



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-368

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Análisis del riesgo por incendio forestal en Andalucía. El escenario paisaje, una necesidad.

SENRA RIVERO, F.¹, RUIZ GUTIÉRREZ, C.¹, CASTELLÓ PALAZÓN, F. J.¹, VENEGAS TRONCOSO, J.² y MARTÍNEZ CARMONA, J.³

¹ Centro Operativo Regional Plan INFOCA. Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía.

² Oficina Técnica. Conservación de Infraestructuras y Paisajismo. Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía.

³ Servicio de Restauración del Medio Natural. Dirección General del Medio Natural y Espacios Protegidos. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía.

Resumen

El componente dinámico de algunos elementos del riesgo y/o vulnerabilidad demanda la revisión periódica de los índices que caracterizan un territorio. Existen numerosos precedentes de análisis del riesgo por incendio forestal. A pesar de diferencias conceptuales, la mayoría se enfoca desde una escala local: pendientes, modelos de combustible superficial, etc., con el pixel como unidad de trabajo. Sin embargo, la evolución del territorio y el aumento de la severidad de los incendios demandan un nuevo escenario. En 2016 finalizó la revisión del análisis del riesgo en Andalucía. Se incorporaron elementos del riesgo inéditos en Andalucía a escala regional, como la interfaz urbano-forestal o el análisis de la combustibilidad a través de la actividad de copas, así como lecciones aprendidas del proyecto de análisis y seguimiento del Plan INFOCA. Se definieron las cuencas de drenaje de 5.000ha como unidades de gestión en el paisaje. Un total de 31 subíndices de riesgo más 23 complementarios repartidos en dos escenarios y tres escalas están a disposición de los gestores. La trazabilidad de cada subíndice permite un análisis del riesgo selectivo, en función de cada objetivo y escala de trabajo. Se describen los principales resultados.

Palabras clave

Prevención y extinción, riesgo y vulnerabilidad, combustibles forestales, GIF, cartografía.

1. Introducción

La Ley 5/1999, de 29 de junio, de prevención y lucha contra los incendios forestales, establece en su artículo 36 que el Plan de Emergencia por Incendios Forestales de Andalucía tiene por objeto establecer las medidas para la detección y extinción de los incendios forestales y la resolución de las situaciones de emergencia que de ellos se deriven. A través del Decreto 371/2010, de 14 de septiembre, quedó aprobado el actual y vigente Plan de Emergencias por Incendios Forestales de Andalucía. Entre las funciones básicas definidas en dicho Plan, quedan recogidas en el apartado 1.2, la zonificación del territorio en función del riesgo y las previsibles consecuencias de los incendios forestales, delimitación de áreas según posibles requerimientos de intervención y despliegue de medios y recursos, así como la localización de las infraestructuras físicas a utilizar en operaciones de emergencia.

El componente dinámico de algunos de los elementos del riesgo y/o vulnerabilidad considerados (vegetación, meteorología o infraestructuras, entre otros) demanda la revisión periódica de las variables o índices que forman parte del cálculo del riesgo en un territorio. La propia evolución del territorio sugiere la incorporación de nuevos elementos del riesgo, bien sea por el aumento de la problemática asociada a ellos (como es el caso de las zonas de interfaz urbano-forestal), bien sea por la mejora del conocimiento sobre aspectos operativos y/o preventivos (como es la gestión del conocimiento a partir del análisis de los incendios forestales). Además, la normativa vigente relativa a la prevención de incendios forestales obliga a la actualización del Plan de Emergencias por Incendios

Forestales de Andalucía cada cuatro años. Por todo ello, la revisión periódica del riesgo es necesaria y los cambios metodológicos están justificados. El análisis del riesgo y vulnerabilidad vigente hoy en día presenta además algunas limitaciones:

- El proceso de agregación progresiva de índices hacia la obtención de un índice final implica inexorablemente la combinación de variables no siempre relacionadas directamente entre sí, desvirtuando en ocasiones el resultado final.
- En ese proceso de agregación se favorece un cierto criterio subjetivo a la hora de ponderar los índices o variables, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo.
- Los resultados del análisis no fueron extrapolados a unidades de gestión, más o menos grandes, del territorio, sino que se limitaron a los valores individuales en las teselas (pixeles) de más o menos tamaño dependiendo de la resolución de las variables consideradas. Esto dificulta la toma de decisiones basada en el análisis del riesgo, especialmente a escala regional e incluso provincial.

Se propone, por tanto, una nueva metodología del cálculo del riesgo por incendio forestal y aplicación para la posterior caracterización del territorio. Los resultados se centran en el escenario paisaje, un análisis del riesgo inédito en Andalucía.

2. Objetivos

El objeto del presente estudio puede quedar sintetizado en los siguientes apartados:

1. Revisión de la metodología y fuentes de datos del estudio de riesgo vigente.
2. Desarrollo de la nueva zonificación del riesgo de incendios forestales.
3. Cálculo del riesgo. Implicaciones en los métodos de prevención y procedimientos operativos.

Para la consecución de los objetivos generales propuestos con el presente servicio será necesario desarrollar una serie de trabajos y proyectos cuya finalidad sea la consecución de hitos parciales encaminados a la consecución de los objetivos propuestos. A continuación se desglosa los trabajos desarrollados:

- Revisión y análisis de la metodología en la que se basa el actual estudio de riesgo.
- Revisión bibliográfica y prospección de nuevas metodologías para el desarrollo de la nueva zonificación del riesgo. Definición y propuesta de nueva metodología.
- Prospección de fuente de datos y variables necesarias para el nuevo análisis riesgos.
- Desarrollo de modelos de cálculo sobre Sistema de Información Geográfica.
- Cálculo del riesgo. Validación de resultados.
- Producción cartográfica y estadística.
- Definición de implicaciones de la nueva zonificación del riesgo en los métodos de prevención y procedimientos operativos.
- Generación de informe final de resultados.

