



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

Efectos de la recurrencia de incendios forestales en la estructura del paisaje mediterráneo y la combustibilidad asociada. Estudio de caso en montes de Sierra Morena, Andalucía

HERRERA-MACHUCA, M.A.¹, ORTEGA, M.¹, MOLINA, J.R.¹, ZUMAQUERO, R. y RODRÍGUEZ Y SILVA, F.¹

¹ Laboratorio de Incendios Forestales, Departamento Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba. Email: mherrera@uco.es, macarena.ortega@uco.es, jrmolina@uco.es, o42zutor@uco.es, ir1rosif@uco.es.

Resumen

El paisaje mediterráneo ha sido configurado y, en muchos casos, modelado por la presencia periódica del fuego. Las especies se encuentran adaptadas a este factor bajo un régimen determinado. En la actualidad, un efecto más del cambio global se puede apreciar en las variaciones de estos regímenes de incendios, lo que incide en la dinámica post-fuego de los ecosistemas forestales mediterráneos, incidiendo asimismo en su capacidad de respuesta de ante este tipo de perturbaciones. El monitoreo espacio-temporal de la recurrencia de incendios y su efecto en la vegetación constituye una herramienta de gran utilidad en la toma de decisiones en los trabajos de restauración de estos paisajes.

El análisis multitemporal del solape de incendios forestales a partir de la superposición de perímetros históricos (1987-2020) apoyado por los inventarios de campo realizados en el año 2020 permite identificar y definir escenarios en función de la recurrencia y severidad del fuego, así como diferentes categorías de paisaje en función de la estructura de la masa en la zona de estudio de Sierra Morena. En base a la evolución de los paisajes en los diferentes escenarios de recurrencia, se construyen matrices de tabulación cruzada que recogen las pérdidas y ganancias experimentadas por cada paisaje.

El análisis estadístico de los datos inventariados en campo constata la resiliencia del ecosistema mediterráneo a los incendios forestales. Incendios recurrentes de alta severidad provocan cambios sustanciales como la pérdida de arbolado y su consiguiente matorralización y el incremento de ocupación por parte de especies más inflamables. Sin embargo, la ocurrencia de incendios forestales no recurrentes y de severidad moderada no suponen cambios significativos en la estructura de la masa, pero sí benefician a la misma en cuanto a composición, aumentando la biodiversidad beta. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de la presencia del fuego de severidad moderada en el ecosistema mediterráneo y la necesidad de búsqueda de formas de gestión que así lo consideren como es el caso de las quemadas prescritas.

Palabras clave

Régimen de fuego, perturbación, resiliencia, regeneración post-fuego, dinámica de vegetación, matriz de tabulación cruzada.

1. Introducción

La ocurrencia de incendios forestales, desde tiempos inmemoriales, ha implicado la adaptación de las diferentes especies vegetales al paso del fuego (KEELY et al., 2011). Son diversas las estrategias de adaptación de las especies mediterráneas (PAUSAS, 2012; LEVERKUS et al., 2014), bien para protegerse o bien para recuperarse de dicha perturbación, mediante adaptaciones fisiológicas y morfológicas o estrategias de reproducción pirófitas. Aunque el fuego ha desarrollado un papel esencial en la configuración del paisaje mediterráneo actual como modelador del mismo (PAUSAS Y KEELEY, 2009) el cambio en la frecuencia y severidad de los grandes incendios forestales está acentuando los daños ecológicos y socioeconómicos (CHUVIECO et al., 2014). Esta tendencia ha sido manifestada para diferentes áreas en diversas latitudes, señalando, incluso, la incidencia de incendios forestales en lugares sin constancia previa. En este sentido, la teledetección

se presenta como una herramienta de gran ayuda para la identificación de zonas quemadas recurrentemente y del monitoreo de su evolución (DÍAZ-DELGADO Y RUIZ-RAMOS, 2019).

El régimen de fuego del paisaje mediterráneo está caracterizado por incendios de baja intensidad de ocurrencia periódica e incendios esporádicos de mayor severidad (VÉLEZ, 2009). Sin embargo, en los últimos años, la cuenca mediterránea ha experimentado un incremento de la recurrencia de los incendios forestales (PAUSAS Y FERNÁNDEZ; 2012), debido a los cambios socioeconómicos (cambios de usos de suelo, éxodo rural, abandono de actividades tradicionales, etc.), la acentuación de las condiciones climáticas y el paradigma de la extinción (ALODOS et al., 2004; CARDIL et al., 2014). La recurrencia es entendida en este estudio como el lapso de tiempo que transcurre entre dos eventos de fuego. La recurrencia de incendios no debe entenderse como un hecho aislado de frecuencia, sino que debe incorporar el resto de los componentes que caracterizan un régimen de fuego: intensidad, extensión o tamaño, frecuencia y estacionalidad (PAUSAS, 2012). Como ejemplo, en este trabajo se presentan los diferentes escenarios de fuegos (frecuencia y severidad) para un área piloto de Sierra Morena afectada por dos incendios forestales en menos de 30 años.

La resiliencia de la vegetación mediterránea es la capacidad de los ecosistemas para recuperar su estado natural después de una perturbación. Esa capacidad dependerá de la frecuencia y severidad de las perturbaciones (AGEE, 1998; FLATLEY et al., 2015). Un elevado régimen de perturbaciones puede alterar la dinámica del ecosistema produciendo una pérdida en la biodiversidad o un retroceso en la ocupación de ciertas especies (CHAVARDES Y DANIELS, 2016). En este sentido, una alta recurrencia de incendios forestales de alta severidad puede derivar en problemas de supervivencia para diferentes especies, a pesar de su adaptación a un régimen concreto de fuego (MOLINA et al., 2017). Además de la frecuencia y severidad de los eventos de fuego, otros parámetros como la calidad de sitio, el carácter de las especies (tolerante e intolerante a la sombra) y la estrategia reproductiva de las especies (germinadora o rebrotadora) condiciona el período de recuperación de la vegetación, e incluso la dinámica del ecosistema (MOLINA et al., 2017; PARRA Y MORENO, 2018). Algunas especies, como *Cistus ladanifer*, presentan un marcado carácter colonizador tras el paso del fuego, manteniendo un alto banco de semillas favorecido por las altas temperaturas (VALBUENA et al., 1992; DELGADO et al., 2007). Por tanto, no todas las especies se ven perjudicadas, en relación con su ocupación en el ecosistema, por este cambio de régimen de los incendios forestales. Algunas otras especies de ámbito mediterráneo responden bien a eventos de fuego de cierta periodicidad, pero de baja o moderada severidad (MOREIRA et al., 2010).

