Aproximación Metodológica Para la Evaluación del Impacto Económico de los Incendios Forestales, Mediante el Uso de Teledetección Espacial, Aplicación Mediante el Uso de Imágenes Modis[1]

Francisco Rodríguez y Silva[1], Juan Ramón Molina Martínez[2], y Miguel Castillo Soto[2]

Resumen

La evaluación de las áreas afectadas por impacto de los incendios forestales, requiere de estudios completos que cubren una amplia gama de análisis. Desde el punto de vista económico, es realmente importante disponer de la evaluación en términos monetarios de la superficie afectada. La determinación del grado de pérdida en el valor de los recursos naturales, tanto de los que ostenta un carácter tangible, como los caracterizado como intangibles, permite llegar a conocer el valor residual remanente tras el paso del incendio, es decir, posibilita la determinación del "cambio neto en el valor de los recursos". Si bien la importancia del análisis económico, es indiscutible en el proceso de planificación de las diferentes acciones de restauración postfuego, la determinación del cambio neto en el valor de los recursos, se vuelve compleja cuando las dimensiones de la superficie afectada, hace inviable el levantamiento de la información, en parte por los costes que puede llegar a generar la captura de la información y en parte por el tiempo que transcurrirá sin disponer la valoración final. Cuando se dispone del conjunto de algoritmos que permite la valoración inicial y la correspondiente depreciación por impacto del incendio de los recursos existentes, la evaluación puede ser realizada de inmediato con la ayuda de un sistema de información geográfico y de la correspondiente "matriz de depreciación por impacto del fuego" La posibilidad de incorporar el tratamiento de imágenes de satélite, a la evaluación económica de los daños y perjuicios, brinda la oportunidad de identificar con mayor precisión la delimitación de las áreas afectadas en función del "índice normalizado de vegetación". El análisis e interpretación de imágenes MODIS, de forma combinada con la intensidad

[1] Una versión abreviada de este manuscrito fue presentado en el IV Simposio Internacional sobre Políticas, Planificación, y Economía de Incendios Forestales: Cambio Climático Incendios Forestales, 5-11 noviembre 2012, Ciudad de México, México.

[2] Profesor y Director del Laboratorio de Defensa contra Incendios Forestales. Departamento de Ingeniería Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes. Universidad de Córdoba, Edificio Leonardo da Vinci. Campus de Rabanales. 14071 Córdoba España. Correo electrónico: ir1rosif@gmail.com.

[2] Profesor, Laboratorio de Incendios Forestales. Departamento de Manejo de los Recursos Forestales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago. Chile

energética emitida por la propagación del fuego, puede ser integrada en modelos econométricos con el fin de obtener de manera referenciada geográficamente, el valor económico por hectárea resultado de la afectación por incendio forestal. En el presente trabajo se detalla la metodología seguida, así como resultados obtenidos y validados en un conjunto de incendios forestales acaecidos en diferentes áreas geográficas.

Palabras clave: índices vegetación, ratio de depreciación, vulnerabilidad económica

Introducción

Los incendios forestales constituyen unos de los mayores problemas medioambientales (Moyano y Jiménez 2005). A pesar de que el fuego ha sido utilizado de antaño en la roturación agrícola y la creación de pastizales con el fin del aprovechamiento ganadero (Kenneth 1962), los cambios socioeconómicos han conducido a un abandono de los aprovechamientos tradicionales. Este abandono se traduce en una mayor acumulación de matorral (Pérez 1990; Rodríguez y Silva y Molina 2010). Circunstancia que acompañada de la acentuación de las condiciones climatológicas (Piñol y otros 1998), han provocado un incremento en la virulencia de los incendios forestales, y en consecuencia, un aumento de los daños provocados por el fuego sobre los recursos naturales y el medio circundante.

Las valoraciones de los recursos naturales tienden a minorizar el valor real del bosque (Constanza y otros 1997). A diferencia de la actividad económica tradicional, el medio forestal se caracteriza por la extraordinaria relevancia de las externalidades que comportan perjuicios o beneficios a terceros de considerable magnitud. Desde el punto de vista socioeconómico, es necesario plasmar todos los recursos naturales en términos monetarios. La valoración de daños y perjuicios provocados por los incendios forestales requiere del estudio individualizado de cada uno de los recursos (tangibles e intangibles) y el cambio del valor neto de los mismos en relación a la severidad del fuego y a la resiliencia del ecosistema (Molina y otros 2009).

El reconocimiento y valoración de los recursos naturales es fundamental para la planificación espacio-temporal de las labores preventivas y de restauración post-fuego (Molina 2008). La incorporación del concepto de vulnerabilidad extiende el estudio más allá de un trabajo de valoración económica, integrando dos conceptos, por un lado el valor del recurso y por otro el comportamiento del fuego. La integración de ambos conceptos se realiza mediante una matriz de ratios de depreciación en base a la intensidad de las llamas, denominada “matriz de depreciación” (Molina y otros 2011; Rodríguez y Silva y otros 2012).