3. Metodología

La zonificación del riesgo en Andalucía se plantea desde un enfoque integral basado en cinco temáticas: combustibilidad (C); orografía (O); meteorología (M); históricos (H); y vulnerabilidad (V); y desde dos escenarios: paisaje y local. El riesgo obtenido, ordenado en cinco niveles (bajo, moderado, alto, muy alto y extremo), se mostrará en su máxima resolución posible (tesela o píxel), pero además se extrapolará a la unidad de gestión más adecuada.

Para garantizar la trazabilidad de cada índice se aplica la sistemática implantada en el Proyecto de Análisis y Seguimiento de incendios puesto en marcha en el Centro Operativo Regional de INFOCA en 2010. En el marco del proyecto se documenta la severidad y la disponibilidad del

combustible en todos los incendios relevantes a lo largo del año. Los valores calculados de severidad (índice de severidad del comportamiento o ISC) y disponibilidad (índice de disponibilidad del combustible o IDC) calculados van asociados ineludiblemente a una codificación (visible) formada por las variables consideradas en el cálculo de cada índice. Aplicando esta metodología al análisis del riesgo, cada subíndice parcial calculado estará disponible al usuario, de forma que el gestor vea y pueda usar toda la información generada y no sólo el valor de riesgo final. Se evita así la agregación de factores de diferentes temáticas en un único índice total que desvirtúe los análisis parciales. El usuario de la información puede, por tanto, priorizar un índice frente a otro en base al objeto de estudio en cada caso.

Para poder gestionar y visualizar toda la información generada se dispondrá de un servicio WMS que recoja no sólo los riesgos calculados sino todas las capas complementarias fruto de los procesos desarrollados. El propósito de estas herramientas es hacer la información más accesible y el proceso de cálculo más transparente.

El estudio de riesgo se aplica al conjunto de Andalucía, más de ocho millones de hectáreas, sean de uso forestal o no. Las dimensiones y enorme variabilidad de Andalucía aconsejan la diferenciación de tres niveles de riesgo o escalas de trabajo:

1. Análisis del riesgo de primer orden o riesgo a escala Unidades de Seguimiento de Incendios Forestales (en adelante, USIF), que se establecerá para cada una de las 25 USIF definidas conjuntamente entre el Centro Operativo Regional y los distintos Centros Operativos Provinciales;
2. Análisis del riesgo de segundo orden o riesgo a escala cuenca, a un nivel de mayor detalle, centrado en las cuencas de drenaje de 5.000ha (superficie mínima) de Andalucía.
3. Análisis del riesgo de tercer orden o riesgo a escala local, a un nivel máximo de detalle, sin unidad de referencia geográfica (datos a nivel de pixel), normalmente 10x10m o 5x5m.

3.1. El escenario paisaje

El análisis del riesgo de incendio suele determinarse a escala local, con la máxima resolución disponible en cada caso. Esta información es útil durante las operaciones de extinción (por ejemplo, riesgo por pendiente, por combustibilidad superficial, etc.) así como para planes de prevención a escala monte o planes de autoprotección (por ejemplo, riesgo por interfaz urbano forestal, recurrencia de incendios, etc.). Sin embargo, los gestores del riesgo necesitamos unidades de gestión del territorio que faciliten la toma de decisiones. La resolución local no es operativa en este contexto, y los límites políticos o administrativos tampoco. Además, el aumento de la combustibilidad de nuestros montes y el escenario meteorológico actual, con eventos extremos cada vez más frecuentes requieren ver el problema de los incendios desde una perspectiva más global que identifiquen los elementos de riesgo en un nuevo escenario, el escenario paisaje.

El **escenario paisaje** se ha incorporado en el estudio del riesgo de incendios forestales de Andalucía a través de dos escalas diferentes, la escala USIF (Unidades de Seguimiento de Incendios Forestales) y la escala cuenca. El enfoque del nivel de riesgo USIF es el de vulnerabilidad frente a condiciones de grandes incendios. Las USIF son unidades del territorio donde los incendios presentan características de propagación similares (Figura 1, izquierda). Estas unidades se basan en criterios biogeográficos, meteorológicos y de distribución de vegetación. Un total de 25 fueron identificadas en la región. A partir del análisis a este nivel de detalle se establecen recomendaciones operativas en escenarios meteorológicos adversos y recomendaciones preventivas sobre la ubicación y características de la red de infraestructuras de defensa de primer orden o primarias. Es, por tanto, la escala de referencia para marcar las principales políticas regionales de gestión del riesgo en el territorio.

El análisis del riesgo a escala cuenca pretende cubrir una escala de referencia intermedia entre las USIF y los datos a resolución de píxel (escala local). Se han definido las cuencas hidrográficas de superficie de referencia 5.000ha (superficie mínima), un total de 927 para toda Andalucía, obtenidas a través del análisis hidrológico del territorio (Figura 1, derecha). Esta unidad de referencia es de magnitud equivalente a los términos municipales, con la salvedad de que las cuencas caracterizan mejor el territorio en el contexto de los incendios forestales. En este sentido es una unidad geográfica interesante para la presentación y zonificación del riesgo, aunque algunos de los índices mostrados se hayan generado a escala USIF (superior y menor detalle) o escala local (inferior y mayor detalle), todos han sido luego replicados a esta escala intermedia. Es, además, la escala de referencia para el cálculo del riesgo orográfico por su vinculación a la geomorfología.