El monitoreo de la vegetación post-incendio es clave para la ayuda a la toma de decisiones en la priorización de las labores de restauración y la asignación presupuestaria. Sin embargo, generalmente, los estudios de recuperación de la vegetación se limitan a un corto período temporal, por lo que este estudio abarca un monitoreo a medio plazo. La evolución de la composición florística sigue un modelo muy similar para todas las comunidades. Durante los primeros meses, son pocas las especies presentes, sin embargo, a medida que transcurre el tiempo la diversidad aumenta, llegando a alcanzar un máximo entre el segundo y tercer año en Andalucía (DEL VALLE, 2000; ARTACHO, 2019). No obstante, es importante complementar los estudios de la vegetación con estudios del suelo y de la fauna asociada al ecosistema. La ausencia de fuego en ecosistemas conformados con un régimen natural del mismo, puede conllevar un declive en su biodiversidad, debido a la alelopatía de las especies dominantes y a un valor socioeconómico menor dado el menor potencial cinegético o ganadero de los ecosistemas. Un régimen de fuego elevado también podría perjudicar la dinámica de la vegetación y la supervivencia de algunas especies, disminuyendo su valor ecológico.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio es la identificación de los efectos de la recurrencia de incendios forestales en el paisaje mediterráneo, utilizando para ello dos variables, la severidad del fuego y el

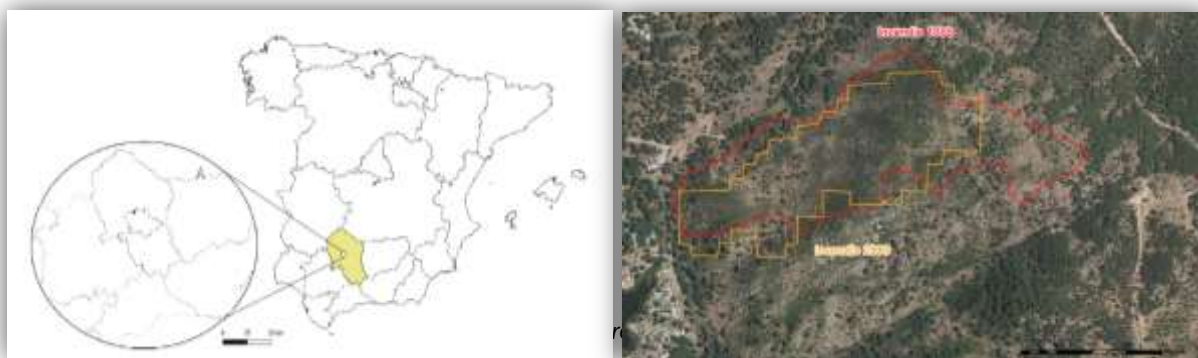
tiempo de recurrencia entre las perturbaciones. Por tanto, se requiere un análisis comparativo entre áreas testigo o sin quemar, y áreas con eventos aislados de fuego o eventos recurrentes. La consecución de este objetivo implica un:

- Análisis mediante matrices de tabulación cruzada de las pérdidas y ganancias de las diferentes tipologías de paisaje para cada escenario de fuego.
- Identificación de los cambios en la composición específica y dinámica del ecosistema para cada escenario de fuego y su consiguiente efecto sobre la combustibilidad asociada.
- Identificación de la regeneración del arbolado asociada a cada escenario de fuego.
- Identificación de la biodiversidad de especies leñosas asociada a cada escenario de fuego.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en Sierra Morena, en la provincia de Córdoba (Figura 1). Se eligió una zona afectada por incendios forestales recurrentes en base al registro histórico de incendios forestales de INFOCA desde el año 1968. La zona fue afectada por dos incendios con vector de propagación topográfico, con leve incidencia del viento local. El primer incendio se produjo en el 1988 y afectó 18,77 ha, el segundo incendio tuvo lugar en 2006 quemando 13,82 ha. Ambos incendios cuentan con superficie de solape o doblemente quemada, situada en la zona central de estudio y, que afecta, a una superficie de 11,75 ha.



Según el Mapa de Suelos de Andalucía (Junta de Andalucía), el suelo es ácido con predominio de Cambisoles. Según datos obtenidos del Modelo Digital del Terreno (resolución espacial de 5m) del Centro Nacional de Información Geográfica del Gobierno de España, el rango altitudinal de la zona de estudio es de 457m a 654m. El relieve es ondulado presentando el 67,29% de la superficie pendientes mayores del 30%. Respecto a las orientaciones, es la umbría la más representativa, suponiendo un 69,17% del territorio.

La zona de estudio presenta clima mediterráneo con período de sequía estival. La caracterización climatológica se realizó con los datos de la estación meteorológica del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) sita en Córdoba. Se estudió con especial detalle la variable precipitación (Figura 2), por la influencia que ejerce sobre la respuesta de la vegetación ante los incendios forestales.

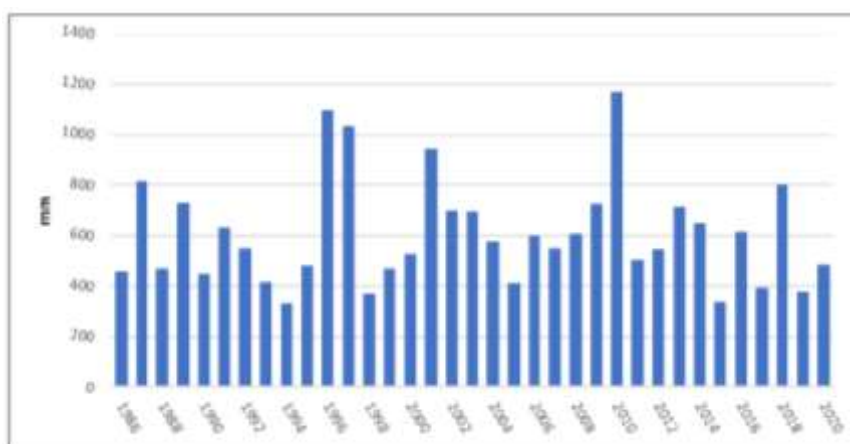


Figura 2. Evolución de la precipitación media. Fuente: elaboración propia a partir de información del SIAR.