Numerosos estudios han señalado el potencial de la teledetección en el campo de los incendios forestales (Chuvieco y otros 2005). La incorporación de imágenes de

satélite a la evaluación económica proporciona de forma novedosa, una herramienta de indudable interés para la identificación de forma precisa del área afectada por las llamas. La ventaja del uso imágenes de satélite MODIS, radica en la disponibilidad de información a tiempo prácticamente real y a coste cero. La diferencia entre el valor de los índices de vegetación antes y después del paso de las llamas puede ser integrada de forma geo-referenciada con la intensidad energética emitida por las llamas, obteniéndose de forma indirecta las pérdidas económicas por unidad de superficie (Rodríguez y Silva y otros 2009).

El modelo de vulnerabilidad socioeconómica se ha realizado mediante la configuración de un algoritmo matemático asociado a un Sistema de Información Geográfico (SIG) facilitando la elaboración de cartografía de seguimiento espacio-temporal, tanto a nivel de recurso individual como a nivel de la vulnerabilidad integral del ecosistema. La automatización del cálculo y gestión mediante SIG se está realizando bajo el marco del proyecto INFOCOPAS (RTA2009-00153-C03-03) financiado por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), a fin de alcanzar de forma versátil un conocimiento geo-referenciado a tiempo prácticamente real de la vulnerabilidad del sistema forestal frente a incendios forestales.

Metodología

La evaluación económica de los daños provocados por el paso de las llamas mediante imágenes MODIS ha sido realizada para 5 grandes incendios ocurridos en Andalucía: Aldeaquemada (2004), Minas de Río Tinto (2004), Alajar (2006), Cerro Catena (2009) y Cerro Vértice (2011). Este grupo de incendios proporciona un amplio abanico de ecosistemas forestales y niveles de afectación. La evaluación del impacto económico de un gran incendio forestal requiere de las siguientes fases de análisis y desarrollo:

a) Valoración económica de los recursos naturales
b) Identificación espacial de los diferentes niveles de afectación
c) Identificación del cambio neto en el valor de los recursos
d) Valoración económica de los daños y perjuicios ocasionados por el paso del fuego

Valoración económica de los recursos naturales

La valoración económica de los recursos naturales debe incorporar tres tipos de recursos: recursos tangibles, servicios ambientales y bienes paisajísticos. La valoración de los recursos tangibles incluye productos madereros y productos no madereros. El procedimiento metodológico para la valoración del impacto sobre el

recurso maderero se basa en un algoritmo integrador de las herramientas de valoración, que incluyen tanto la procedencia de origen natural como artificial del arbolado (Rodríguez y Silva y otros 2012). La valoración de los recursos no madereros se fundamenta en las expresiones del Manual de Valoración de Pérdidas y Estimación del Impacto Ambiental por Incendios Forestales (Martínez Ruíz 2000). La evaluación del impacto sobre el recurso cinegético se realizará a través de la adaptación propuesta en Zamora y otros 2010.

La valoración de los servicios ambientales incluye tres recursos: fijación de carbono, control erosivo y biodiversidad faunística. La valoración de la fijación de carbono comprende tanto la cantidad fijada en el momento del incendio como la cantidad sin fijar a partir de dicho momento, y en consecuencia, requiere del volumen con corteza, biomasa aérea e incremento anual (Tabla 1). La cantidad de carbono correspondiente a la biomasa seca se estima en el 50%. El control de la erosión será expresado en renta económica pérdida en base a la cantidad potencial de suelo perdido por unidad de superficie. La expresión utilizada para la valoración (Tabla 1) incorpora un sumando en relación con las pérdidas sufridas durante las primeras lluvias (suelo desnudo) y un segundo sumando que incluye las pérdidas de suelo progresivas hasta la recuperación de una vegetación con similar protección a la quemada (Molina y otros 2009). La valoración de la biodiversidad faunística o de especies singulares se realiza mediante el coste de los programas de recuperación de las especies, o en caso de no disponer de programa específico, mediante el método de la valoración contingente (Molina 2008).

Identificación espacial de los diferentes niveles de afectación

A modo de ejemplo, en este trabajo se aborda la aplicación metodológica para el incendio de Cerro Catena. Este incendio afectó más de 200 ha, principalmente de bosques de *Pinus pinaster* con un sotobosque semi-denso dominado por *Rosmarinus officinalis* y *Juniperus oxycedrus*. La topografía es abrupta con un desnivel de 960 a 1200 msnm, favoreciendo ello, la propagación virulenta de las llamas. El incendio se originó bajo la influencia meteorológica caracterizada por una temperatura de 26ºC, una humedad relativa de 16% y una velocidad del viento de 12,5 km/h.

La identificación espacial de los diferentes niveles de afectación se realizó utilizando imágenes MODIS, (Terra y Aqua), para una fecha previa (6 de septiembre) y posterior al incendio (22 de septiembre). Para ambas fechas se adquirieron las imágenes del Servidor LP DAAC del USGS (https://lpdaac.usgs.gov/get_data/data_pool) administrado por la NASA. La preparación de las imágenes requirió de la transformación de Datum Sinusoidal (original de las imágenes) al sistema European Datum 1950 Zona 30N, efectuando la

sobreposición de las imágenes con el perímetro del incendio en formato vectorial.