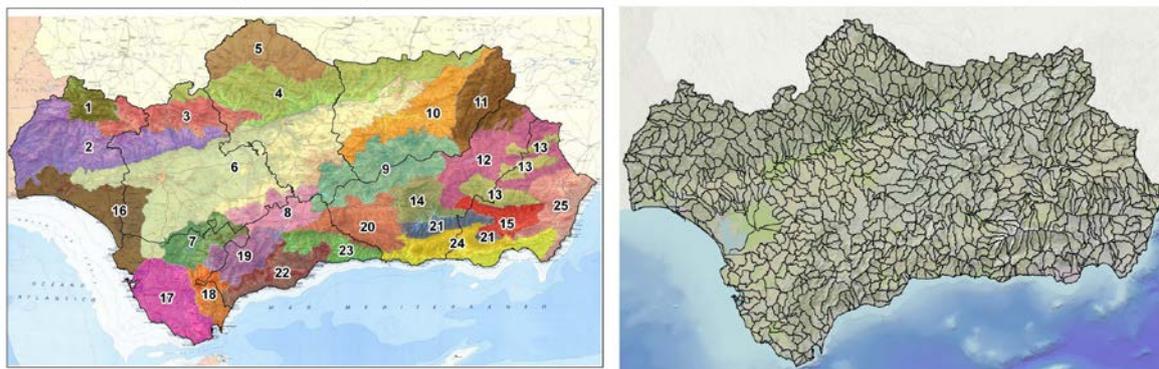


Figura 1. Unidades de Seguimiento de Incendios Forestales (USIF) y cuencas de drenaje de superficie mínima 5.000ha

A continuación se describen los principales índices de riesgo considerados en el escenario paisaje.

3.2. Análisis de la combustibilidad en el escenario paisaje

Es objeto de análisis el riesgo por continuidad del combustible asociado a comportamiento extremo/GIF. Las zonas de elevada combustibilidad, en estratos superficial y/o arbolados, que estén dispuestas de forma continua son zonas donde, en un escenario meteorológico adverso, un incendio consolidado podría convertirse en GIF. La delimitación de estas zonas y su clasificación en base a su extensión permiten identificar las zonas prioritarias en la gestión preventiva del combustible.

Tradicionalmente el análisis de la combustibilidad ha incidido sobre el combustible superficial (matorrales y herbáceas), por su mejor identificación y seguimiento. Sin embargo, el arbolado, donde esté presente, es clave en la propagación de los incendios severos y/o GIF (SENRA, 2012). Es necesario, por tanto, incorporarlos en la caracterización del riesgo. El modelo de inicio y propagación de VAN WAGNER (1977) identifica los umbrales de la estructura del arbolado que controlan el inicio y la propagación del fuego de copas. Generalmente se acepta que las variables estructurales que determinan la actividad de copas son la carga de combustible arbóreo (CFL, kg/m²), la densidad aparente de copas (CBD, kg/m³) y la altura de la base de la copa (CBH, m) (SCOTT Y REINDHART, 2001; CRUZ ET AL. 2003). A pesar de la existencia de los modelos anteriormente descritos y de haberse identificado las variables estructurales de entrada, CFL, CBD y CBH son, en general, desconocidas para el gestor (AFFLECK ET AL. 2012). Además, apenas se cuenta con herramientas para su estimación.

A partir de datos del 3º Inventario Forestal Nacional, parcelas de inventario de proyectos de ordenación, modelos alométricos de biomasa y estudios monográficos de modelos de existencias, crecimiento y producción de coníferas y eucaliptares, se analizó la cantidad y distribución del

combustible aéreo de las siguientes formaciones: coníferas (*Pinus halepensis*, *P. pinaster*, *P. pinea*, *P. sylvestris* y *P. nigra*) y quercíneas (*Quercus ilex*, *Q. suber*, *Q. faginea* y *Q. canariensis*) más representativas de nuestra comunidad, así como de las plantaciones de eucaliptares (*Eucalyptus globulus* y *E. camaldulensis*). La resolución usada para el análisis fue la de 100x100m², que garantiza un adecuado equilibrio entre el grado de detalle de las fuentes utilizadas, la precisión de los resultados y los recursos necesarios para efectuar los cálculos (MCBRATNEY ET AL. 2003).

Caracterización de los pinares. La Información que se cuenta de coníferas es exhaustiva gracias al trabajo llevado a cabo por la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente (CAPMA) “Biomasa Forestal en Andalucía. Modelo de existencias, crecimiento y producción” (CAPMA, 2012) el cual ofrece como resultados gran cantidad de información georeferenciada relacionada con la presencia y biomasa forestal, así como información digital resultado de las distintas etapas metodológicas llevadas a cabo que entran dentro del ámbito de los estudios básicos y aplicados de ecología forestal y silvicultura, lo que resulta ser de utilidad para nuestro estudio. A partir de 36 variables consideradas en el estudio de coníferas, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) que permitió construir transformaciones lineales de las variables ambientales originales, de modo que las nuevas variables transformadas son ortogonales entre sí y, consecuentemente, carecen de correlación. Además, el ACP permitió reducir la dimensionalidad de los datos originales sin pérdida significativa de información.

Caracterización de los eucaliptales. La información con que se cuenta de las masas de eucaliptos es igualmente abundante y exhaustiva gracias al trabajo llevado a cabo por la CMAOT “Distribución actual y potencial de los eucaliptares andaluces” (en fase de publicación). Para ello se llevó a cabo una metodología análoga a la desarrollada para el trabajo de coníferas, dando como resultados información digital relativa a la producción potencial de biomasa de las especies de eucaliptos presentes en el territorio andaluz. Con estas bases, y partiendo de la distribución actual del eucalipto, se estimó el estado de desarrollo asociado a la edad del turno a partir modelos o funciones de transición basados en: turno de aprovechamiento (edad) y marco de plantación (densidad). Una vez estimado su estado de desarrollo, se calculó a partir de las funciones de producción y biomasa dadas por Ruiz-Peinado (RUIZ-PEINADO ET AL. 2012), el volumen de madera y biomasa para el turno de aprovechamiento establecido. Para nuestro estudio se ha considerado como estado más desfavorable, desde el punto de vista de incendios forestales, las masas monoespecíficas cuyo destino es la producción de biomasa. Para este destino el marco de plantación suele ser de 530pies/ha y el turno de aprovechamiento de 7 años.