3.2. Identificación de escenarios de recurrencia y paisajes

Las variables del régimen de incendios más influyentes en la resiliencia de las masas de Sierra Morena son la recurrencia y la severidad. Por un lado, la recurrencia se ha considerado a través del análisis del registro histórico de incendios, focalizando en áreas con solape o superposición de perímetros. Por otro lado, la severidad se ha determinado a partir de fotointerpretación e inventario de campo, identificando dos categorías: severidad moderada (sin consumo completo del combustible superficial o matorral y consumo de algunas copas) y severidad alta (consumo completo del matorral y prácticamente de la totalidad de las copas del arbolado).

La integración de las variables frecuencia y severidad del fuego permiten identificar los siguientes escenarios de recurrencia o escenarios de recurrencia de fuego para la zona de estudio (Tabla 1):

- R1: zona testigo, sin constancia de fuego en los últimos 30 años.
- R2: zona afectada por un único incendio acontecido hace menos de 15 años (año 2006).
- R3: zona afectada por un único incendio acontecido hace más de 30 años (año 1988).
- R4: zona de solape de dos incendios con recurrencia menor a 20 años (años 1988 y 2006).

Tabla 1. Caracterización de los escenarios de recurrencia en base a la severidad del fuego.

Escenario recurrencia de fuego	Severidad del fuego	
	1988	2006
R1 (testigo)	-	-
R2 (incendio 2006)	-	Moderada Alta
R3 (incendio 1988)	Moderada Alta	- -
R4 (incendios 1988 y 2006)	Moderada Alta Alta	Moderada Moderada Alta

En cada escenario de recurrencia, a través de fotointerpretación y con testado y corrección mediante inventarios de campo, se identificaron cuatro paisajes tipo (Figura 3):

- Arbolado denso con matorral. Formación arbórea compuesta por *Pinus pinea* y dominado por matorral formado por *Cistus ladanifer*, *Lavandula stoechas* y *Salvia rosmarinus*.

- Arbolado disperso con matorral. Formación arbórea compuesta por *Pinus pinea* y dominado por matorral formado por *Pistacia lentiscus*, *Cistus ladanifer* y *Quercus coccifera*.
- Matorral denso. Formación matorralizada dominada por *Viburnum tinus*, *Teucrium fruticans*, *Cistus ladanifer* y *Cistus crispus*. La altura media del matorral se encuentra en torno a 1-2 m y la cobertura se sitúa por encima del 45%.
- Matorral disperso. Formación de *Cistus albidus*, *Cistus ladanifer*, *Phillyrea angustifolia* y *Phlomis purpurea*, entre otras. La altura de la vegetación está comprendida entre 1 y 1,5 metros aproximadamente. La cobertura se estima por debajo del 45%.



Figura 3. Paisajes identificados en la zona de estudio. De arriba a abajo y de izquierda a derecha: arbolado denso con matorral, arbolado disperso, matorral denso y matorral disperso.

El monitoreo espacio temporal de estos paisajes a medio plazo permitirá el conocimiento de la dinámica y evolución de la vegetación, en base a distintos escenarios de recurrencia de incendios forestales.

3.3. Matrices de tabulación cruzada

La evolución espacio-temporal de los paisajes identificados en el área de estudio se realizó a través de la fotointerpretación de ortofotografías históricas mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). La fuente de información de la que se obtuvieron dichas imágenes fue la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). A partir de la digitalización de la superficie abarcada por cada categoría de paisaje y de las transformaciones experimentadas con el paso del tiempo, se obtienen los datos necesarios para la creación de matrices de tabulación cruzada o matrices de transición. Estas matrices permiten evaluar las pérdidas y ganancias experimentadas entre las diferentes categorías de paisaje en un intervalo de tiempo determinado. La metodología seguida para la creación de las matrices fue la propuesta por PONTIUS et al., 2004 (Tabla 2).

Tabla 2. Matriz de tabulación cruzada o de transición. Fuente: PONTIUS et al, 2004

	Time 2				Total time1	Loss
	Category 1	Category 2	Category 3	Category 4		
Time 1						
Category 1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{1+}	$P_{1+} - P_{11}$
Category 2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{2+}	$P_{2+} - P_{22}$
Category 3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}	P_{3+}	$P_{3+} - P_{33}$
Category 4	P_{41}	P_{42}	P_{43}	P_{44}	P_{+}	$P_{4+} - P_{44}$
Total time 2	P_{+1}	P_{+2}	P_{+3}	P_{+4}		
Gain	$P_{+1} - P_{11}$	$P_{+2} - P_{22}$	$P_{+3} - P_{33}$	$P_{+4} - P_{44}$		

Siendo:

- P_{ij} : proporción de paisaje que experimenta una transición, de la categoría “i” a la “j”.
- P_{jj} : proporción del paisaje que muestran persistencia de la categoría “j”.
- P_{i+} : proporción del paisaje en la categoría “i” en el tiempo 1. Es la suma de todo “j” de “ P_{ij} ”.
- P_{+j} : proporción del paisaje en la categoría “j” en el tiempo 2. Es la suma de todo “i” de “ P_{ij} ”.
- Loss: proporción del paisaje que experimenta una pérdida bruta de la categoría 1, entre el paso del tiempo 1 a 2.
- Gain: proporción de paisaje que experimenta una ganancia bruta de la categoría “j”, entre el paso del tiempo 1 a 2.

La matriz de transición aporta la información de cada tipo de paisaje en las filas para el Tiempo 2, mientras que en las columnas aporta la cantidad de cada tipo de paisaje en el Tiempo 1. La diferencia entre ambos es el cambio neto. Al existir dos perturbaciones (incendio de 1988 e incendio de 2006), se construyeron dos matrices por cada tipo de paisaje, una para evaluar los cambios acontecidos entre T1-T2 y otra para evaluar los cambios experimentados por los paisajes entre T2-T3. T1 corresponde a un tiempo previo al incendio de 1988. T2 corresponde a un tiempo posterior al incendio de 1988 y anterior al incendio de 2006 y T3 corresponde a la actualidad. Es decir, en la primera matriz, el T1 y T2 corresponde al momento en el que se compara los cambios sufridos en el paisaje antes y después del incendio del 1988. El mismo fundamento para T2 y T3 que corresponde al periodo de tiempo anterior y posterior al incendio del 2006. Por lo tanto, se evalúan los cambios sufridos por la vegetación en el período de 1986 a 2004 y otra de los períodos 2006 a 2020.