***Tabla 1**—Formulaciones matemáticas utilizadas para la valoración económica*

Recurso	Fórmula	Estado del recurso	Fuente
Maderero	$V_{mad} = (1,7*E*B)/(E+0,85*B)$	Maduro e inmaduro	Rodríguez y Silva y otros 2012
	$E = C_0*p\ [i^e + g(i^e -1)] + A*(i^e - 1)$	Inmaduro	
	$E = (C_{0/z}*t\ [i^e + g(i^e -1)] + (C_0/z)*0,5*(i^e - 1)$	Latizal	
	$E = [P*V - P_1*V_1] + P*V\ [(i^{(T-e)} - 1)/(i^{(T-e)})]$	Fustal	
	$B = [(V*P*1,025^n)/1,04^n]*[1-(1,025/1,04)^e]*[1 + X*h*p]$	Inmaduro	
	$B = V*h*t[R*P + (1 - R)*P_1]$	Maduro	
Aprovechamiento de leñas	$V_{leñas} = P_x*R_x*[((1+i)^n - 1)/(i*(1+i)^n]$	Maduro	Martínez 2000; Molina y otros 2011
Cinegético	$V_{cin} = P_x*R_x*[(1+i)^n - 1)/(i*(1+i)^n] + S$	Coto de caza	Zamora y otros 2010
Fijación de carbono	$V_{carb} = CF*PM + IF*PM*RC*[((1+i)^{T-e} - 1)/(i*(1+i)^{T-e}]$	Masa arbolada	Molina 2008;
Control de la erosión	$V_{eros} = R_1*P_1 + R_2*P_2\ [((1+i)^n - 1)/(i(1+i)^n)]$	-	Molina y otros 2009
Biodiversidad faunística; Recurso paisajístico; Recurso ocio y recreo; Recurso no uso	$V_{biod/pai/oci/nouso} = Rx*[((1+i)^n - 1)/(i*(1+i)^n]$	Presencia especies singulares	Molina 2008

donde "E" es la valoración maderera en base al planteamiento tradicional español (€/ha), "B" es la valoración maderera adaptada del Modelo Americano (€/ha), "Co" es el coste de repoblación de una hectárea de terreno (€/ha), "p" es el porcentaje de la masa afectada por el fuego, "i" es el tanto por uno de interés anual, "g" es anualidad dependiente del turno de la especie, "A" es el valor de una hectárea de suelo sin arbolado (€/ha), "e" es la edad estimada de la masa en el momento del incendio, "V" es el volumen de madera expresado en m^3/ha, "P" es el precio del m^3 de madera apeada (€), "n" es el número de años que restan hasta el hipotético turno de corta, "X" es el coeficiente de mortalidad dependiente de la severidad de las llamas, "h" es el porcentaje de la especie en el dosel, "z" es la reducción del coste de repoblación por el fenómeno autorregenerativo en función del turno, "P_1" es el precio de la madera dañada con aprovechamiento comercial (€/m^3), "V_1" es el volumen de madera dañada con aprovechamiento (m^3/ha), "Px" es el precio por unidad de medida

del recurso (€), "Rx" es la renta anual por unidad de superficie, "S" es el stock reproductivo por unidad de superficie (€), "CF" es la cantidad de CO_2 retenida en el momento del incendio (t/ha), "PM" es el precio de la tonelada fijada (€/t), "IF" es el incremento anual de CO_2 retenido (t/ha), "RC" es la renta generada al fijar una tonelada de carbono en un año (€), "R_1" es la cantidad de suelo media perdida el primer año (t/ha), "P_1" es el precio estimado para la tonelada (€), "R_2" es la cantidad de suelo media perdida hasta la recuperación de la cobertura original (t/ha).

Posteriormente, se identificaron las bandas necesarias para el análisis espacial. Tanto para la plataforma Terra como para Aqua, las reflectividades de las bandas utilizadas se localizan en el espectro de los 620-670nm (rojo) para la banda 1, y 841-876nm (infrarrojo cercano) para la banda 2. En el caso de las imágenes con resolución de 500 metros, la banda 7 utilizada osciló entre 210-215nm.La geo-referenciación y ajuste al perímetro final del incendio se realizó con el software ArcGIS©, conservando un buffer de tolerancia de 150 metros con objeto de poder incluir el efecto de la vecindad al área quemada. Se efectuó un ajuste en el tamaño de las celdillas, con el fin de compatibilizar las bandas 1,2 y 7 para el cálculo de los índices de vegetación. Para obtener mayor detalle en la expresión gráfica de los resultados, se definieron "celdillas" de 0,0625 ha (25x25 metros).

