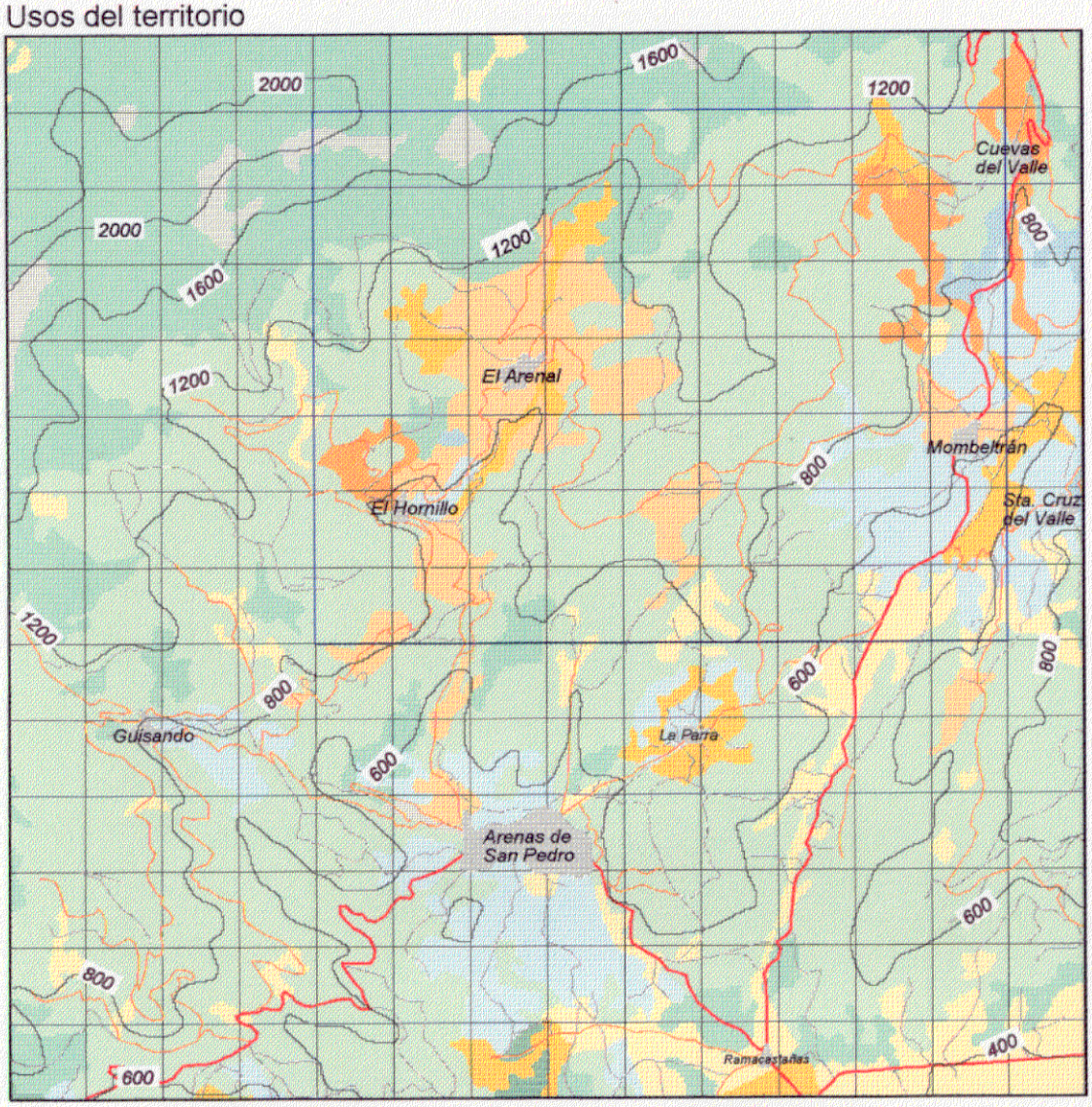
incendios en 5 etapas distintas para el periodo estudiado, correspondientes a los vuelos citados. Los perímetros rotulados sobre las fotografías aéreas fueron trasladados a mapas topográficos a escala 1:25.000 por medio de un restituidor óptico (Zoom Transfer Scope. Bausch and Lomb). Los polígonos que delimitan cada incendio fueron corregidos

geométricamente por medio de este proceso, tras lo cual fueron digitalizados e integrados en el Sistema de Información Geográfica IDRISI (Eastman, 1992). De esta manera ha podido generarse una imagen de la zona que recoge la incidencia espacial de los incendios durante todo el periodo de estudio. Por otra parte, por medio de otras capas temáticas integradas también en el Sistema de Información Geográfica, se han podido relacionar los lugares donde se han registrado los incendios con otras variables de interés. Todas las imágenes generadas se han transformado a un tamaño de pixel de 25 m, única escala de medida que ha sido utilizada en el estudio. De esta manera, el territorio total está integrado por 313600 píxeles.

7.2.3. Tipos de uso y territorio forestal

Los usos del territorio de la zona de estudio han sido tomados del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos a escala 1:50.000 (Ministerio de Agricultura, 1978). Los recintos representados en dicho mapa han sido digitalizados y posteriormente transformados a una imagen de 560x560 celdillas. La imagen obtenida y la superficie ocupada por los distintos tipos de usos se muestra en la Figura 7.2. En ella se observa que las áreas de cultivos agrícolas (mosaico de cultivos, huertas, olivares y viñedos) se ubican alrededor de los 9 núcleos de población incluidos en los 14x14 km de estudio. Estas áreas, junto a otras ocupadas por pastizales y prados húmedos, en algunos casos con recubrimiento de castaños, han sido excluidas de lo que hemos considerado como superficie forestal. También se han excluido del territorio forestal de la zona las áreas situadas a más de 1800 metros de altitud, así como las situadas en la vertiente norte (esquina noroeste de la imagen). La superficie forestal resultante en la zona de estudio está integrada por las áreas consideradas bajo las categorías de arbolado de coníferas (*Pinus pinaster* Aiton y, en menor medida, *P. sylvestris* L.), matorrales (escobonales de *Cytisus* sp. pl., jarales de *Cistus* sp. pl. y, jaral-brezales, fundamentalmente) y una pequeña porción considerada como rebollar (*Quercus pyrenaica* Willd.). En total, la superficie considerada como forestal asciende a 13200 ha, representando el 67,2% de la superficie total del territorio en el plano. Asimismo, se han digitalizado las vías de comunicación (carreteras nacionales, comarcales y pistas forestales) y los núcleos urbanos a partir de mapas topográficos a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Nacional.