Caracterización de las quercíneas. En este caso, y dado que no se contaba con estudio monográfico para este género de especies, se ha tenido que partir desde cero empleando para ello la siguiente información: datos de parcelas de inventario del IFN3; proyectos de ordenaciones de montes públicos; SIOSE 2011; cartografía de vegetación 1:10.000 de la masa forestal de Andalucía, año 1996-2006; información cartográfica del mapa forestal español (IFN3); mapa de usos y coberturas del suelo de Andalucía Escala 1:25.000 (CMA, 2007); y formaciones adhesadas de Andalucía.

A continuación se describen las variables de entrada consideradas para el cálculo del riesgo por combustibilidad:

- Determinación del combustible pesado superficial, procedente del SIOSE 2011. Todas aquellas teselas dominadas por estructuras de matorral denso, arbolado o desarbolado (códigos 611, 615, 621, 625, 630, 640, 650, 660, 670, 680 y 911), o matorral disperso asociado a estructuras de eucaliptal, por su facilidad de entorchamientos y emisión de focos secundarios (códigos 730 y 760). Estas estructuras favorecen la consolidación de los incendios y su potencial convectivo.

- Actividad de propagación por copas. Mediante la simulación en FLAMMAP (FINNEY, 2006) se han identificado las teselas del territorio que pueden participar en procesos de propagación por copas, bien pasivos (antorcheos) bien activos. Para ello se han generado rasters regionales descriptivos del complejo vegetal superficial (modelos de combustible) y arbóreo (fracción de cabida cubierta (%), densidad aparente (kg/m^3), altura del rodal (m) y altura basal de la copa (m)), además de la altimetría, pendiente y exposiciones. Se incorporaron a la simulación los modelos de combustibles de UCO40 (RODRÍGUEZ Y SILVA Y MOLINA, 2012). Las simulaciones se hicieron bajo un escenario meteorológico “tipo” específico a cada USIF (25 simulaciones), obtenido del análisis de la meteorología observada durante los tres días previos y tres posteriores a los incendios mayores de 50ha del periodo 2000 a 2014.

Los resultados de la simulación se contrastaron con aquellas teselas con valores críticos de altura basal de copa (CBH, m) por su relación con los procesos de transición de fuegos de superficie a fuegos de copa (SCOTT Y REINDHART, 2001). Para valores de CBH en pinar inferiores a 2m y en quercíneas inferiores a 1,5m hubo coincidencias en todos los casos con las teselas de actividad de fuego de copas obtenidas del simulador. El conjunto de teselas con las características anteriores fue analizado en términos de continuidad espacial. Los polígonos resultantes se clasifican por tamaño, a mayor continuidad mayor riesgo: 1, inferior a 500ha; 2, entre 500 y 1.000ha; 3, entre 1.000 y 2.000; 4, entre 2.000 y 10.000ha; y 5, superior a 10.000ha.

3.3. Riesgo orográfico en el escenario paisaje

El análisis de la pendiente y de la exposición, tan presente en los análisis del riesgo o peligro de incendio forestal carece de sentido en un escenario paisaje, quedando relegado como información de interés exclusivamente a escala local. Más interesante es caracterizar el riesgo de cada cuenca de drenaje en base a los principales patrones de propagación (COSTA ET AL., 2012). Se consideran dos índices de riesgo: riesgo orográfico para incendios que propagan topográficamente (cuencas, pendientes y nudos de barranco) y un riesgo orográfico para incendios que propagan siguiendo un patrón de viento (longitud y orientación de las divisorias y nudos de divisorias). El riesgo orográfico resultante para cada cuenca será el resultante de multiplicar ambos subíndices.

El subíndice de riesgo orográfico por patrones de propagación topográfica (no se consideran los incendios movidos por vientos locales sostenidos) va a cuantificar el riesgo basado en tres factores: pendiente del terreno, horas anuales de insolación, y densidad de nudos de barranco (o puntos de drenaje).

- Las horas anuales de insolación se han obtenido del Modelo de Incidencia Solar de la Junta de Andalucía. Cada punto del terreno aporta información sobre la suma anual de los valores de la incidencia solar (en horas/año) calculada mediante la recreación exacta de la trayectoria del sol sobre la superficie del terreno. Se ha considerado el total anual en vez del periodo de alto riesgo de incendio para realzar mejor las diferencias entre cuencas, pues las diferencias en radiación solar se atenúan conforme más próximo nos encontremos al equinoccio de verano. Cada cuenca será, por tanto, caracterizada por el número total de horas de insolación anual por hectárea.
- El análisis de la densidad de los nudos de barranco se basa en el cálculo mediante análisis hidrológico de los puntos de drenaje para todas las cuencas de superficie mínima de drenaje de 500ha de Andalucía. De esta forma se consigue un nivel de detalle considerable. A mayor densidad de nudos de barranco mayor diversificación puede tener la propagación del incendio y mayores las dificultades de extinción. La densidad se calcula, como el resto de variables, para cada cuenca.

El subíndice de riesgo orográfico por patrones de propagación por viento (sin distinguir entre vientos locales sostenidos y aquellos de origen sinóptico) cuantifica el riesgo basado en dos factores:

la distribución espacial de las crestas y su relación con la frecuencia de los vientos observados en cada cuenca; y la densidad de nudos de divisorias.