3.4. Inventario de campo

El objetivo del inventario de campo desarrollado en este estudio fue la identificación de la estructura, con un mayor detalle que la obtenida de la fotointerpretación, y la composición específica de las masas forestales objeto de estudio. Se diseñó un inventario estratificado aleatorio mediante Sistemas de Información Geográfica, considerando como estratos a los diferentes escenarios de recurrencia. El inventario utilizó parcelas circulares de 5m de radio, diferenciando en cuatro cuadrantes en base a los puntos cardinales.

El inventario de campo recopiló la siguiente información para el arbolado: diámetro a la altura del pecho, altura total, altura a la primera rama viva, diámetro de copa (medido como media de las dos proyecciones ortogonales) y presencia de pies muertos. La fracción de cabida cubierta del dosel arbóreo se calculó, dado que no se produce superposición de copas, como la sumatoria de las proyecciones circulares de las copas en una hectárea. Además, aparte de variables dasométricas, se registraron datos de regeneración natural de la masa (número de plántulas/ha).

El inventario de campo recopiló la siguiente información para el matorral: fracción de cabida cubierta, número de especies y porcentaje de ocupación y altura media por especie vegetal. Con esta información, se procedió al cálculo de indicadores de diversidad beta para cada escenario de

recurrencia. Se han utilizado los índices de Sørensen y Jaccard, a semejanza de otros trabajos dentro del proyecto VIS4FIRE (ARTACHO, 2019; ZUMAQUERO, 2021). Sørensen relaciona el número de especies compartidas con la media aritmética de las especies de dos categorías (Ecuación 1), mientras que Jaccard relaciona el número de especies compartidas con el número total de especies exclusivas (Ecuación 2) (GALLEGOS et al., 2018).

Índice de Sørensen

$$IS = \left(\frac{2 \times c}{a+b} \right) \times 100 \quad (1)$$

Índice de Jaccard

$$IJ = \left(\frac{c}{a+c+b} \right) \times 10 \quad (2)$$

a: n° de especies de cada parcela; **b:** n° de especies media de las parcelas testigo; **c:** n° de especies comunes en ambas parcelas.

El inventario de campo se realizó en el año 2020. Se compuso de 38 parcelas de muestreo repartidas por los diferentes escenarios de recurrencia de fuego (Tabla 3), mediante afijación óptima proporcional. El inventario dispuso de un error de muestreo inferior al 30% con una probabilidad fiducial del 95% para el número de pies arbóreos, de acuerdo el estándar de los inventarios de vegetación. El escenario con mayor densidad de muestreo fue el afectado, solamente, por el incendio de 1988, debido a que se trata del escenario que mayor variabilidad presentaba.

Tabla 3. Tamaño determinado por el número de columnas y el texto incluido en ellas.

Escenario de recurrencia de fuego	Superficie (ha)	% sobre superficie total	Nº parcelas inventariadas	% sobre el total de parcelas
R1 (Testigo)	8,32	29,16	10	26,31
R2 (incendio 2006)	2,05	7,19	5	13,17
R3 (incendio 1988)	6,41	22,47	13	34,21
R4 (incendios 1988 y 2006)	11,75	41,18	10	26,31

3.5. Análisis estadístico de los datos del inventario de campo

Los datos inventariados fueron tratados con el software SPSS® con el objetivo de identificar diferencias significativas en la dinámica de la vegetación post-fuego de los escenarios de recurrencia. Los análisis estadísticos de todas las variables de la dinámica del ecosistema (dasométricas, matorral, regeneración y diversidad) requirieron, en primer lugar, del estudio de la normalidad de las variables. Se utilizó el test de Shapiro-Wilk, debido a que el número de muestras es menor a 50. Para las variables con distribución normal, se realizó un test paramétrico o de análisis de la media de las varianzas (ANOVA) de cada una de las categorías comentadas con anterioridad. El test de Duncan permitirá identificar diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las diferentes categorías o combinaciones de escenarios de recurrencia y severidad del fuego. Para las variables no normales se utilizó una prueba no paramétrica o test de Wilcoxon, estableciendo una probabilidad fiducial del 90% y 95% y un nivel de significancia del 5% ($p < 0,05$) y el 10% ($p < 0,1$).

4. Resultados

4.1 Dinámica de los escenarios de fuego (matrices de tabulación cruzada)

De acuerdo con las matrices de tabulación cruzada derivadas del incendio de 1988 (Tabla 4), el balance realizado entre el T1 y el T2 (1986-2004), arroja que las parcelas afectadas por el incendio de 1988 sufren una pérdida de arbolado denso (-37,57% en R3 y -13,17% en R4) y una matorralización frente a las parcelas testigos y las que no se vieron afectadas por dicho incendio, las cuales no muestran pérdidas ni ganancias de ninguna categoría de paisaje.

Tabla 4. Resultados de las matrices de tabulación cruzada derivadas del incendio de 1988 para cada escenario de recurrencia.

Categorías de paisaje	ESCENARIO DE RECURRENCIA DE FUEGO			
	R1 (Testigo)	R2 (2006)	R3 (1988)	R4 (1988-2006)
Arbolado denso	0	0	-37,57	-13,17
Arbolado disperso con matorral	0	0	+21,75	-10,79
Matorral denso	0	0	+8,80	+26,21
Matorral disperso	0	0	+7,02	-2,24

De acuerdo con las matrices de tabulación cruzada derivadas del incendio de 2006 (Tabla 5), el balance realizado entre el T2 y el T3 (2004-2020), arroja que las parcelas afectadas únicamente por el incendio de 2006 sufren una matorralización del 23,25% frente al 13,09% que experimentan las parcelas afectadas por incendios de manera recurrente (dos incendios en menos de 20 años).

Tabla 5. Resultados de las matrices de tabulación cruzada derivadas del incendio de 2006 para cada escenario de recurrencia.