Usos del territorio



Tipo de uso	Hectáreas	
Improductivo	401	2%
Olivar	1,538	8%
Viñedo	111	1%
Prados y huertas	572	3%
Pastizal	1,234	6%
Mosaico de cultivos	901	5%
Castañar	325	2%
Rebollar	39	0%
Matorral	4,051	21%
Arbolado de coníferas	10,429	53%

0 1 2 3 km

Carretera nacional
Carretera local
Pistas y caminos

Figura 7.2. Usos del territorio en la zona estudiada tomados del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos a escala 1:50.000 (MAPA, 1978). Los tipos de usos considerados como superficie forestal en los análisis efectuados han sido: arbolado de coníferas, matorral y rebollar. Se incluyen algunas curvas de nivel, las vías de comunicación y los núcleos de población. El rectángulo azul de 9x7 km delimita la zona analizada en el Capítulo 6.

7.2.4. Modelo digital del terreno

Para poder realizar la valoración de las áreas afectadas por los incendios en función de su topografía se ha elaborado un modelo digital del terreno (MDT). Para evitar efectos borde, la construcción de este MDT se ha realizado para una superficie de 17x16 km que comprende a la zona de estudio (14x14 km). Para la construcción del MDT se han digitalizado las curvas de nivel en intervalos de 100 metros (Bosque, 1992), utilizándose como base el mapa a escala 1:50.000 del Instituto Geográfico del Ejército. El fichero vectorial obtenido en la digitalización se transformó en una imagen con un tamaño de pixel de aproximadamente 11 metros. A partir de esta imagen se procedió a realizar las interpolaciones correspondientes en las cuatro direcciones mediante el cálculo de las líneas de máxima pendiente, asignando así valores a todos los píxeles de la imagen. La nueva imagen, una vez filtrada, se transformó a un tamaño de pixel de 25 m, derivándose posteriormente los correspondientes mapas de pendientes y exposiciones. Para todos estos procesos se emplearon diversos módulos contenidos en el Sistema de Información Geográfica IDRISI. La Figura 7.1 muestra el mapa de altitudes de la zona a partir del MDT obtenido, observándose que un 46,6% del territorio analizado se encuentra por debajo de los 800 m y un 7,3% por encima de los 1800 m.

7.2.5. Otras fuentes de información y verificaciones

Todos los incendios cartografiados se han basado en la documentación aportada por los "Partes de Incendio Forestal" disponibles en el Servicio de Defensa contra Incendios Forestales del ICONA y en el Servicio Forestal de Ávila (Consejería de Agricultura, Ganadería y Montes de la Junta de Castilla-León). Del total de aproximadamente 87 incendios que se han podido registrar en la zona de estudio, con una superficie mayor o igual a 4 ha, se han podido localizar y cartografiar 75. En la medida de lo posible, todas las áreas afectadas por los incendios fueron verificadas sobre el terreno durante el verano de 1994. En algunos casos, sobre todo para incendios antiguos, las huellas son muy escasas y las modificaciones del lugar pueden haber sido importantes. Se ha empleado toda la información documental disponible para poder localizar y ubicar los incendios, a saber: comunicaciones desde los puestos de vigilancia de incendios a la central comarcal, listados anuales del Servicio Forestal de Ávila, así como los ya citados partes de incendio forestal. La toponimia de los parajes de los puntos de inicio y fin del fuego, y el tipo de propiedad afectada han sido de gran ayuda en la localización de los incendios. Además, gran parte del territorio está situado en montes de utilidad pública, por lo que se ha

dispuesto de los mapas forestales de los montes implicados, documentación que ha sido proporcionada por el Servicio Forestal de Ávila. Esta información resultó de gran valor para aquellos incendios en los que se facilitaron detalles de los cuarteles o rodales en los que comenzó o terminó el fuego. En otros casos, la información disponible ha sido muy escasa. Para afianzar las delimitaciones se ha contrastado la información documental y la obtenida de las fotografías aéreas con la experiencia e información sobre los incendios de los agentes forestales de la zona. Claudio Vega y Honorio Rodríguez, han sido de una gran ayuda para realizar esta reconstrucción. Algunos incendios de pequeño tamaño no se han podido ubicar debido al borrado de las huellas, a veces por un incendio posterior en el mismo paraje, o por la falta de datos precisos para su ubicación como se comentó previamente. El último vuelo disponible (1990) se realizó poco después del gran incendio del 24 de Julio de 1990, que afectó a los términos de Guisando y Arenas de San Pedro. Con posterioridad a esta fecha se produjeron en la zona de estudio otros dos incendios que fueron localizados pero que no se han incluido en este análisis y que afectaron a 120 y a 10 ha respectivamente.