- La red de divisorias se ha obtenido del análisis hidrológico del terreno para las cuencas con una superficie mínima de 500ha, de esta forma se obtienen las principales divisorias interiores a las cuencas de 5.000ha (superficie mínima). El análisis hidrológico desarrollado permitió caracterizar la distribución espacial de las divisorias con respecto a los 16 cuadrantes en cada cuenca.
- De los estudios del viento realizados en la Universidad de Cádiz (AGÜERA-PEREZ ET AL., 2013 y 2014) se obtuvo la frecuencia de distribución de las direcciones de los vientos (rosa de frecuencias) en 106 estaciones meteorológicas repartidas en Andalucía. Se consideraron los registros de mayo a octubre del periodo 2011 a 2014. Mediante interpolación corregida por la altitud y posterior análisis de cada cuenca se obtuvo la distribución de la rosa de frecuencias para cada cuenca.
- El factor alineación cresta-viento evalúa cómo se alinean las crestas con cada dirección de viento. Para ello tiene en cuenta el ángulo que forma cada segmento de la divisoria con las distintas direcciones de viento, y lo pondera por su longitud. Para una dirección determinada de viento, su valor está entre 0 (cresta perpendicular a esa dirección) y 1 (cresta plenamente alineada en todos los segmentos que la componen). Se ha caracterizado cada cuenca por la alineación cresta-viento y por la relación de ésta con la frecuencia histórica considerada.
- Los nudos de divisorias se han calculado mediante análisis hidrológico para cuencas de 500ha para toda Andalucía. A mayor densidad de nudos de crestas o divisorias mayor diversificación puede tener la propagación del incendio en un entorno de viento y mayores las dificultades de extinción. La densidad se calcula, como el resto de variables, para cada cuenca.

3.4. Riesgo meteorológico en el escenario paisaje

En el escenario paisaje se ha definido el riesgo meteorológico estructural, basado en la comparativa de los registros extremos entre USIF para las variables de temperatura, humedad relativa e Intensidad de viento. Se han analizado, en un periodo sin precedentes, todos los registros observados de mayo a octubre entre 1988 y 2015, un total de 28 años. La Figura 2 muestra la red de estaciones meteorológicas consultadas:

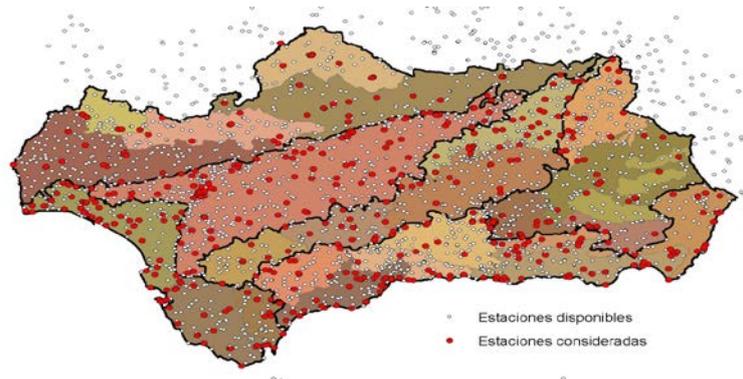


Figura 2. Estaciones meteorológicas históricas existentes y consideradas en el estudio

Se desarrollaron modelos matemáticos para gestionar ese enorme volumen de datos, un total de 248 millones de registros, de los que, una vez filtrados, se seleccionaron 74 millones correspondientes a 25 millones de datos horarios. Con toda esa información se identificó el percentil del 10% más desfavorable para temperatura (T, °C), humedad relativa (HR, %) y velocidad de viento (V, m/s) en el periodo junio – octubre. Para cada estación y variable se analizó qué porcentaje de sus

valores se sitúan en ese percentil desfavorable. Los resultados fueron interpolados (cokriging con la altitud), obteniendo así tres mapas: temperatura, humedad relativa y velocidad de viento. Estos mapas aportan información sobre cómo se distribuyen en Andalucía los valores más desfavorables de estas tres variables. A partir de estos mapas se han caracterizado las 25 USIF. Finalmente del análisis conjunto de estos tres planos se obtiene el riesgo meteorológico estructural. El mismo proceso fue además desarrollado para las 927 cuencas consideradas.

Junto con el índice de riesgo meteorológico, y como capa complementaria, se determinó el índice de sequía (déficit hídrico o DC (“drought code”)) (FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP, 1992) sobre datos observados. El modelo desarrollado permite recuperar el índice de sequía (raster) para cualquier día de los últimos 15 años así como generarlo diariamente a futuro. Se parte de datos climáticos diarios de la serie de años 2000-2015 y un total de 3.234 estaciones de diferentes tipos (termométrica, pluviométrica así como termo-pluviométrica) y de distintas entidades gestoras. De ellas son finalmente 1.692 las consideradas por la existencia de los datos necesarios, un total de 6,5 millones de registros proporcionados por el Subsistema CLIMA de la REDIAM. El cálculo del DC requiere de valores continuos durante una serie temporal mínima de dos años. Por ello la principal limitación fue la de cubrir los registros vacíos de la red de estaciones meteorológicas considerada. Para cada registro que no tiene dato para alguna de las variables y día, se analizan los datos existentes de las estaciones más cercanas para ese día y se lleva a cabo una triangulación de Delaunay con dichas estaciones que serán las que se emplearán para la interpolación del dato ausente. Una vez efectuada la depuración y ponderación de los datos a emplear, se ha llevado a cabo una interpolación mediante el método del inverso a la distancia IDW (potencia 3), determinando de este modo el dato ausente en cada caso, para la variable considerada y día considerado.

También se caracterizaron los escenarios meteorológicos de los incendios mayores de 50ha del periodo de 2000 a 2014. Se obtuvieron gráficos de temperatura, humedad relativa y rumbo e intensidad del viento para cada uno de los 253 incendios históricos considerados. La serie temporal fue de tres días antes y tres días después del inicio de cada incendio. La identificación del escenario meteorológico para cada USIF fue incorporado a las simulaciones de la actividad de copa del Riesgo por Combustibilidad.