Los índices de vegetación utilizados fueron el *NDVI*, *NBR*, *DNBR* y *RdNBR*. El cálculo de estos índices mediante MODIS requiere del infrarrojo medio (banda 7) y el infrarrojo cercano (banda 2). La banda 7 de MODIS se utilizó por su capacidad intrínseca de representación de la humedad de los combustibles. A continuación se incluyen las formulaciones de los diferentes índices:

$$\rho_{i,NIR} + \rho_{i,R}$$
$$\rho_{i,WIR} + \rho_{i,NIR}$$

donde $\rho_{i,NIR}$ es la reflectividad del píxel i en la banda del infrarrojo cercano y $\rho_{i,R}$ es la reflectividad del píxel i en la banda del rojo

En ambos índices el rango de valores fluctúa entre -1 y 1. El grado de afectación de cada "celdilla" fue estimado mediante las diferencias en los valores de los índices de vegetación previos y posteriores al paso del fuego:

$$D\text{-}NDVI = NDVI_{\text{pre-fuego}} - NDVI_{\text{post-fuego}}$$
$$DNBR = NBR_{\text{pre-fuego}} - NBR_{\text{post-fuego}}$$

Un tercer indicador fue considerado para el estudio, y que corresponde a una normalización del NBR, con el propósito de eliminar la correlación existente entre el resultado del cociente y el valor *NBR* pre-fuego. Para ello se aplicó el siguiente ajuste a las imágenes:

$$\sqrt{Abs\ (NBR_{pre} - NBR_{fuego})} / 1000$$

Identificación del cambio neto en el valor de los recursos

La determinación de las pérdidas en los recursos naturales, tanto tangibles como intangibles, requiere conocer el valor remanente de los recursos, es decir, el "cambio neto en el valor de los recursos". Este concepto requiere de la incorporación de la depreciación de los recursos en base al nivel de intensidad del fuego. La asignación de la depreciación de cada recurso en función del nivel de intensidad del fuego se realiza en base a ratios de depreciación o niveles porcentuales, dada su mayor sencillez y aplicabilidad práctica.

En el caso del recurso maderero y del aprovechamiento de leñas, y bajo el marco de los proyectos de investigación FIREMAP, SINAMI e INFOCOPAS, se tomaron parcelas circulares de 10 m de radio para diferentes tipologías vegetales y grados de afectación en los siguientes incendios: Huetor (1993), Aznacollar (1995), Estepona (1995), Los Barrios (1997), Cazorla (2001,2005), Aldeaquemada (2004), Minas de Rio Tinto (2004), Alajar (2006), Gaucin (2006), Obejo (2007), Orcera (2009) y Cerro Vértice (2011). En el caso de la valoración de las pérdidas sobre el recurso cinegético se utilizó información del Parque Nacional de Monfragüe y de los incendios de Aldeaquemada y Minas de Río Tinto (Zamora el al. 2010), con el fin de disponer de un análisis no sólo espacial sino también temporal, de la recuperación natural del stock reproductor, y en consecuencia, de las rentas anuales generadas por el recurso.

Los niveles de depreciación de los recursos de fijación de carbono y de control de la erosión fueron estimados en base a la mortalidad del arbolado y al nivel de consumo de la biomasa aérea de Cerro Catena, a partir de mediciones efectuadas en árboles quemados y no quemados, con similares características dendrométricas. La valoración económica de los daños erosivos, o conversión de biomasa pérdida a unidades monetarias, se determinó en base al estudio realizado en el incendio de Obejo (2007), donde se analizaron los costes asociados a la pérdida de diferentes cantidades de suelo (toneladas por hectárea). En el caso de la biodiversidad, la valoración de daños se realiza en base al "valor subrogado" del gobierno (programas de recuperación y/o conservación) o al valor concedido por la población (valoración contingente). Los valores obtenidos para este recurso incluyen ajustes en base a los costes post-fuego invertidos por las administraciones responsables, para evitar la huida y migración de las especies mediante medidas de suplementación de alimento, eliminación de depredadores, reducción de competencia, (Molina 2008).

Los ratios de depreciación de los bienes paisajísticos son muy complicados de

validar. Los proyectos de investigación, anteriormente señalados, estiman los ratios de depreciación para estos bienes mediante la técnica de preferencias sociales o la valoración mediante técnicas indirectas de percepción del paisaje por comparación entre un territorio pre y post-quemado. El uso paisajístico se ve afectado en mayor medida que las actividades de ocio y recreo. Los grandes incendios forestales acontecidos en el Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas (espacio en el que sucedió el incendio de Cerro Catena), proporcionaron una buena base para realizar aproximaciones cuantitativas sobre el impacto en los bienes paisajísticos. Así se puede indicar que el incendio del año 2005 supuso un descenso del 40% en el número de turistas y la paralización de numerosos proyectos empresariales para la remodelación y ampliación de instalaciones recreativas.

Valoración económica de los daños y perjuicios ocasionados por el paso del fuego

El empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite la identificación de la tipología vegetal y su valoración económica, así como la disponibilidad de información al respecto del comportamiento del fuego. En función de éste, se estima a modo individual para cada recurso su ratio de depreciación. La integración de ambas conceptos aporta la vulnerabilidad económica de cada recurso presente en el área quemada. La valoración económica de daños y perjuicios es el sumatorio de las vulnerabilidades de los recursos presentes en el área quemada.