7.3. RESULTADOS

7.3.1. Incendios registrados y cartografiados

El número total de incendios asignado a las cuatro cuadrículas de 10x10 km que circundan a la zona de estudio durante el periodo 1974-94 fue de 761, de los cuales 169, esto es, el 22%, fueron mayores de 4 ha (Tabla 7.1A). La superficie total afectada por estos incendios fue de 9957 ha, de las cuales un 95% fue recorrida por los incendios de 4 ó más hectáreas. Por lo que respecta a la zona de estudio en sentido estricto, de los incendios registrados durante 1970-90 se han podido ubicar y cartografiar 75 incendios ≥4 ha (Apéndice 7.1 y Tabla 7.1B), incendios que han afectado a un total de 5815 ha, dentro o fuera de la zona estudiada. Por tanto, suponiendo que los incendios de la zona ampliada (20x20 km) durante el periodo 1974-94 reflejan lo ocurrido en la zona de estudio (14x14 km) para el periodo 1970-90, y ponderando la proporción de territorio incluido en cada una de las cuatro cuadrículas se obtendría que el número total de incendios mayores de 0,1 ha sería, en la zona de 14x14 km, de 568, siendo los ≥ 4 ha un 13,2% del total. No obstante, parece claro que centrarse en los incendios ≥ 4 ha no supondría una pérdida importante en lo que respecta a la superficie quemada, al reflejar lo ocurrido para un 95% del territorio quemado.

La mayoría de los incendios registrados, tanto en la zona ampliada (20x20 km) como en la zona de estudio (14x14 km) han tenido su origen en actividades relacionadas con el hombre (Tabla 7.1). Los incendios originados por rayos representaron un 11% del número total de incendios registrados en los 20x20 km y afectaron a un 13% de la superficie quemada. Para el conjunto de los 75 incendios estudiados en detalle, los originados por rayos fueron sólo 2, afectando a un 13% de la superficie total quemada.

De los 75 incendios que se han cartografiado (ver más adelante), su incidencia anual en la zona de estudio ha sido variable, tanto en el número de incendios como en la superficie quemada, sin que pueda destacarse ninguna tendencia clara para este periodo (Figura 7.3A). El promedio anual registrado en los 21 años analizados fue de 3,6 incendios y 277 ha quemadas, siendo 1989 el año en que se registraron mayor número de incendios y mayor superficie quemada. No obstante, para el conjunto de estos incendios, incluyendo las superficies afectadas dentro o fuera de la zona de 14x14 km y a partir de los datos indicados en los partes de incendios, 1976 fue el año con mayor territorio quemado (Figura 7.3B).

Tabla 7.1. (A) Incendios ≥ 0,1 hectáreas registrados en las cuatro cuadrículas (20x20 km) circundantes con el territorio analizado para el periodo 1974-94 y (B) incendios ≥ 4 hectáreas que han afectado al territorio estudiado (14x14 km) en el periodo 1970-90.

	Número de incendios		*Superficie quemada*	
	No.	*%*	*Hectáreas*	*%*
(A) 20x20 km; ≥ 0,1 ha				
Por tamaño				
≥ 4 hectáreas	169	22%	9.494	95%
< 4 hectáreas	592	78%	463	5%
Por causa de inicio				
Quema de pastos	35	5%	1.331	13%
Rayos	85	11%	1.269	13%
Negligencias	170	22%	1.088	11%
Intencionados	213	28%	3.967	40%
Desconocidos	258	34%	2.304	23%
Total	*761*	*100%*	*9.957*	*100%*
(B) 14x14 km; ≥ 4 ha				
Por causa de inicio				
Quema de pastos	0	0%	0	0%
Rayos	2	3%	785	13%
Negligencias	14	19%	309	5%
Intencionados	33	44%	3.038	52%
Desconocidos	26	35%	1.683	29%
Total	*75*	*100%*	*5815*	*100%*

A partir de estos datos la proporción de superficie arbolada afectada por el fuego supuso, en promedio para los 21 años de estudio, un 90% del total. Para los incendios de los que se dispone de información sobre la edad del arbolado quemado (un 66% de los 75 incendios) y en los que se vio afectado *Pinus pinaster* se observa que una proporción próxima al 50% de la superficie quemada se vio afectada con edades del arbolado inferiores a los 30 años (Figura 7.4).