3.5. Riesgo histórico en el escenario paisaje

Es objeto de análisis el riesgo según la afección de incendios históricos mayores a 100ha del periodo 1975 a 2014. Se ha considerado que a partir de 100ha el incendio está consolidado y tiene potencial de desarrollo, evitando así las cifra de 500ha (GIF) que es un concepto estadístico. Mediante este índice se pretende evaluar la peligrosidad debida a la ocurrencia de incendios de entidad. En total, 810 incendios mayores de 100 ha fueron considerados.

Este índice no sólo tiene en cuenta las zonas incendiadas, sino que se establecieron franjas de 2 y 10km alrededor, como las zonas de influencia de cada incendio. El resultado es una cobertura ráster 10x10m, con el número de veces (0-6) que un incendio mayor de 100ha ha quemado ese pixel de 100m² desde el año 1975.

El cálculo de este índice ha permitido normalizar la capa de incendios históricos de Andalucía de los últimos 40 años, importante capa complementaria para planificación preventiva y operaciones de extinción y, sobre todo, base para la tipificación de los incendios históricos.

3.6. Vulnerabilidad en el escenario paisaje

En el escenario paisaje se ha considerado de interés el analizar los valores ambientales que aumentan la vulnerabilidad a la propagación de incendios en condiciones severas. Los valores ambientales considerados como indicadores para el presente estudio son:

- Calidad de las formaciones vegetales. Esta capa procede del estudio del riesgo previo y aporta un índice de calidad en base a la estructura vegetal y a la composición específica de la especie principal.
- Red Natura y Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA). Manteniendo el procedimiento del estudio de riesgo previo, las figuras de protección existentes fueron consideradas para designar la calidad de estos espacios protegidos. En caso de los Parques Naturales, se ha distinguido las calidades en base a la zonificación recogida en su PORN correspondiente.
- Número de especies de flora amenazadas (FAME) distribuidas en teselas de 1km². A mayor número de especies, mayor vulnerabilidad. El Sistema de Producción de Flora Amenazada (FAME) recoge la información sobre localización y seguimiento de flora amenazada y de interés en Andalucía.
- Número de especies de fauna en peligro distribuidas en teselas de 1km². A mayor número de especies mayor vulnerabilidad. Los Programas de Seguimiento de la Biodiversidad establecidos por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio tienen como objeto conocer las poblaciones para poder evaluar periódicamente el estado de conservación de las especies y cartografiar su distribución actual. Al igual que en la flora amenazada, se parten de datos de cuatro capas, que reflejan el número de especies por píxel, diferenciadas en: "vulnerables", "de protección especial", "en peligro" y "otras".
- Erosión potencial del suelo. Para la obtención de este subíndice se ha utilizado la cartografía existente en el Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES) de 2002 a 2012, proporcionada por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente que se lleva a cabo de forma continua y cíclica, con una periodicidad de 10 años y con una precisión equivalente a una escala 1:50.000. En el cálculo del subíndice se ha tenido en cuenta la erosión potencial, que es una información específica que ofrece el Inventario en relación con la erosión laminar y en regueros. Según el Inventario, con la erosión potencial se estiman las pérdidas de suelo por erosión laminar y en regueros que tendrían lugar en caso de desaparición brusca y total de la cubierta vegetal (como es el caso de los incendios forestales).

Para la obtención de este índice se han evaluado los cuatro grupos de variables citados: erosión potencial, calidad de las formaciones vegetales, espacios protegidos y vulnerabilidad de las especies de flora y fauna (ambos considerados conjuntamente). Se reclasificaron de forma que cada grupo tuviera el mismo peso en el resultado final. El ráster resultante, con valores del 0-19, fue reclasificado en cinco niveles de riesgo mediante el método geométrico.

4. Resultados

La Figura 3 resume todas las capas o productos obtenidos, ordenados por temáticas. Toda la información estará disponible a través de un servicio WMS, de consulta por parte del personal de la Consejería y Agencia de Medio Ambiente y Agua a través de SIG. El uso de estas herramientas permitirá su revisión y ajuste. Tras su contraste se prevé que las capas relacionadas con los índices y subíndices del riesgo estén accesibles al público a través de un visor.