Resultados

Valoración económica de los recursos naturales

Los resultados analíticos del incendio de Cerro Catena señalaron al recurso de no uso como el de mayor importancia (217.865 €) (Tabla 2). Dado el carácter natural de las masas de *P.pinaster* afectadas, y su longevidad (superior a los 100 años en algunos rodales), el recurso maderero también alcanzó un gran valor (194.093,17 €). El tercer recurso en orden de importancia fue la fijación de carbono, dada la gran cantidad de biomasa aérea de los bosques afectados (69.137,71 €).

Tabla 2—*Valoración económica de los recursos de "Cerro Catena"*

Recurso	Valoración (€)	Representatividad (%)
Maderero	194.093,17	29,35
Aprovechamiento leñas	60.771,17	9,19
Cinegético	8.704,35	1,32
Fijación de carbono	69.137,71	10,45
Control erosión	21.973	3,32

Biodiversidad	6.820,79	1,03
Paisaje	27.277	4,12
Ocio y Recreo	54.686	8,27
No uso	217.865	32,94
TOTAL	661.328,19	100

El valor total de los recursos de los montes afectados por el incendio fue de 661.328,19 €, lo que representa en términos de afectación económica por unidad de superficie un valor de 3164,25 €/ha. Los bienes paisajísticos (recurso paisaje, ocio y recreo y no uso) supusieron el 45,33% del valor de los montes afectados, seguidos por los recursos tangibles (maderero, aprovechamiento de leñas y cinegético) los cuales constituyeron el 39,85%.

Valoración económica de los recursos naturales

Se realizó una reconstrucción "in-situ" del comportamiento potencial del fuego, identificando para cada píxel su longitud de llama promedio (directamente relacionada con la intensidad lineal del frente de avance). Se identificaron cuatro niveles de intensidad del fuego (Tabla 3):

- Grado de afectación I. Se corresponde con un Nivel de Intensidad del Fuego (NIF) VI o longitud de llama superior a 12 m. Área muy afectada. Incendio continuo de copas, de gran virulencia y consumición del material aéreo. El suelo ha quedado prácticamente desnudo.
- Grado de afectación II. Se corresponde con un Nivel de Intensidad del Fuego (NIF) IV o longitud de llama entre 6-9 m. Área afectada en grado moderado. Incendio pasivo de copas con alguna carrera de copas. El suelo queda desprotegido por bosquetes en base a la intensidad, existe prácticamente un consumo total del combustible superficial.
- Grado de afectación III. Se corresponde con un Nivel de Intensidad del Fuego (NIF) III o longitud de llama entre 3-6 m. Área medianamente afectada. Incendio de superficie con consumo de material superficial. El fuego avanza a favor de pendiente pero no de viento. Existen árboles entorchados aislados.
- Grado de afectación IV. Se corresponde con un Nivel de Intensidad del Fuego (NIF) II o longitud de llama entre 2-3 m. Área poco afectada. Incendio de superficie con consumo de material superficial. El fuego avanza de recula, sin pendiente ni viento a favor.

***Tabla 3**—Representación de los diferentes Grados de Afectación en "Cerro Catena"*

Grado de Afectación	Píxeles *	Superficie (ha)	Superficie (%)
I	398	25	12
II	946	59	28
III	356	22	11
IV	1644	103	49

* celdillas de 25 x 25 metros, definidas para todos los niveles de información, a partir de resoluciones de 250 y 500 metros.

Tras el análisis, el comportamiento observado de los índices NDVI, NBR, DNBR, y RdNBR, en lo relativo a la identificación de los cuatro Niveles de Intensidad del Fuego (Figura 1) fue heterogéneo. Por lo general, se obtuvieron mejores resultados con el NBR que con el NDVI, pues permitió una mejor discriminación y contraste de la severidad post incendio. El indicador RdNBR permitió eliminar la correlación existente entre el resultado del cociente y el valor NBR pre-fuego.