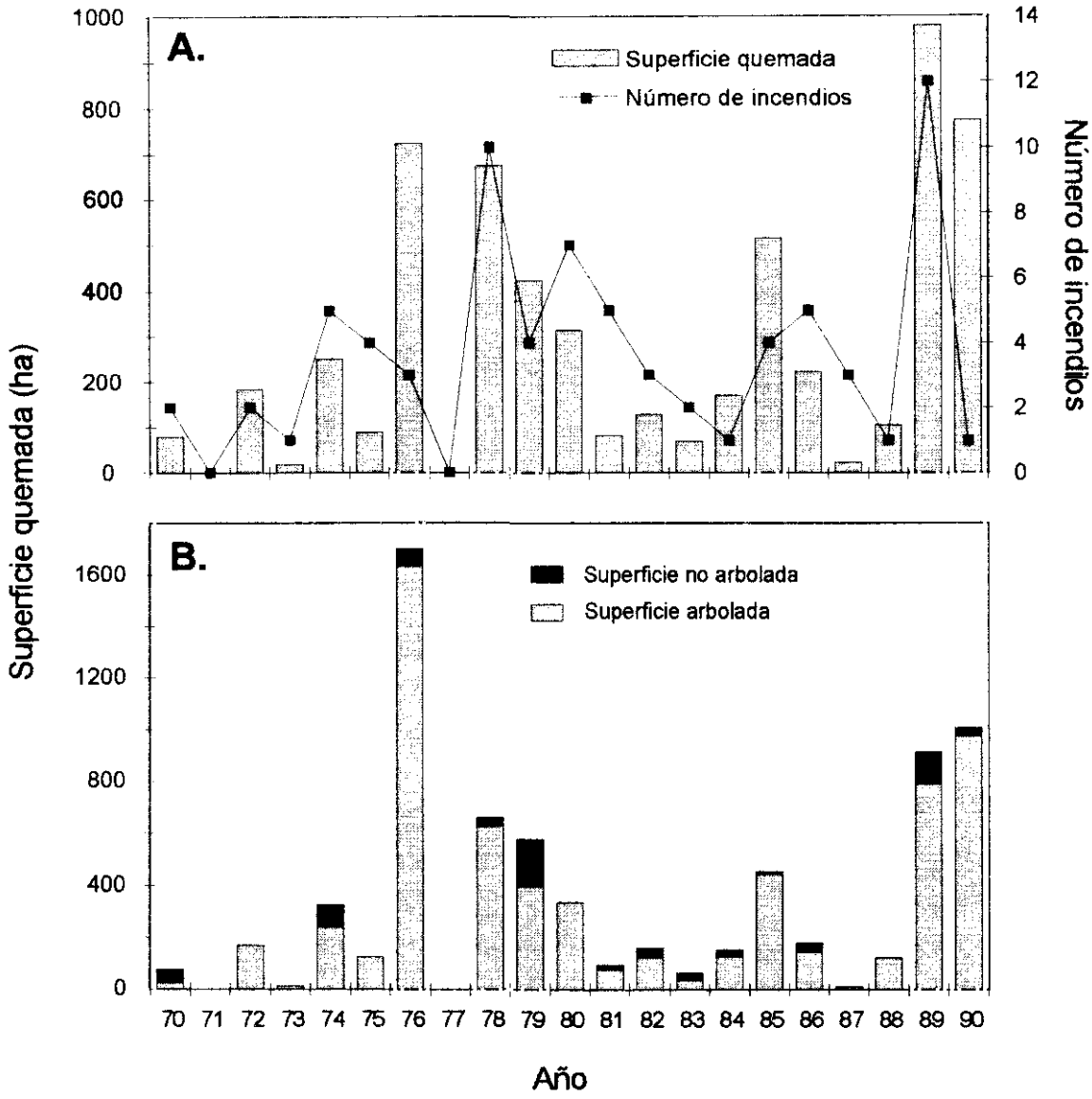


Figura 7.3. (A) Número de incendios ≥ 4 ha y superficie quemada anualmente dentro de la zona de estudio (a partir de la interpretación y cartografía efectuada para los 14x14 km). (B) Superficie arbolada y no arbolada quemada por estos incendios (a partir de los Partes de Incendio Forestal, dentro y fuera de la zona de estudio).

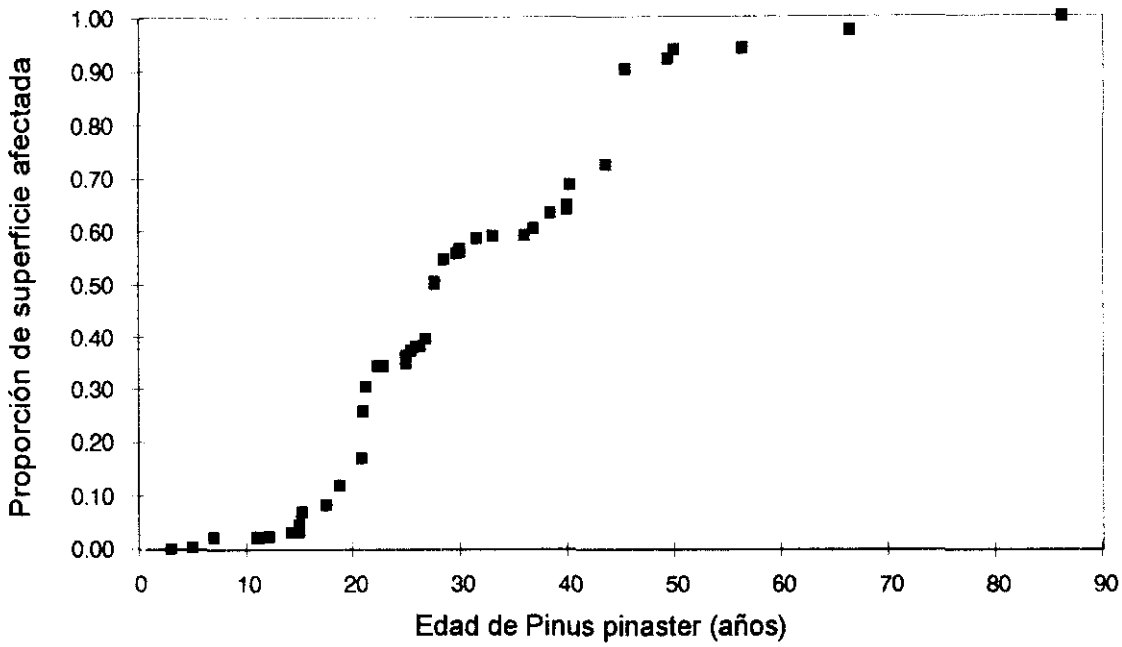


Figura 7.4. Proporción de superficie quemada de *Pinus pinaster* en función de la edad del arbolado afectado. Los datos mostrados están basados en un 66% de los 75 incendios localizados en la zona de estudio (para los que se dispone de información y se vio afectado *Pinus pinaster*). Para los incendios con más de un dato de edad el valor mostrado es el resultado de la ponderación de la edad de cada masa afectada por la superficie ocupada por ésta.

7.3.2. Análisis espacial de la superficie quemada

La representación cartográfica de los 75 incendios estudiados muestra la más que notable influencia de los incendios forestales en el paisaje del territorio estudiado (Figura 7.5). Los incendios han afectado a una buena parte del territorio pero su distribución no fue homogénea, siendo frecuente que muchos incendios contacten con otros incendios. Asimismo, contrastan las formas más redondeadas de los incendios de pequeño tamaño frente a las más alargadas de los de mayor tamaño, en muchos casos siguiendo las pendientes y dirección presumible de los vientos dominantes en la zona.