NOMBRE PLANO	Índice / Subíndice / Capa complementaria	Unidad de gestión	Nº plano
COMBUSTIBILIDAD			
C1_1	C1 Riesgo relativo entre USIF por continuidad del combustible asociado a comportamiento extremo/GIF.	USIF	1
C2_2	C2 Riesgo relativo entre cuencas por continuidad del combustible asociado a comportamiento extremo/GIF.	Cuencas	2
C2_3	C2 Riesgo relativo entre cuencas por combustibilidad superficial	Cuencas	3
C3_4	C3 Riesgo por continuidad del combustible asociado a un comportamiento extremo/GIF	Local	4
C3_5	C3 Riesgo por combustibilidad superficial (SIOSE 2011)	Local	5
C4_6	C4 Zonas de oportunidad para operaciones de extinción (SIOSE 2011)	Local	6
C4_7	C4 Zonas de riesgo por incendio forestal y Zonas de influencia de riesgo por incendio (SIOSE 2011)	Local	7
C4_8	C4 Actividad de incendios de copas (pasivo y activo)	Local	8
C4_9	C4 Caracterización de masa arboladas (Quercus, Pinus y Eucaliptus): Densidad Aparente (kg/m ³)	Local	9
C4_10	C4 Caracterización de masa arboladas (Quercus, Pinus y Eucaliptus): Fracción de Cobertura (%)	Local	10
C4_11	C4 Caracterización de masa arboladas (Quercus, Pinus y Eucaliptus): Altura Basal de Copa (m)	Local	11
C4_12	C4 Caracterización de masa arboladas (Quercus, Pinus y Eucaliptus): Altura del rodal (m)	Local	12
C4_13	C4 Modelos de combustible superficial. Rothermel (SIOSE 2011)	Local	13
C4_14	C4 Modelos de combustible superficial. UCO40 (SIOSE 2011)	Local	14
OROGRAFÍA			
O1_15	O1 Riesgo orográfico relativo entre USIF asociado a los principales patrones de propagación	USIF	15
O2_16	O2 Riesgo orográfico asociado a los principales patrones de propagación	Cuencas	16
O2_17	O2 Riesgo relativo entre cuencas asociado a las pendientes y exposiciones	Cuencas	17
O3_18	O3 Riesgo combinado de pendientes y exposiciones	Local	18
O4_19	O4 Riesgo de propagación por incendios topográficos (incluye nudos de barranco)	Cuencas	19
O4_20	O4 Riesgo de propagación por incendios de viento (incluye nudos de crestas)	Cuencas	20
O4_21-28	O4 Riesgo de propagación por patrón de vientos según su procedencia	Cuencas	21-28
O4_29-36	O4 Grado de alineación de CPS (Campbell Prediction System) para cada octante de viento	Local	29-36
O4_37	O4 Grado de insolación	Local	37
O4_38	O4 Cuencas geográficas de 5000ha y de 500ha de superficie mínima	Cuencas	38
METEOROLÓGICO			
M1_39	M1 Riesgo meteorológico estructural relativo entre USIF por T ³ -HR	USIF	39
M1_40	M1 Riesgo meteorológico estructural relativo entre USIF por intensidad de viento	USIF	40
M2_41	M2 Riesgo meteorológico estructural relativo entre cuencas por T³-HR.	Cuencas	41
M2_42	M2 Riesgo meteorológico estructural relativo entre cuencas por intensidad del viento	Cuencas	42
M3_43_1	M3 Riesgo meteorológico estructural T ³	Local	43_1
M3_43_2	M3 Riesgo meteorológico estructural HR.	Local	43_2
M3_44	M3 Riesgo meteorológico estructural intensidad del viento	Local	44
	M4 Índice de sequía Histórico	Local	Tabla
M4_Gráficos	M4 Caracterización de la meteorología observada en incendios mayores de 100ha. Años 2000-2014.	Local	Gráficos
M4_Tabla	M4 Escenarios meteorológicos asociados a los incendios históricos para cada USIF	Local	Tabla
HISTÓRICO			
H1_45	H1 Riesgo relativo entre USIF por la afección de incendios históricos mayores a 100ha de período 1975 a 2014	USIF	45
H2_46	H2 Riesgo relativo entre cuencas por la afección de incendios históricos mayores a 100ha de período 1975 a 2014	Cuencas	46
H2_47	H2 Riesgo relativo entre cuencas del factor antrópico	Cuencas	47
H3_48	H3 Riesgo según la afección de incendios históricos mayores a 100ha de período 1975 a 2014	Local	48
H3_49	H3 Riesgo antrópico	Local	49
H4_50	H4 Perímetros históricos mayores de 100ha entre 1975 y 2014	Local	50
H4_51	H4 Riesgo por recurrencia de los incendios registrados entre 2000 y 2014	Local	51
H4_52	H4 Riesgo por infraestructuras antrópicas que pueden generar incendios forestales	Local	52
VULNERABILIDAD			
V1_53	V1 Vulnerabilidad relativa entre USIF asociada a la pérdida de valores ambientales	USIF	53
V2_54	V2 Vulnerabilidad relativa entre cuencas asociada a la pérdida de los valores ambientales	Cuencas	54
V2_55	V2 Vulnerabilidad relativa entre cuencas asociada a la interfase urbano forestal (IUF)	Cuencas	55
V3_56	V3 Vulnerabilidad asociada a la pérdida de valores ambientales	Local	56
V3_57	V3 Vulnerabilidad asociada a la interfase urbano forestal (IUF)	Local	57
V4_58	V4 Erosión potencial del suelo	Local	58
V4_59	V4 Índice de vulnerabilidad por ubicación en Red Natura o RENPA	Local	59
V4_60	V4 Número de especies de flora y fauna amenazadas	Local	60
V4_61	V4 Calidad de las formaciones vegetales	Local	61
V4_62	V4 Identificación y normalización de todas las estructuras de IUF	Local	62
V4_63	V4 Tipificación de la IUF, grado de asociación según criterios Pyrosudoe	Local	63
V4_64	V4 Zonas de interfase urbano forestal	Local	64

Figura 3. Listado de índices, subíndices y planos asociados al estudio de riesgo, así como la escala asociada.

5. Discusión

Son numerosas las aplicaciones que un estudio del análisis del riesgo puede tener, algunas de ellas más orientadas hacia la gestión preventiva y otras más hacia la gestión operativa o de extinción de incendios. Si bien algunas de las capas complementarias o subíndices pueden ser de aplicación inmediata por su claro enfoque operativo y/o por basarse en fuentes de información fiables y no cambiantes (por ejemplo, la orografía), otras y, especialmente, algunos índices como el de combustibilidad y vulnerabilidad, deben revisarse y contrastarse en campo por basarse en fuentes con ciertas limitaciones (por ejemplo, SIOSE y estructuras urbanas). El esfuerzo en transparencia y trazabilidad de todos los cálculos desarrollados en el estudio facilita la revisión y actualización de los subíndices e índices obtenidos.

Es importante así mismo destacar la utilidad de algunas capas complementarias o subíndices por encima incluso de los índices de riesgo obtenidos. Toda la información generada (índices, subíndices, capas complementarias y variables de entrada) estará disponible a los gestores para su consideración.

El diseño desarrollado, tanto en la representación de resultados, datos e información, como en la metodología y procedimientos generados persigue la gestión integral de la prevención y extinción de I.F. Con una visión conjunta y ágil en su aplicación obtendremos una mejora en la gestión del conocimiento, en la organización estratégica de líneas de trabajo e implicaciones operativas y en la coordinación de los diferentes departamentos, unidades de gestión y proyectos relacionados con los I.F.