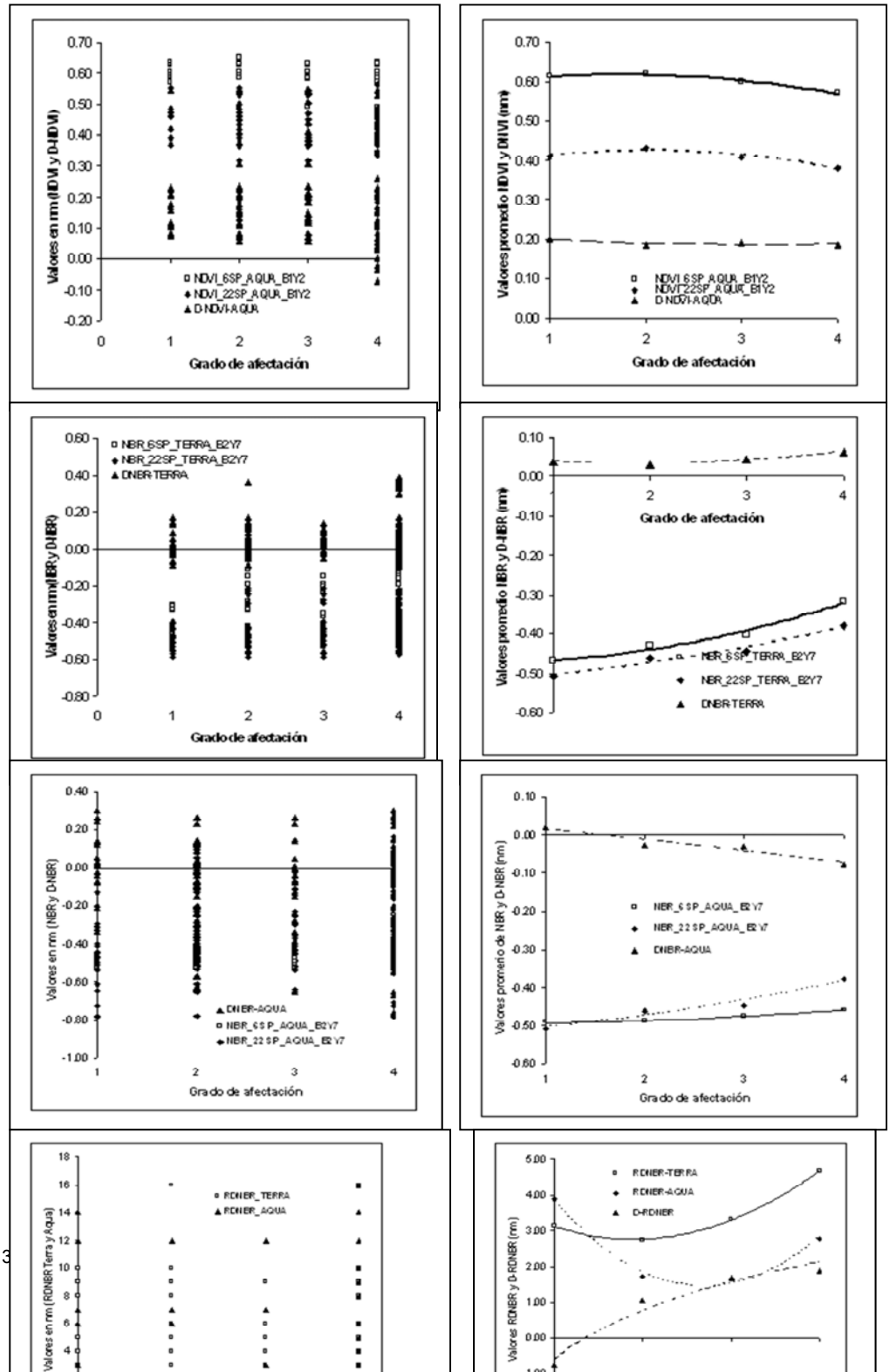

Figura 1—Valores de los diferentes índices para los días 6 y 22 de septiembre (izquierda); promedios para ambas mediciones (derecha).

Identificación del cambio neto en el valor de los recursos

A partir de las experiencias recogidas en grandes incendios forestales acontecidos en Andalucía durante el período 1993-2011 y los resultados científicos de los proyectos de investigación FIREMAP, SINAMI e INFOCOPAS se elaboró la matriz de depreciación (Figura 2).

Esta matriz fue ajustada con el índice de vegetación de mayor correlación a semejanza de otros estudios (Rodríguez y Silva y otros 2009), con objeto de encontrar una ecuación para cada recurso que proporcione el ratio de depreciación tal que, aplicado sobre el valor socioeconómico inicial, proporcione tanto las pérdidas ocasionadas por el incendio forestal como el valor económico residual de la vegetación no afectada por el fuego. En la Tabla 4 aparecen los modelos obtenidos para cada recurso:

NIF	Vrm	Vrle	Vrci	Vrca	Vrer	Vrbi	Vrpa	Voc	Vrno
I	8,33%	5%	20%	10%	10%	20%	5%	2%	4%
II	16,65%	10%	45%	25%	25%	40%	25%	20%	19%
III	38,58%	20%	65%	45%	45%	60%	60%	55%	46%
IV	57,85%	45%	85%	65%	65%	80%	80%	65%	54%
V	82,79%	65%	95%	85%	85%	100%	90%	85%	69%
VI	89,41%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	85%	69%

Figura 2—Matriz de depreciación ("Vrm", depreciación recurso maderero (Rodríguez y Silva y otros 2012); "Vrle", depreciación aprovechamiento leñas; "Vrci", depreciación recurso cinegético; "Vrca", depreciación recurso carbono; "Vrer", depreciación del control erosivo; "Vrbi", depreciación de la biodiversidad faunística; "Vrpa", depreciación del recurso paisaje; "Vroc", depreciación del recurso de ocio y recreo; "Vrno", depreciación del recurso de no uso).