La superficie que se ha visto afectada dentro de la zona de estudio por los 75 incendios cartografiados ha sido de 4.586 ha, la mayor parte de ellas afectando a territorio considerado como forestal (Figura 7.6 y Tabla 7.2). En porcentaje, estas cifras

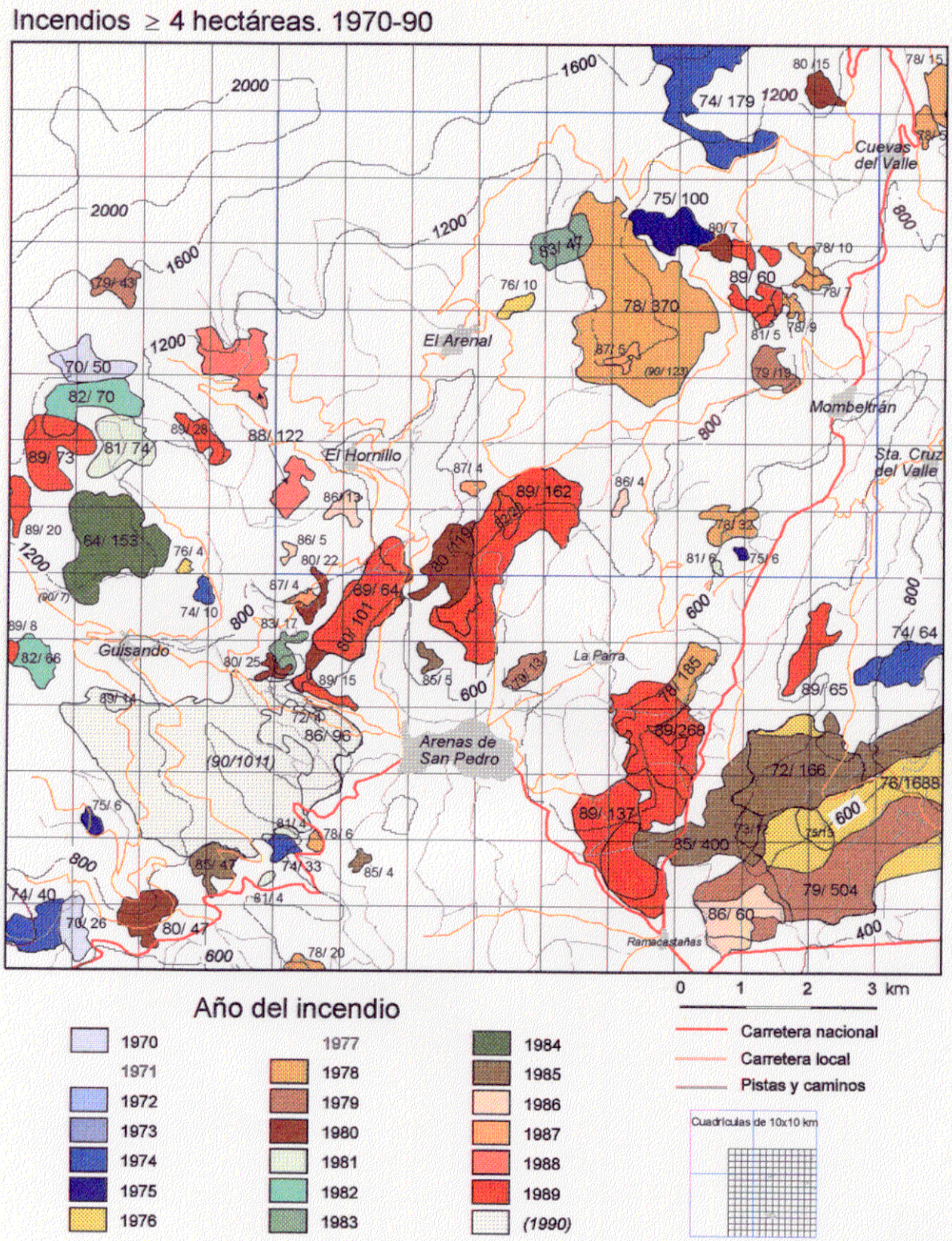


Figura 7.5. Mapa de las superficies afectadas anualmente por los 75 incendios ≥ 4 ha identificados para el periodo 1970-90. Los códigos que identifican cada polígono representan el año del incendio y la superficie total quemada y se corresponden con los del Apéndice 7.1. Las líneas negras que atraviesan algunos polígonos corresponden a límites de antiguos incendios que han sido borrados por otros más recientes.

Figura 7.5 (continuación) Algunos incendios presentan áreas discontinuas. El rectángulo azul de 9x7 km delimita la zona analizada en el Capítulo 6. Se representa también la posición de la zona analizada en el contexto de las cuadrículas de 10x10 km.

representarían un 23.3% de la superficie total del territorio analizado. Restringiendo los cálculos al territorio forestal, este porcentaje se elevaría a un 32,7%, esto es, una pérdida de territorio forestal original debido a los incendios próxima a un 1,6% anual.

Tabla 7.2. Superficie quemada por los 75 incendios ≥ 4 ha cartografiados en los 14x14 km y las áreas que se han visto afectadas por estos incendios en una o más ocasiones. Se dan los datos relativos a todo el territorio y al territorio considerado como forestal. El tamaño de pixel empleado en los cálculos ha sido de 25 metros.

Área de referencia	*Una vez*		*Dos veces*		*Tres veces*	
	ha	%	ha	%	ha	%
Todo el territorio (19600 ha)	4586	23,3	1066	5,4	161	0,8
Superficie forestal (13178 ha)	4312	32,7	976	7,4	153	1,2

La tendencia a la agregación de los incendios se pone de relieve también en las zonas que han sido afectadas en más de una ocasión durante los 21 años de estudio (Figura 7.7 y Tabla 7.2). Así, un 5,4% del territorio total, o 7,4% del territorio forestal, se vio afectado en dos ocasiones. Esta cifra referida a las zonas forestales quemadas representa un 22,7%. Además, hubo zonas que ardieron en tres ocasiones, representando una proporción pequeña del territorio total pero una parte no tan pequeña en términos relativos (en torno al 15% de los territorios afectados en dos ocasiones), habida cuenta del menor tiempo disponible para que pudiesen registrarse tres incendios en el mismo lugar en un periodo de 21 años.

