



**6º CONGRESO FORESTAL
ESPAÑOL**

6CFE01-372

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz



Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Aplicación de modelos de procesos puntuales para la caracterización espacio-temporal del régimen de incendios en el este de España

ARAGÓ, P.¹. SALVADOR², P. JUAN P². DÍAZ-AVALOS³, C. SERRA, L⁴. SÁEZ, M⁴. VARGA, D.⁵ TRILLES, S.⁶ MATEU J.²

¹ Universitat Jaume I

² Departamento de Matemáticas Universitat Jaume I.

³Departamento de Probabilidad y Estadística, Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, Universidad Nacional Autónoma de México

⁴Grup de Recerca en Estadística, Econometria i Salut (GRECS) Universitat de Girona

⁵Grup de recerca de Medi Ambient i Tecnologies de La Informació Geogràfica

⁶Institute New Image Technologies. Universitat Jaume I

Resumen

Las incidencias de los modelos espacio-temporal de los incendios forestales y sus relaciones con las variables meteorológicas, geográficas y usos del suelo son analizadas en este trabajo. Estas relaciones pueden ser tratadas en un incendio forestal como componentes en los modelos de procesos puntuales es decir como actividades separadas. En este trabajo se muestran algunas técnicas para el análisis de modelos espaciales puntuales que están disponibles gracias a los recientes desarrollos de aplicaciones informáticas en los modelos de procesos puntuales. Estos avances permiten realizar un análisis exploratorio de los datos de forma conveniente, ajuste de los datos a un modelo y evaluación del modelo. La discusión de estas técnicas se realiza conjuntamente dentro del contexto de algunos análisis preliminares de una colección de datos que son de un considerable interés por ellos mismos. Este conjunto de datos consiste en los registros de incendios forestales en la provincia de Castellón (años del 2001 al 2006) y Cataluña (2001 al 2008). Los resultados de estos trabajos apuntan a la posibilidad de zonificar las áreas forestales en zonas de mayor o menor riesgo e intensidad de incendio forestal, con lo que se podría planificar las actuaciones preventivas de una forma mas efectiva y acotada.

Palabras clave

Incendio forestal, modelos de procesos puntuales, estadística.

1. Introducción

Hoy en día los incendios forestales son unas de las principales amenazas medioambientales más crecientes a las que nos exponemos y un problema social (ASIAIN Y SEGOVIA 2009). Los incendios forestales que se producen fuera de la dinámica ecológica (NAVEH 1975) conjuntamente con una alteración humana del ecosistema pueden ser un riesgo a tener en cuenta (PAUSAS ET AL. 2008) a la vez que producen daños económicos y sociales, prueba de ello son los grandes incendios acaecidos durante el verano del 2012 (MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENT 2012).

La evolución de los montes españoles hacia un abandono de las actividades selvícolas y aprovechamientos tradicionales de la biomasa ha contagiado a la actividad agrícola, con el abandono de tierras agrícolas, que en muchos casos actuaban de cortafuegos (TÀBARA ET

AL. 2003). Este contexto se agudiza en el marco mediterráneo con altas temperaturas y períodos secos con baja humedad del combustible forestal. A todo esto hay que sumarle otros factores tales como la construcción de segundas residencias en zonas forestales, la proliferación de carreteras, tendidos eléctricos que aumentan el peligro ante grandes incendios forestales (DÍAZ-DELGADO & PONS 2001; MOREIRA ET AL. 2001).

Durante años los investigadores forestales han estado buscando métodos para predecir el comportamiento del fuego y así poder realizar simulaciones que se anticiparan al avance de este (ROTHERMEL 1972; BURGAN & ROTHERMEL 1984; FINNEY 1998; PASTOR ET AL. 2003). Estas herramientas pueden ser utilizadas tanto para la toma de decisiones durante un incendio como para el estudio de cómo se propagaría teóricamente el fuego en un determinado lugar y así poder mejorar las medidas preventivas (DE SARRIÁ SOPEÑA ET AL. 2007), etc. Este artículo viene a proponer un cambio en el enfoque de los modelos de incendios forestales. Sin quitar la importancia a la simulación del comportamiento del fuego, este artículo propone apoyarse en la gran cantidad de datos históricos de incendios para desarrollar un mapa de riesgo de incendios forestales.

A día de hoy hay bastantes estudios de modelos espaciales de riesgo de incendios forestales en diversos puntos del planeta. Sin tratar de ser exhaustivo estos son algunos de los mas recientes trabajos, en América del Norte (CHEN 2007; YANG ET AL. 2008; YANG ET AL. 2008; GEDALOF 2011; GRALEWICZ ET AL. 2012; MIRANDA ET AL. 2012), pero también en la región del Mediterráneo (J.D.A. MILLINGTON 2005; JAMES D.A. MILLINGTON ET AL. 2009; J.D.A. MILLINGTON ET AL. 2010; R. ROMERO-CALCERRADA ET AL. 2010), Asia (Z. LIU ET AL. 2012) y Oceanía (O'DONNELL 2010), entre muchos otros.