Tabla 4—*Modelos de correlación entre el ratio de depreciación de cada recurso y el RDNBR*

Recurso	Modelo	R^2 (%)
Maderero	$y = -11{,}219x^2 – 13{,}105x + 85{,}746$	97,95
Aprovechamiento leñas	$y = -10{,}178x^2 – 13{,}066x + 69{,}997$	99,81
Cinegético	$y = -14{,}244x^2 – 3{,}3187x + 105{,}54$	97,88
Fijación de carbono	$y = -10{,}027x^2 – 15{,}545x + 93{,}826$	98,62
Control erosión	$y = -10{,}027x^2 – 15{,}545x + 93{,}826$	98,62
Biodiversidad	$y = -13{,}19x^2 – 6{,}3753x + 102{,}61$	98,11
Paisaje	$y = -19{,}406x^2 – 3{,}2702x + 108{,}36$	93,39
Ocio y recreo	$y = -14{,}846x^2 – 4{,}1257x + 90{,}027$	87,29
No uso	$y = -11{,}673x^2 – 2{,}8962x + 73{,}225$	87,43

"y" es el ratio de depreciación (%) y "x" el valor del índice de vegetación RDNBR

Valoración económica de los daños y perjuicios ocasionados por el paso del fuego

La vulnerabilidad económica para el caso del incendio de Monte Catena, fue alta, evaluada en 262.687,99 €, lo que se corresponde con un valor unitario en relación con la superficie afectada de 1.256,88 €/ha. De esta cantidad, el impacto de las llamas sobre los bienes paisajísticos (recurso paisaje, ocio y recreo y no uso) constituyó el 45,08% del total de los daños y perjuicios provocados por el incendio forestal. Por su parte, el impacto sobre los recursos tangibles (recurso maderero, aprovechamiento de leñas y cinegético) sólo constituyó el 37,11% de los daños económicos.

Tabla 5—*Vulnerabilidad económica de los recursos de "Cerro Catena"*

Recurso	Valoración (€)	Representatividad (%)
Maderero	75.270,43	28,65
Aprovechamiento leñas	16.788,16	6,39
Cinegético	5.427,43	2,07
Fijación de carbono	32.679,01	12,44
Control erosión	10.052,00	3,83
Biodiversidad	4.042,37	1,54
Paisaje	13.792,25	5,25
Ocio y Recreo	22.933,50	8,73
No uso	81.702,84	31,10
TOTAL	262.687,99	100

Discusión

Las valoraciones integrales de los daños y perjuicios por incendios forestales arrojan resultados sorprendentes. No en vano, los recursos tangibles sólo representan una parte del total de los impactos económicos sobre las áreas quemadas (Molina 2008; Molina y otros 2009). En el caso del incendio de "Cerro Catena", su localización estratégica dentro de un Parque Natural de gran afluencia turística le confiere gran

importancia a los bienes paisajísticos. A pesar de que se trata de montes sin infraestructura de ocio y recreo, no implica su posibilidad de uso futuro, valor de no uso. En este sentido y tal como recomiendan otros autores (Borchet y otros 2003; Vélez 2009; Rodríguez y Silva y González-Cabán 2010; Molina y otros 2011), la valoración de daños y perjuicios no debe obviar la multifuncionalidad de los montes mediterráneos y reducirla únicamente a las pérdidas sobre el recurso maderero.

La ordenación de los montes de la zona de estudio ha perdido el objetivo primario de antaño, la producción de madera, y el secundario, la producción de resina. Su gestión debe fundamentarse en la multifuncionalidad, con alta incidencia en la conservación y puesta en uso del paisaje. La fijación de carbono representa recurso de alta potencialidad en la búsqueda de eficiencia económica. Además, la ocurrencia de un incendio forestal no sólo supone la pérdida de la capacidad de fijación de los montes sino también una gran cantidad de emisiones a la atmósfera. La utilización del criterio de vulnerabilidad en contra de valoración responde a la necesidad de una herramienta de gestión que incorpore la incidencia de la mayor perturbación mediterránea, los incendios forestales, en la priorización de actuaciones o elaboración de índices de riesgo (Rodríguez y Silva y otros 2009). La clasificación de las unidades monetarias en índices cualitativos de la gravedad potencial que el impacto de un incendio potencial podría ocasionar en un área, facilita la conexión o integración del aspecto socioeconómico con otros parámetros o factores, con objeto de la creación de un índice global de riesgo y/o peligro (Chuvieco y otros 2010).

La identificación del nivel de afectación o intensidad del fuego mediante imágenes de satélite con apoyo de un inventario de campo facilita la extrapolación de la información de campo al conjunto de la superficie quemada. En este sentido, MODIS, por su libre acceso a la plataforma de descarga, su periodicidad y efectividad se presenta como un efectivo medio de apoyo. Tal como han demostrado otros estudios (Chuvieco y otros 2005), el índice normalizado de vegetación no se presenta como el mejor identificador del área quemada. Sin embargo, los resultados alcanzados mediante RDNBR permiten obtener buenas ecuaciones de regresión de alta fiabilidad estadística, que proporcionan las pérdidas ocasionados por el incendio forestal en función de ratios de depreciación (Rodríguez y Silva y otros 2009). Las diferencias encontradas en el ratio de depreciación de unos u otros recursos (Molina 2008; Molina y otros 2009, 2011; Zamora y otros 2010; Rodríguez y Silva y otros 2012) determinan la necesidad de obtener una ecuación por recurso.