La distribución de los tipos de superficie quemada cada año (quemada por primera vez o requemada en una o dos ocasiones) varía de año en año, pareciendo observarse una tendencia creciente hacia un mayor peso de las zonas requemadas con respecto al total quemado en los últimos años del estudio (Figura 7.8A). Así, para el año 1976 los

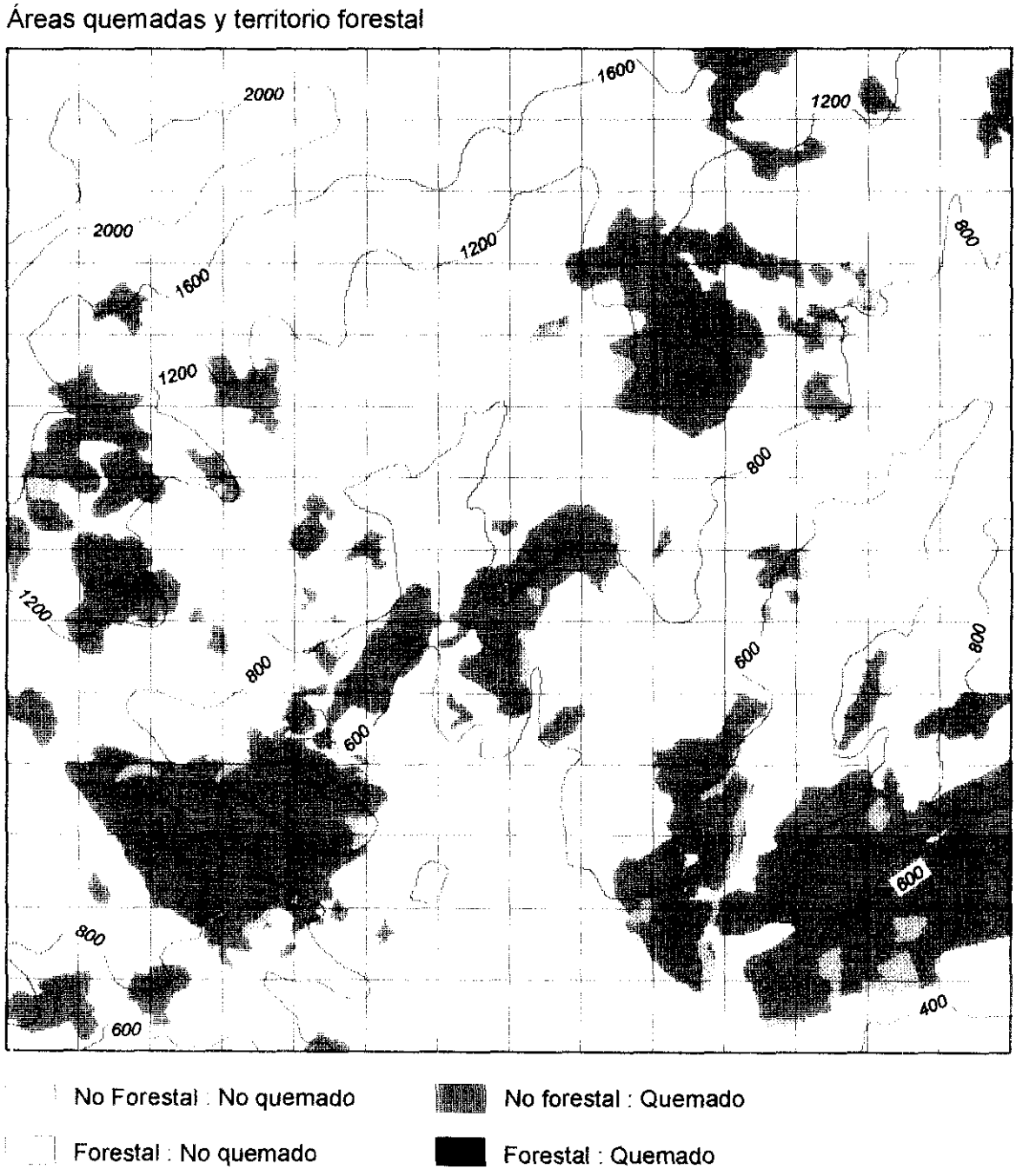


Figura 7.6. Imagen resultante del cruce del territorio considerado como superficie forestal y no forestal (ver Material y Métodos) y las áreas afectadas por los 75 incendios identificados para el periodo 1970-90.

incendios registrados afectaron a más de un 30% de la superficie que ya había sido afectada por incendios durante el periodo 1970-1975 mientras que la incidencia sobre las áreas no quemadas previamente fue proporcionalmente mucho menor. Para los últimos