Categorías de paisaje	ESCENARIO DE RECURRENCIA DE FUEGO			
	R1 (Testigo)	R2 (2006)	R3 (1988)	R4 (1988-2006)
Arbolado denso	0	0	0	0
Arbolado disperso con matorral	0	0	0	-7,85
Matorral denso	0	+23,25	+7,02	+13,09
Matorral disperso	0	-23,25	-7,02	-5,24

4.2. Dinámica de los escenarios de fuego (análisis estadístico)

Los resultados del inventario de campo permitieron identificar como especie arbórea fundamental a *Pinus pinea*, distribuyéndose en pequeños rodales densos en estado fustal en el perímetro del incendio. Esta densidad pasa a ser rala o dispersa en el interior de la zona incendiada. La composición específica del matorral, tanto en formaciones de matorral como de sotobosque, está dominada por *Quercus ilex*, *Cistus ladanifer*, *Cistus crispus*, *Cistus albidus*, *Salvia rosmarinus*, *Genista* spp, *Arbutus unedo*, *Phillyrea* spp, *Lavandula stoechas*, *Phlomis purpurea*, *Quercus coccifera*, *Teucrium* spp, *Pistacia lentiscus*, *Myrtus communis*, *Viburnum tinus*, *Daphne gnidium*, *Pistacia terebinthus* y *Adenocarpus* spp.

Tras el análisis estadístico de los datos recabados en el inventario, los resultados más significativos obtenidos por cada tipología de paisaje han sido los siguientes:

Paisaje "Arbolado denso con matorral"

- Las mayores pérdidas de densidad de arbolado se producen en escenarios afectados por incendios de alta severidad. Sin embargo, en escenarios con incendios recurrentes de severidad moderada no se observaron diferencias significativas respecto al testigo.
- Son los escenarios de alta severidad en los que disminuyó la densidad de regenerado respecto al resto de escenarios. El escenario afectado por el incendio de 2006 en severidad moderada fue el que presenta la mayor cantidad de plántulas de pino por hectárea, muy por encima del escenario de referencia (testigo).
- La fracción de cabida cubierta de matorral experimentó un descenso considerable (43%) en el escenario con dos incendios recurrentes. El resto de los escenarios en los que se producen incendios aislados sin recurrencia, la fracción de cabida cubierta del matorral

- sufrió un incremento entre el 5% para severidades altas y el 21% para severidades moderadas.
- Los índices de diversidad beta señalaron una disminución significativa de esta variable en escenarios de incendios recurrentes aun siendo de moderada severidad. Los mayores valores de diversidad beta se observaron en las parcelas afectadas por el incendio de 2006 en severidad moderada.
 - *Viburnum tinus* disminuyó significativamente su porcentaje de ocupación en todos los escenarios de fuego respecto al testigo, a excepción del escenario quemado en 1988 en severidad moderada, donde ya recuperó valores de ocupación similares al testigo.
 - *Phillyrea angustifolia* aumentó su presencia significativamente en el escenario quemado en 2006 en alta severidad y, sensiblemente, en el escenario de fuegos recurrentes. Sin embargo, su densidad disminuyó en escenarios de fuegos aislados y de severidad moderada.
 - *Lavandula stoechas* colonizó escenarios que han experimentado incendios de alta severidad, no apareciendo en ninguno de los escenarios afectados por incendios de severidad moderada.
 - *Arbutus unedo* apareció tras perturbaciones por incendios forestales, destacando su presencia en zonas quemadas en el incendio de 2006 en severidad alta.
 - *Pistacia lentiscus* apareció en los diferentes escenarios estudiados, incrementándose considerablemente su presencia en el escenario de fuegos recurrentes de severidad moderada.
 - *Cistus ladanifer* apareció de manera muy notoria tras la ocurrencia de incendios aislados, disminuyendo ante la recurrencia de incendios.
 - *Cistus albidus* redujo significativamente su presencia ante cualquier severidad y recurrencia.
 - *Pistacia terebinthus* desapareció en el escenario de incendios recurrentes. Sin embargo, incrementó su presencia en las zonas solo quemadas en el incendio del año 1988, tanto en moderada como en alta severidad, superando en ambos casos los valores del escenario testigo.
 - *Cistus crispus* apareció tras la ocurrencia de un incendio de severidad moderada.
 - *Quercus ilex* incrementó significativamente su presencia en comparación con la zona testigo y el resto de los escenarios ante un escenario de recurrencia de incendios forestales de severidad moderada.
 - *Quercus coccifera* desapareció en escenarios de fuegos recurrentes.
 - *Myrtus communis* desapareció en todos los escenarios, salvo en el quemado en 1988 en severidad moderada, aunque sin alcanzar los valores del escenario de referencia.

Paisaje "Arbolado disperso con matorral"

- Las mayores pérdidas de densidad de arbolado se produjeron en escenarios afectados por incendios recurrentes. Sin embargo, escenarios con incendios recurrentes de severidad moderada no produjeron diferencias significativas de esta variable respecto a las parcelas testigo.
- La alta severidad impidió la regeneración del arbolado en este paisaje, no encontrándose plántulas de pino. En parcelas con incendios recurrentes de severidad moderada, la densidad del regenerado (plántulas/ha) se vio incrementada con respecto al testigo.
- La mayor biodiversidad apareció en el escenario afectado por el incendio de 1988 en severidad moderada, por encima incluso del escenario testigo. La menor biodiversidad se encontró en el escenario afectado por el incendio de 2006 en severidad moderada.
- La fracción de cabida cubierta del matorral aumentó considerablemente en escenarios de un solo incendio en 2006 en moderada severidad y en escenarios recurrentes con presencia de, al menos, uno de ellos en alta severidad.

- *Pistacia lentiscus* no apareció en incendios recurrentes, con existencia de al menos un evento de fuego en alta severidad. Sin embargo, si dispuso de una buena ocupación en el escenario de 2006 en severidad moderada.
- *Quercus ilex* redujo significativamente su presencia ante un escenario de recurrencia de incendios forestales de alta severidad. Sin embargo, su porcentaje de ocupación creció considerablemente en el escenario de fuegos recurrentes de severidad moderada.
- *Quercus coccifera* redujo su presencia ante escenarios de recurrencia de incendios forestales, desapareciendo en el que acontecen dos incendios de alta severidad. En los escenarios de un único incendio de moderada severidad, el porcentaje de ocupación de esta especie disminuyó respecto a la testigo. En el escenario quemado en 1988 en moderada severidad se recuperaron los valores iniciales de ocupación de esta especie.
- *Phillyrea angustifolia* apareció tras eventos de fuego, con una especial presencia en parcelas de fuegos recurrentes de alta severidad.
- *Lavandula stoechas* incrementó significativamente su presencia ante un escenario de recurrencia de un incendio de alta y otro de moderada severidad. Sin embargo, desapareció en el escenario de dos fuegos recurrentes de alta severidad.
- *Pistacia terebinthus* incrementó su ocupación tras perturbaciones por incendios forestales de severidad moderada acontecidos en 1988. No se registró su presencia tras el incendio de 2006 en severidad moderada ni en escenarios de dos incendios recurrentes de alta severidad. Sí se registró en escenarios de incendios recurrentes en severidad moderada.
- *Cistus albidus* apareció en gran medida en el escenario de recurrencia de dos incendios de moderada severidad.
- *Viburnum tinus* incrementó su presencia notablemente en el escenario del incendio de 1988 en severidad moderada. También incrementó su porcentaje de ocupación respecto a la referencia, aunque en menor medida que en el escenario anterior, en el escenario de dos incendios recurrentes en moderada severidad. Sin embargo, desapareció tras el incendio de 2006 y en el escenario de dos incendios recurrentes de alta severidad.