La jerarquización del análisis del riesgo en distintas escalas de trabajo ha sido uno de los logros del presente estudio, no sólo desde el punto de vista de la resolución de las fuentes consideradas, sino de la consideración de qué fuente es útil a cada escala/objetivo y, especialmente, por la extrapolación del riesgo a unidades geográficas superiores que permitan a los gestores tomar decisiones a escala comarcal, provincial y regional.

A continuación se enumeran brevemente posibles aplicaciones de los resultados obtenidos en el presente estudio sobre el análisis del riesgo de incendio forestal en el escenario paisaje:

- El análisis de la combustibilidad en el escenario paisaje es la base para el diseño de estrategias regionales para la prevención del riesgo estructural. Los resultados del estudio ayudarán a la validación, revisión y efectividad de las acciones preventivas e infraestructuras de primer orden llevadas a cabo.
- El análisis de la continuidad de combustible pesado, junto con las zonas de oportunidad y los índices de riesgo orográfico facilitan la localización de la red de cortafuegos de primer orden y de las zonas prioritarias de gestión.
- El conocimiento e identificación en el territorio de los elementos del paisaje que generan diferentes tipos de patrones de comportamiento del fuego y su potencialidad son útiles para establecer objetivos estratégicos tanto en la gestión preventiva como para las implicaciones operativas en la extinción.
- De igual forma, el análisis de los incendios históricos junto con la caracterización meteorológica desarrollada (caracterización de las cuencas y USIF, cálculo del índice de sequía en base a datos observados, escenarios tipo, etc.) sienta las bases para una posible modificación de las épocas de peligro, pasando a otras flexibles acordes a las condiciones meteorológicas reales frente a las umbrales específicas a cada territorio (Cuenca y USIF). Esto, entre otros, tendría especial repercusión en el uso del fuego, un condicionado que conviene revisar para dar una mayor flexibilidad a las quemas prescritas gestionadas por el dispositivo.

6. Conclusiones

El estudio del riesgo se ha planteado con un enfoque eminentemente práctico. Como resultado, y por encima del cálculo del riesgo final, toda la información (capas complementarias, índices y subíndices) generados tienen valor para la gestión de las emergencias por incendio forestal, tanto en sala operativa COR/COP como en PMA, mucha de ellas vinculadas a la Unidad de Análisis y seguimiento de incendios forestales. Los resultados obtenidos, por tanto, pueden facilitar la priorización de emergencias ante simultaneidad, los procedimientos de identificación de prioridades y búsqueda de oportunidades, el análisis del comportamiento, planificación y gestión de la emergencia, etc. El escenario paisaje debe incorporarse al estudio del riesgo, es básico para entender el problema de los incendios y, sobre todo, para poder gestionar el riesgo de una forma integral.

7. Agradecimientos

El resultado de este trabajo es fruto de un equipo humano extraordinario, de la Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía (AMAyA) y del Servicio Operativo de Extinción de Incendios Forestales del Plan INFOCA, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Además de los autores del presente artículo queríamos agradecer especialmente la profesionalidad y dedicación a Carlos Encinas y Ana Seseña, de la Oficina Técnica de la AMAyA.

8. Bibliografía

- AGÜERA-PÉREZ, A., PALOMARES-SALAS, J. C., GONZÁLEZ DE LA ROSA, J. J., y MORENO-MUÑOZ, A.; 2013. Spatial persistence in wind analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 119, pp.48-52.
- AGÜERA-PÉREZ, A., PALOMARES-SALAS, J. C., GONZÁLEZ DE LA ROSA, J. J., y SIERRA-FERNÁNDEZ, J. M.; 2014. Regional wind monitoring system based on multiple sensor networks: A crowdsourcing preliminary test. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 127, pp.51-58.
- AFFLECK, D.L., KEYES, C.R., y GOODBURN, J.M.; 2012. Conifer crown fuel modeling: Current limits and potential for improvement. *West. J. Appl. For.*, 27(4), pp.165-169.
- CAPMA; 2012. Biomasa Forestal en Andalucía. 1. Modelo de existencias, crecimiento y producción. Coníferas.
- CMA; 2007. Mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía. Guía Técnica. Pp208.
- CMA; 2011. Sistema de Información sobre el Patrimonio Natural de Andalucía, SIOSE Andalucía.
- COSTA, P., CASTELLNOU, M., LARRAÑAGA, M., MIRALLES, M., y KRAUS, D.; 2011. La prevención de los grandes incendios forestales adaptada al incendio tipo. *Fire Paradox*. Unitat Técnica del GRAF.
- CRUZ, M.G., ALEXANDER, M.E., y WAKIMOTO, R.H. (2003). Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America. *International Journal of Wildland Fire* 12, pp39-50.
- FINNEY, M. A.; 2006. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. *Fuels management—how to measure success: conference proceedings*. Portland, Oregon. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, pp213-220.
- FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP; 1992. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behaviour Prediction System. *Inf. Report ST-X-3*. Forestry Canada.
- McBRATNEY, A., MENDOCA, M., y MINASNY, B.; 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, pp3-52.
- RODRIGUEZ Y SILVA, F., y MOLINA, J. R.; 2012. Modeling Mediterranean forest fuels by integrating field data and mapping tools. *European Journal Forest Research*, 131 (3), pp 571-582.
- RUIZ-PEINADO R., MONTERO G., y RÍO, M.; 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *For. Syst. (formerly Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales)*, 21, pp42-52.

SCOTT, J.H., y REINHARDT, E.; 2001. Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior. *RP-29*, Fort Collins, Co. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture.

SENRA, F.; 2012. Mantenimiento de sistemas lineales preventivos de defensa contra incendios en áreas forestales mediterráneas mediante la aplicación de quemas prescritas. *Tesis Doctoral*. Universidad de Córdoba.

VAN WAGNER, C.E.; 1977a. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 7, pp23-34.