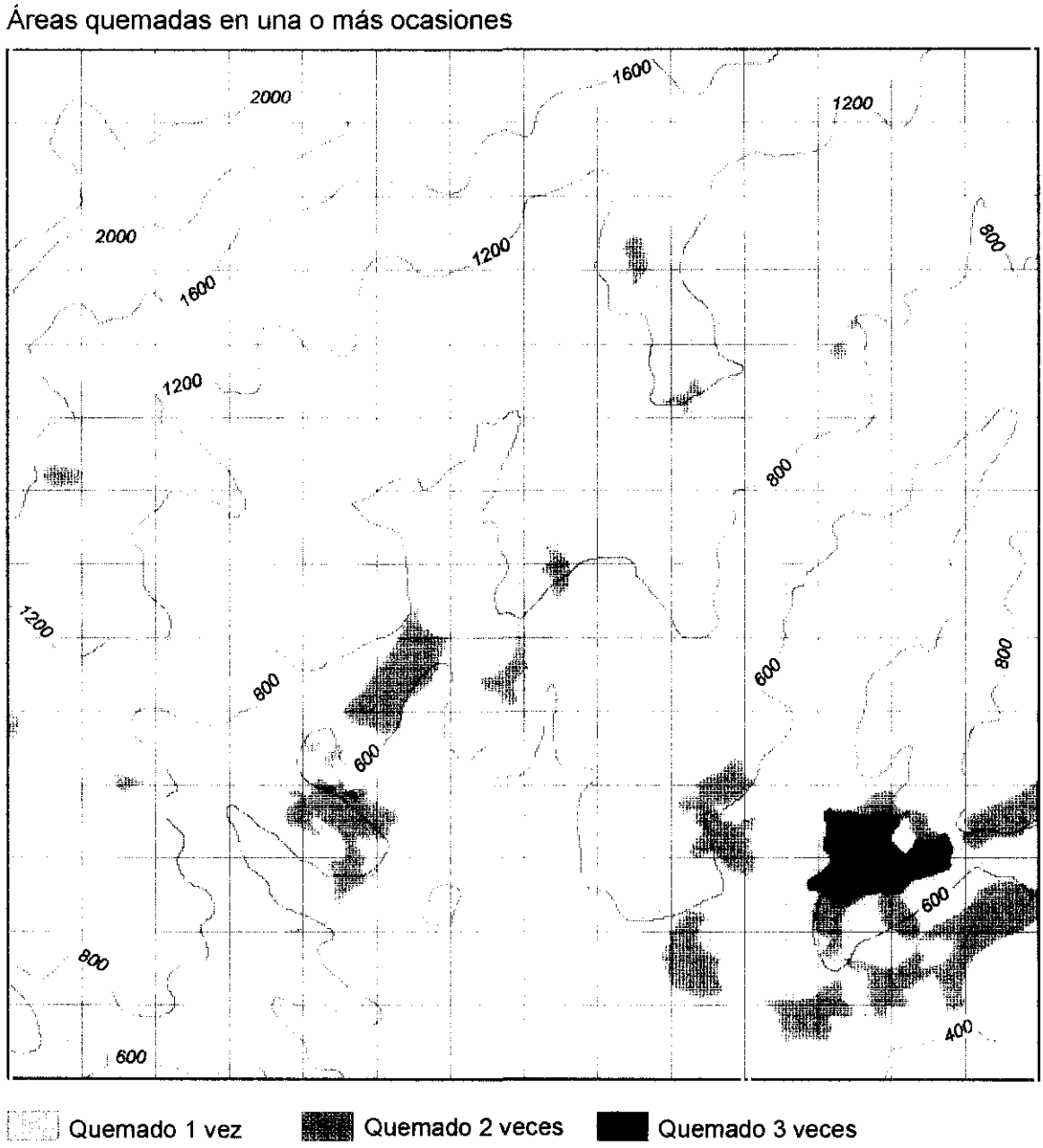


Figura 7.7. Superficie forestal afectada por incendios en una, dos y tres ocasiones durante el periodo 1970-90

años, y a pesar de la menor superficie ocupada por las áreas quemadas frente a las áreas no quemadas, se aprecia cómo la incidencia relativa de los incendios registrados cada año sobre uno y otro territorio presenta valores más elevados para las áreas previamente