Paisaje “Matorral denso”

- Solo aparecieron plántulas de regenerado de pino en el escenario de dos fuegos recurrentes de alta severidad, pero en menor cantidad que en las parcelas testigos.
- La recurrencia de incendios aumentó el número de especies de matorral respecto a la parcela testigo, alcanzándose la mayor biodiversidad en el escenario de dos fuegos recurrentes de alta severidad.
- La fracción de cabida cubierta del matorral aumentó en todos los escenarios de fuego, especialmente, en el escenario de dos fuegos de alta severidad recurrentes.
- *Quercus ilex* disminuyó considerablemente su porcentaje de ocupación en escenarios de incendios recurrentes con al menos uno de ellos de severidad alta.
- *Quercus coccifera* incrementó significativamente su presencia en el escenario del incendio de 1988 en alta severidad. Por el contrario, disminuyó su presencia en dos incendios recurrentes de alta severidad.
- *Phillyrea angustifolia* incrementó muy significativamente su presencia en el escenario de dos incendios recurrentes, el primero en alta y el segundo en moderada severidad.
- *Pistacia lentiscus* desapareció en todos los escenarios con la ocurrencia de incendios en alta severidad.
- *Cistus ladanifer* incrementó notablemente su presencia en el escenario de dos incendios recurrentes en alta severidad.
- *Lavandula stoechas* incrementó su presencia en escenarios de fuegos recurrentes, independientemente de la severidad.
- *Pistacia terebinthus* incrementó su presencia en todos los escenarios de fuego.
- *Viburnum tinus* incrementó su presencia con escenarios recurrentes, principalmente con la ocurrencia de un incendio de severidad alta y otro de severidad moderada.

Paisaje “Matorral disperso”

- La regeneración de pino se vio afectada negativamente por la recurrencia de incendios con alta severidad.
- Se observó un mayor número de especies en la parcela testigo que en el escenario de recurrencia de fuegos con un incendio en alta severidad.
- La fracción de cabida cubierta del matorral se vio reducida por la recurrencia de incendios forestales, siendo uno de ellos de alta severidad.
- *Phillyrea angustifolia* no presentó diferencias significativas entre el escenario testigo y el de recurrencia estudiado (un incendio de alta severidad).
- *Viburnum tinus*, *Cistus albidus* y *Phlomis purpurea* aparecieron en el escenario de recurrencia de un incendio de alta severidad, pero con una pequeña ocupación.
- *Myrtus communis* apareció, en mayor medida, en el escenario de recurrencia de un incendio de alta severidad.
- *Pistacia lentiscus* aumentó notablemente su porcentaje de ocupación en el escenario de recurrencia con un incendio de alta severidad.
- *Quercus ilex* redujo significativamente su presencia en el escenario de recurrencia de incendios con severidad alta.
- *Quercus coccifera* desapareció en el escenario de recurrencia de incendios con severidad alta.

5. Discusión

La respuesta de la vegetación ante la perturbación que supone un incendio forestal está influida por una gran cantidad de variables y factores (KEELEY et al., 2011). Por un lado, en las propias de la especie y sus estrategias reproductivas (PAUSAS, 2012) y, por otro lado, una serie de variables externas como las topográficas, edáficas, meteorológicas, del régimen de fuego y variables estructurales de la masa (TESSLER et al., 2016). El monitoreo de la dinámica de la vegetación, en base a los escenarios de fuego identificados en el área de estudio, reflejó cambios en la estructura de la masa y su composición específica, tal como ya se había sido señalado en estudios preliminares en Sierra Morena (ARTACHO, 2019; ZUMAQUERO, 2021). Dada la pequeña superficie de muestreo, se rechazó la hipótesis de que existieran diferencias significativas entre escenarios de recurrencia en base a parámetros edafológicos y topográficos. Respecto a las condiciones meteorológicas, se estudió en detalle la posible influencia de la precipitación, por ser la variable de mayor importancia en ambiente mediterráneo (PARRA Y MORENO, 2018). El estudio temporal de la precipitación anual en el área de estudio muestra que en el año tras el incendio de 1988 la precipitación anual superó la media histórica, sin embargo, en los años posteriores, desde 1990 a 1995 transcurrieron años de sequía en los que la media de la precipitación anual se encontró por debajo de la media histórica de la zona. Por el contrario, tras el incendio de 2006, acontecieron cinco años con precipitaciones por encima de la media, especialmente el quinto año que duplicó ese valor. La influencia de esta variabilidad meteorológica del clima mediterráneo se puede apreciar en nuestros resultados en el grado de regeneración natural tras un único evento de moderada severidad.

Los cambios socioeconómicos, el cambio climático y el éxodo rural han promovido un cambio en el régimen de fuego, principalmente frecuencia y severidad, a nivel mundial (PAUSAS Y FERNÁNDEZ-MUÑOZ, 2012; FLATLEY et al., 2015). El tiempo desde la perturbación y la severidad del fuego se presentaron como las variables de mayor importancia en el monitoreo de la evolución de la vegetación, tal como reflejaron otros estudios en diferentes latitudes (CHAVARDES Y DANIELS, 2016). Es necesario un monitoreo a medio-plazo para identificar la verdadera afección de la composición y dinámica de cada paisaje forestal, dada la alta adaptación de la vegetación mediterránea al paso del fuego (PAUSAS Y FERNÁNDEZ-MUÑOZ, 2012). La recurrencia de incendios forestales implica un mayor grado de destrucción de los bancos de semillas, en los que basan sus

estrategias de protección o recuperación diferentes especies. Aunque algunas especies en el área de estudio presentan un banco de semillas con gran adaptación a eventos recurrentes, como sucede con *Cistus ladanifer* (VALBUENA et al., 1992; DELGADO et al., 2008), algunas otras, como *Viburnum tinus* y *Myrtus communis*, señalaron un retroceso considerable de su ocupación ante eventos recurrentes de fuego. Este hecho ya había sido señalado para otras especies dado su carácter, su estrategia reproductiva y la puesta en luz por la destrucción del dosel arbóreo (MOLINA et al., 2017).