Conclusiones

El reconocimiento o valoración de los ecosistemas forestales es fundamental para la planificación espacio-temporal de los gestores en materia de incendios forestales. La

importancia de disponer de un modelo evaluador de los impactos socioeconómicos abarca un amplio rango de posibilidades, facilitando las labores de prevención, valoración y restauración post-incendio, y en consecuencia, la toma de decisiones.

La creciente demanda de cartografía temática por parte de las administraciones con responsabilidades en la gestión está implicando un desarrollo de herramientas y productos basados en teledetección y sistemas de información geográfica. Dada las restricciones económicas actuales, el empleo de una herramienta geo-referenciada con actualizaciones periódicas gratuitas (imágenes MODIS) permite la inclusión de modificaciones, mejoras y adaptaciones temporales o espaciales según las necesidades de los gestores.

Referencias

Borchert, M.; Johnson, M.; Schreiner, D.; Vander, W.S. 2003. Early postfire seed dispersal, seedling establishment and seedling mortality of *Pins coulteri* (D.Don) in central coastal California, USA. Plant Ecology 168(2), 207-220.

Chuvieco, E.; Aguado, I.; Yebra, M.; Nieto, H.; Salas, J.: Martín, P.; Villar, L.; Martínez, J.; Martín, S.; Ibarra, P.; De La Riva, J.; Baeza, J.; Rodríguez y Silva, F.; Molina, J.R.; Herrera, M.A.; Zamora, R. 2010. Development a framework for risk assessment using remote sensing and geographic information system. Ecological Modeling 221: 46-58.

Chuvieco, E.; Ventura M.; Martín, P.; Gómez, I. 2005. Assesment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for Burneo land mapping. Remote Sensing of Environment 94: 450-462.

Constanza, R.; D'Arge, R.; de Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R.V.; Paruelo, J.; Raskin, G.R.; Sutton, P.; Van der Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387: 253-260.

Kenneth, O. 1962. On man's use of fire, with comments on tool making and hunting. Social life of early man. Wenner-Gren foundation for anthropological research, New York.

Martínez, Ruiz E. 2000. Manual de Valoración de Montes y Aprovechamientos Forestales. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

Molina, J.R.; Herrera, M.A.; Zamora, R.; Rodríguez y Silva, F.; González-Cabán, A. 2011. Economic losses to Iberian Swine production from forest fires. Forest Policy and Economics 13: 614-621.

Molina, J.R.; Rodríguez y Silva, F.; Herrera, M.A.: Zamora, R. 2009. A simulation tool for socio-economic planning on forest fire supression management. Libro Forest Fires: Detection, Supresión and Prevention. Nova Science Publishers. USA.

Molina, J.R. 2008. Integración de herramientas para la modelización preventiva y socioeconómica del paisaje forestal frente a los incendios en relación con el cambio climático. Tesis Doctoral.

Moyano, E.; Jiménez, M. 2005. Los andaluces y el medio ambiente. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

Pérez, M.R. 1990. Development of Mediterranean agriculture: an ecological approach. Landscape Urban Planning 18: 211–220.

Piñol, J.; Terradas, J.; Lloret, F. 1998. Climate Warming, Wildfire Hazard, and Wildfire Occurrence in Coastal Eastern Spain. Climatic Change 38(3): 1480-1573.

Rodríguez y Silva, F.; Molina, J.R.; González-Cabán, A.; Herrera, M.A. 2012. Economic vulnerability of timber resources to forest fires. Journal of Environmental Management 100: 16-21.

Rodríguez y Silva, F.; González-Cabán, A. 2010. "SINAMI": a tool for the economic evaluation of forest fire management programs in Mediterranean ecosystems. International Journal of Wildland Fire 19: 927-936.

Rodríguez y Silva, F.; Molina, J.R. 2010. Manual Técnico para la Modelización de la Combustibilidad asociada a los Ecosistemas forestales Mediterráneos. Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba. Córdoba. España.

Rodríguez y Silva, F.; Molina, J.R.; Herrera, M.A.; Zamora, R. 2009. The impact of fire and the socioeconomic vulnerability of forest ecosystems: A methodological approach using remote sensing and geographical information systems. General Technical Report PSW-GTR-227. Pacific Southwest Research Station. Forest Service, U.S. Department of Agriculture; 151 - 168.

Vélez, R. 2009. La Defensa contra incendios forestales. Fundamentos y Experiencias. McGraw-Hill, Madrid.

Zamora, R.; Molina, J.R.; Herrera, M.A.; Rodríguez y Silva, F. 2010. A model for wildfire prevention planning in game resources. Ecological Modeling 221: 19-26.