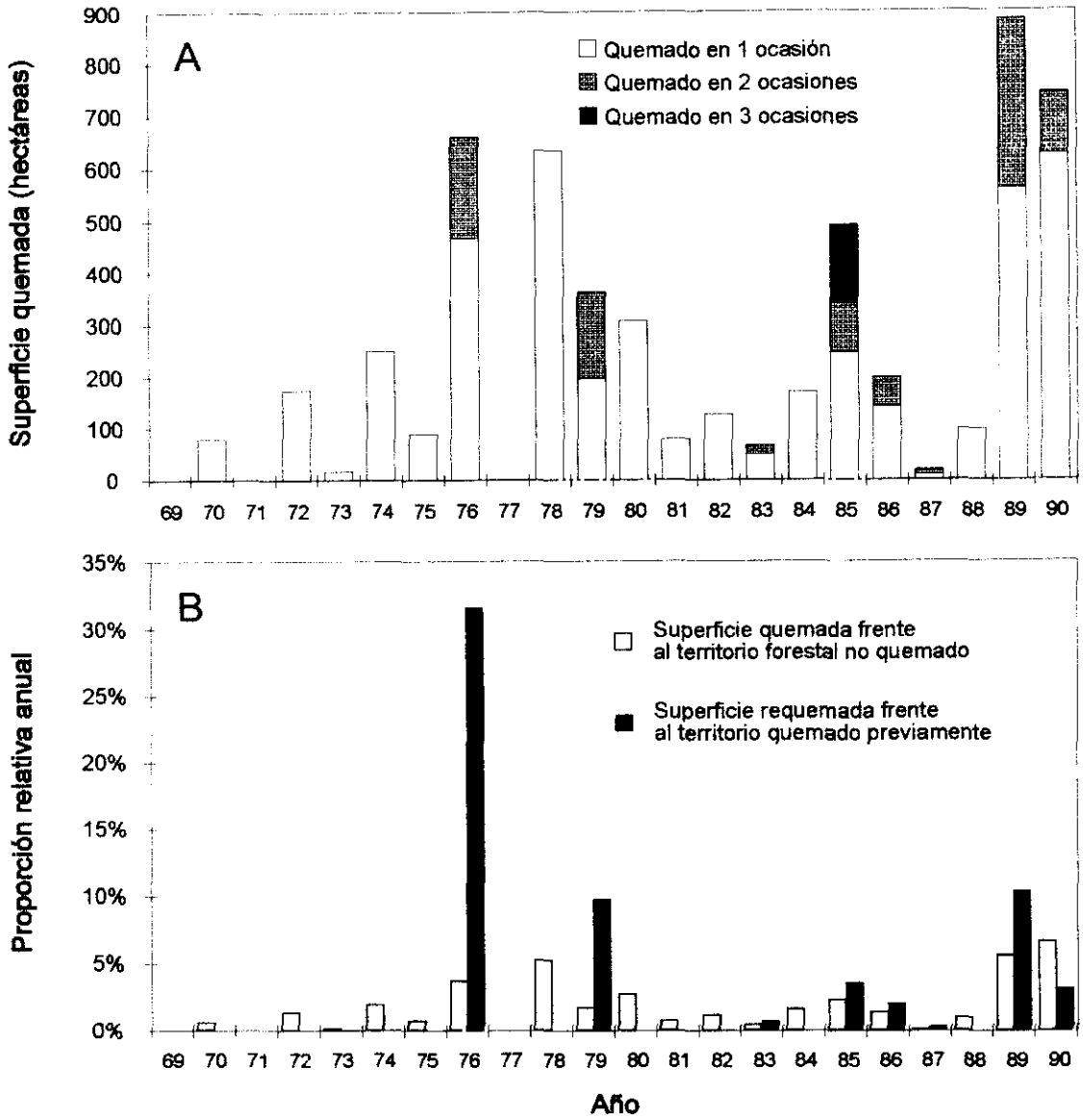


Figura 7.8. (A) Evolución de la superficie quemada anualmente desglosada en función de si los territorios afectados habían sido recorridos o no previamente por el fuego. (B) Proporción anual de la superficie quemada por primera vez en función de la superficie forestal no quemada presente en el territorio el año anterior y proporción anual de la superficie quemada más de una vez en función del territorio quemado presente el año anterior.

afectadas por incendios (Figura 7.8B). Para este periodo se destaca el año 1989 en el que los incendios registrados afectaron a un 10% de la superficie quemada previamente (hasta 1988) y a un 6% de la superficie forestal no quemada con anterioridad (al menos desde 1970).

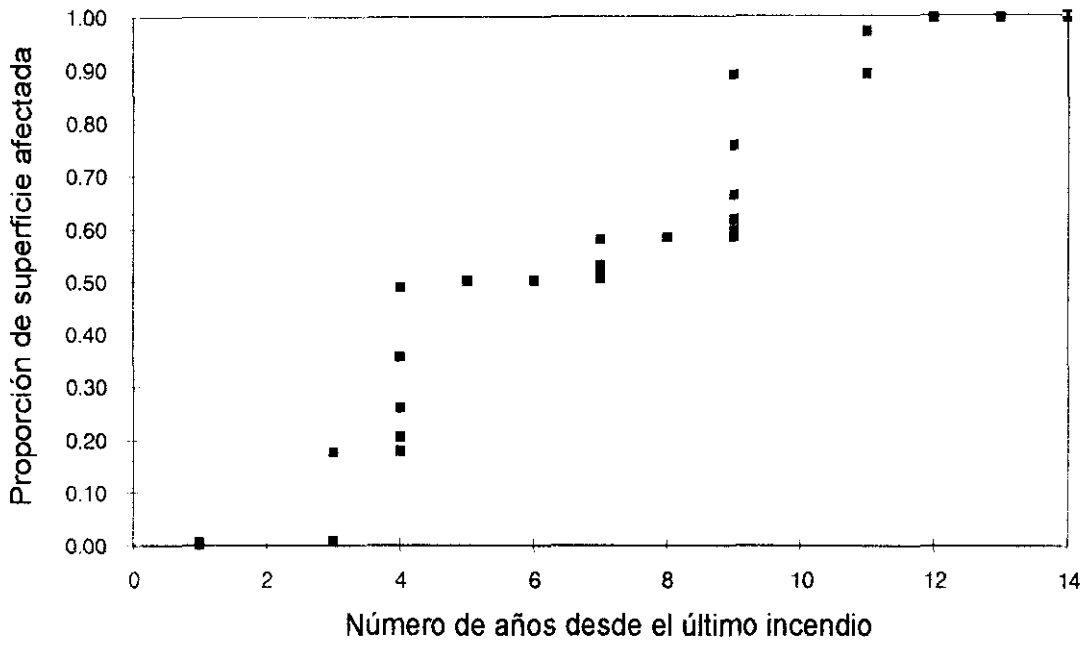


Figura 7.9. Proporción acumulada de la superficie quemada en más de una ocasión durante el periodo 1970-90 en función del número de años transcurridos desde el último incendio.

El intervalo de recurrencia medio entre incendios obtenido, para los 28 polígonos que se han visto afectados por el fuego en más de una ocasión durante el periodo analizado, ha sido de 7,2 años, con un rango de 1 a 14 años. Al ponderar el valor de cada uno de estos polígonos por su superficie el valor obtenido ha sido de 6,4 años. La proporción de superficie quemada en más de una ocasión en función de la edad de cada polígono (tiempo transcurrido desde el último incendio) se muestra en la Figura 7.9, en la que se observa que para casi un 60% de la superficie quemada en más de una ocasión habían transcurrido 7 ó menos años desde el último incendio.

El periodo de rotación obtenido para la superficie forestal considerada en este estudio, esto es, el número de años necesario para que se vea afectada por el fuego una superficie equivalente a la del territorio de referencia, tomando como base las superficies cartografiados (dado que los incendios $\geq$ 4 ha han representado un 95% de la superficie total quemada) e ignorando los solapamientos entre incendios, daría un valor de 51 años. Ajustando esta cifra y teniendo en cuenta la superficie real afectada (sin contabilizar por separado las áreas requemadas) dicho periodo aumentaría a 64 años. Por tanto, la no consideración de las áreas quemadas en más de una ocasión tendería a sobrestimar el periodo de rotación en un 21%.

ABRIR CONCLUSIONES