El análisis del escenario testigo (en ausencia de fuego) ilustra la dinámica natural de los diferentes paisajes sin la ocurrencia de incendios forestales. Los paisajes arbolados permanecen inalterables en el tiempo sin producirse pérdida o ganancia de esta categoría. Sin embargo, el arbolado denso es el paisaje más alterado por la ocurrencia de incendios forestales, viéndose significativamente reducida su superficie. La recuperación de la vegetación arbórea requiere de la madurez de la masa en el momento del incendio y de un período más amplio de tiempo para su recuperación (AGEE, 1998). Los incendios forestales favorecen la regeneración del arbolado en masas de pino piñonero (GALLEGOS et al., 2003), especie arbórea fundamental del área de estudio. Se trata de una especie pirófito, con buena capacidad de germinación post-fuego por la apertura de las piñas debido al calor. Las masas arboladas en el año 1988 se encontrarían en estado latizal, por lo que en la mayor parte del área incendiada los pies arbóreos no dispondrían de semilla viable para la regeneración, provocando su conversión a otro tipo de paisajes. Dado el estado fustal maduro de la masa arbórea en el año 2006, se constata una buena regeneración tras el incendio de ese año. Los incendios forestales recurrentes conducen a una matorralización de las masas arbóreas, dada la pérdida de su densidad y la puesta en luz del matorral (ALODOS et al., 2004). La recurrencia de eventos de fuego en 20 años ha provocado una alta matorralización del área de estudio, a excepción del paisaje arbolado denso con matorral, donde la recurrencia de incendios forestales en severidad moderada disminuyó la fracción de cabida cubierta del matorral e incrementó la regeneración natural del pino piñonero.

El paisaje de matorral mediterráneo presenta una alta resiliencia o adaptación al fuego (PAUSAS Y KEELEY, 2009; PAUSAS, 2012), tal como se ha observado en este estudio a través de las evidencias de que 32 años después de un incendio de severidad moderada existen especies (*Quercus coccifera*) que recuperan los porcentajes de ocupación de las parcelas testigos. La teledetección se presenta como una buena herramienta para el monitoreo de la recuperación de la vegetación matorralizada (DÍAZ-DELGADO Y RUIZ-RAMOS, 2019), si bien requiere de un inventario complementario de campo para conocer la composición y ocupación de las especies. Los índices de diversidad beta se presentan como un sencillo indicador para la identificación de los efectos de un evento de fuego o varios eventos de fuego en el nivel de biodiversidad de los diferentes paisajes.

Este estudio ha identificado cambios en la composición específica de los paisajes forestales, con la consiguiente influencia sobre la combustibilidad. Eventos aislados de fuego a largo plazo (régimen de fuego natural mediterráneo) benefician la presencia de mayor número de especies frente a zonas sin quemar (DEL VALLE, 2000). La recurrencia de incendios solo incrementa la biodiversidad en el paisaje de matorral denso, debido a la apertura y generación de huecos. La mayor biodiversidad fue registrada en escenarios quemados hace 32 años en severidad moderada sobre el resto de los escenarios, incluso el escenario testigo. Esto se puede relacionar con el hecho de que existen especies (*Pistacia terebinthus*, *Cistus crispus*, *Myrtus communis* y *Viburnum tinus*) que necesitan de más tiempo para colonizar un territorio tras una perturbación mayor. Si el tiempo que transcurre desde la perturbación es menor (14 años), la diversidad beta es mucho menor pues no aún no se ha observado la presencia de estas especies.

Dentro de las especies de *Quercus* spp., se puede constatar un incremento en la ocupación de *Quercus ilex* en escenarios con incendios recurrentes de severidad moderada. Sin embargo, con incendios recurrentes de alta severidad, su ocupación disminuye en favor de otras especies de mayor poder de colonización (LEVERKUS et al., 2014), entre las que destacan algunas arbustivas que se señalan en líneas posteriores. Es decir, los eventos de fuego de alta intensidad afectan negativamente a esta especie. Una mayor presencia de esta especie se traduce en un incremento

de la inflamabilidad del paisaje, debido a que *Quercus ilex* está considerada como una especie muy inflamable durante casi todo el año (HERNANDO, 2009). Por su parte, *Quercus coccifera* se ve afectada negativamente por la recurrencia de incendios de alta severidad, a pesar de poseer las dos estrategias reproductivas (PAUSAS, 2012). Finalmente, especies como *Phillyrea angustifolia*, *Cistus ladanifer* y *Lavandula stoechas* toleran muy bien escenarios de recurrencia de eventos de alta severidad. Estas especies están consideradas como muy inflamables durante casi todo el año (HERNANDO, 2009), por lo que su mayor ocupación del paisaje conlleva a un incremento de la combustibilidad de este.

6. Conclusiones

La propuesta metodológica de este trabajo permite una comparación objetiva de la respuesta de las masas forestales al fuego en diferentes escenarios de recurrencia. Se observan diferencias significativas en el retroceso de las diferentes tipologías de paisaje en base al escenario de recurrencia de fuego analizado. En este sentido, el paisaje forestal más alterado por eventos recurrentes de fuego de alta severidad es el de los bosques densos, tendiendo a una homogeneización del paisaje, a modo de matorralización. Este fenómeno se acentúa en pinares en estado latizal o condición inmadura, que imposibilita su regeneración natural.

La ocurrencia de incendios forestales modifica la estructura y composición específica de los diferentes paisajes de Sierra Morena influyendo, por ello, en la combustibilidad asociada. Mientras la ocurrencia de un único evento de fuego en masas arboladas densas ha incrementado la biodiversidad de especies leñosas a medio plazo, la ocurrencia de dos eventos la ha disminuido. En los matorrales mediterráneos, la recurrencia de incendios promueve cambios en la ocupación de las especies, pero no en el nivel de biodiversidad a medio plazo. Por tanto, un régimen de fuego de severidad moderada no recurrente podría ser beneficioso para la diversidad de los paisajes mediterráneos.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado mediante los proyectos VIS4FIRE (RTA2017-00042-C05-01) del ministerio de Ciencia e Innovación y los proyectos de la Unión Europea CILIFO (POCTEP-0753_CILIFO_5_E), FIREPOCTEP (POCTEP-0756_FIREPOCTEP_6_E) y FirEURisk (H2020-LC-CLA-2020-101003890).

8. Bibliografía

AGEE, J.K.; 1998. Fire and pine ecosystems. En: RICHARDSON, D.M. (eds.): Ecology and Biogeography of Pinus. pp 193–218. Cambridge University Press. Cambridge.

ALODOS, C.; PUEYO, Y.; BARRANTES, O.; ESCÓS, J.; GINER, L.; ROBLES, A.B.; 2004. Variations in landscape patterns and vegetation cover between 1957 and 1994 in a semiarid Mediterranean ecosystem. Landscape Ecol 19, 543–559.

ARTACHO J.M.; 2019. Dinámica de la vegetación post-fuego en condiciones de alta intensidad en el monte público “Los Boquerones” (T.M: Villaviciosa de Córdoba). Trabajo Final de Máster. Universidad de Córdoba. 71 pp. Córdoba.

CARDIL, A.; MOLINA, D.; KOBZIAR, L.N.; 2014. Extreme temperature days and their potential impacts on southern Europe. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 14, 3005–3014.

CHAVARDES, R.; DANIELS, L.D.; 2016. Altered mixed-severity fire regime has homogenised montane forests of Jasper National Park. *Int. J. Wildland Fire* 25(4), 433–444.

CHUVIECO, E.; MARTÍNEZ, S.; ROMÁN, M.V.; HANTSON, S.; PETTINARI, M.L.; 2014. Integration of ecological and socio-economic factors to assess global vulnerability to wildfire. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 23, 245–258.

DELGADO, J.A., SERRANO, J.M., LÓPEZ, F.; ACOSTA, F.J.; 2008. Seed size and seed germination in the Mediterranean fire-prone shrub *Cistus ladanifer*. *Plant Ecol.* 197, 269–276.

DEL VALLE, G.; 2000. Estudio de los procesos de regeneración post-incendio en distintos tipos de vegetación de Andalucía. Proyecto Final de Carrera. Universidad de Córdoba. 234 pp. Córdoba.

DIAZ-DELGADO R.; RUIZ-RAMOS, J.; 2019. La Teledetección en la Caracterización del Régimen de Incendios y de los Efectos Sobre la Vegetación. En: GARCÍA-NOVO, F.; CASAL, M., PAUSAS, J., *Ecología de la regeneración de zonas incendiadas*.

FLATLEY, W.; LAFON, C.W.; GRISSINO-MAYER, H.; LAFOREST, L.; 2015. Changing fire regimes and old-growth forest succession along a topographic gradient in the Great Smoky Mountains. *For. Ecol. Manage.* 350, 96–106.

GALLEGOS A.; GONZÁLEZ G.A.; CABRERA, R.; MARCELLI, C.; HERNÁNDEZ E.; 2018. Efecto de la recurrencia de incendios forestales en la diversidad arbórea. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(24), 110-125.

GALLEGOS V., NAVARRO R. FERNÁNDEZ P., DEL VALLE G., 2003. Postfire Regeneration in *Pinus pinea* L. and *Pinus pinaster* Aiton in Andalucía (Spain). *Environ. Manage.* 31, 86-99.

HERNANDO, C.; 2009. Combustibles forestales: inflamabilidad. En: VÉLEZ, R. (eds); *La Defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. McGraw-Hill. pp. 123–130. Madrid.

KEELEY, J.E.; PAUSAS, J.G.; RUNDEL, P.W.; BOND, W.J.; BRADSTOCK, R.A.; 2011. Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits. *Trends Plant Sci.* 16(8), 406–411.

LEVERKUS, A.; CASTRO GUTIÉRREZ, J.; REY BENAYAS, J.; 2014. Regeneración post-incendio de la encina en pinares de repoblación mediterráneos. *Ecosistemas* 23(2), 48-54.

MOLINA, J.R.; MORENO, N.; MORENO, R.; 2017. Influence of fire regime on forest structure and restoration of a native forest type in the southern Andean Range. *Ecol. Eng.* 102, 390–396.

MOREIRA, B.; TORMO, J.; ESTRELLES, E.; PAUSAS, J.G.; 2010. Disentangling the role of heat and smoke as germination cues in Mediterranean Basin flora. *Ann. Bot.* 105, 627–635.

PARRA, A.; MORENO, J. M.; 2018. Drought differentially affects the post-fire dynamics of seeders and resprouters in a Mediterranean shrubland. *Sci. Total Environ.* 626, 1219–1229.

PAUSAS, J.; KEELEY, J.E.; 2009. A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life, *BioScience* 59(7), 593–601.

PAUSAS, J.; 2012. ¿Qué sabemos de? Incendios Forestales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Caratava N°32. 120 pp. Madrid.

PAUSAS, J.G.; FERNÁNDEZ-MUÑOZ, S.; 2012. Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: From fuel-limited to drought-driven fire regime. *Clim. Chang.* 110, 215–226.

PONTIUS, R.G.; SHUSAS, E.; MCEACHERN, M.; 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agric., Ecosyst. and Environ.* 101(2-3), 251-268.

TESSLER, N.; WITTENBERG, L.; GREENBAUM, N.; 2016. Vegetation cover and species richness after recurrent forest fires in the Eastern Mediterranean ecosystem of Mount Carmel, Israel. *Sci. Total Environ.* 572, 1395–1402.

VALBUENA, L.; ALONSO, I.; TÁRREGA, R.; LUIS, E.; 1992. Influencia del calor y del aclarado sobre la germinación de *Cistus laurifolius* y *Cistus ladanifer*. *Pirineos*, 140, 109-118.

VÉLEZ, R.; 2009. La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias. McGraw Hill. 1320 pp. Madrid.

ZUMAQUERO, R.; 2021. Resiliencia de la vegetación mediterránea frente a diferentes regímenes de incendios forestales. Estudio en Sierra Morena (Cerro de Pedro López, Córdoba). Trabajo Final de Grado. Universidad de Córdoba. 62 pp. Córdoba.