Si asociamos los incendios forestales a sus coordenadas espaciales, sus centroides en los casos de estudio que se muestran o preferiblemente a su punto de ignición conjuntamente con otras variables como vegetación, altitud, pendiente, orientación, causa o tamaño es posible identificarlos usando procesos espacio-temporales estocásticos. Estos procesos llamados procesos puntuales espaciales a menudo presentan dependencias entre posiciones e instantes temporales al igual que interdependencias entre unos y otros.

Los procesos espaciales puntuales son modelos estocásticos que describen la localización de los eventos de interés y ocasionalmente cierta información de estos eventos. Los modelos mas comunes son aquellos donde la localización viene señalada por dos dimensiones. Los procesos puntuales univariantes incluyen tan sólo la localización de los eventos; procesos puntuales con marcas (o procesos puntuales marcados) incluyen información adicional de cada evento. Este grupo de datos pueden ser utilizados para responder a una variedad de preguntas. El contexto científico de estas preguntas depende del área de aplicación, pero no obstante pueden clasificarse en tres amplios grupos. Primero, responder a la pregunta de si los puntos se agrupan o se distribuyen de forma regular o aleatoria. Un segundo grupo de preguntas se puede referir a las relaciones entre los diferentes grupos de eventos en los procesos marcados o procesos con marcas (variables tomadas tan sólo en la localización del incendio, tales como área quemada, causa del incendio o año del incendio). El tercero y último grupo de preguntas se centra en la densidad (número de eventos por unidad de área).

Normalmente tiene un mayor interés detectar la tendencia de la intensidad de las localizaciones de los incendios (por ejemplo: Probabilidad de ocurrencia) y determinar cómo (o cuándo) esas tendencias tienen una influencia de las covariables observadas en cada localización de la ventana espacial. Estas covariables pueden incluir vegetación, uso del suelo o otros descriptores del terreno (tales como elevación, pendiente u orientación) y otras tales como proximidad a zonas habitadas o relacionado con la actividad humana (carreteras y vías férreas). La interacción entre puntos generalmente pueden ser interesantes por sí mismas. No obstante, tiene mayor importancia la presencia de una interacción en la inferencia estadística concerniente a las tendencias y sus dependencias de las covariables. El clustering o agrupamiento temporal de los incendios forestales, cuando derivan de múltiples puntos de ignición por rayos, pirómanos (BUTRY & PRESTEMON 2005) otras fuentes, combinadas con contextos favorables de combustible y condiciones ambientales, pueden forzar a la supresión de la racionalidad a lo largo del espacio. La agrupación espacial también puede indicar la presencia de factores de riesgo.

2. Objetivos

El objetivo de las investigaciones llevadas a cabo es demostrar la viabilidad y capacidad de los modelos espacio-temporales para la creación de herramientas útiles en la prevención de incendios forestales. Dentro de este objetivo general están los objetivos particulares de cada tramo de investigación que son: Primero, evaluar las diferencias en los agrupamientos en cuanto a las marcas, en particular los años y la causa del incendio. Segundo, analizar las diferencias de las covariables respecto a la intensidad de la localización de los incendios o del suelo, pendiente, orientación, sombreado y las tendencias en localización de los incendios forestales. Finalmente construir unos mapas de riesgo de incendios forestales y probar la funcionalidad de esta metodología para su uso y distribución mediante las infraestructuras de datos espaciales.

3. Metodología

La metodología aplicada es el tratamiento de los datos históricos mediante modelos de procesos puntuales en los que se tiene en cuenta un número de variables y covariables. El resultado del modelo es un mapa de riesgo de incendio forestal.

Si asociamos los incendios forestales a sus coordenadas espaciales, sus centroides este caso de estudio o a su punto de ignición conjuntamente con otras variables como vegetación, altitud, pendiente, orientación, sombreado causa o tamaño es posible describirlos usando procesos espacio-temporales estocásticos.

Una vez probada la aproximación estadística para la realización de mapas de riesgo de incendios forestales como se describe más adelante se puede proceder a su integración en una herramienta informática, con esta finalidad se utilizó el estándar WPS (Web Processing Service), estos procesos han sido diseñados por la Open Geospatial Consortium (OGC) para estandarizar la forma de ofrecer cálculos geoespaciales a través de servicios de Internet. Este estándar proporciona reglas para describir cualquier cálculo (proceso), así como la forma de realizar peticiones al servicio y la respuesta que ofrece. La especificación de los WPS fue publicada por OGC en 2004 y en 2007 la versión 1.0.0 (SCHUT 2007). Un WPS proporciona acceso a operaciones o cálculos de datos geoespaciales, de distinta complejidad, mediante un standard.

Servicios Web como interfaces, pueden contener operaciones para tratar datos vectoriales como matriciales, provenientes de la red o del propio servidor.

Datos

Se han analizado los patrones espacio-temporales producidos por los incendios forestales en Cataluña y Castellón. El número total de incendios que se han utilizado en el área de Cataluña son 3083 en el período comprendido entre el 2001-2008, 37 incendios para la zona de Castellón del año 2001 al 2006. En todos los incendios el punto seleccionado fue el centroide del perímetro del incendio forestal. No obstante para una mejor salida de los resultados sería mejor poder trabajar con el punto de ignición del incendio forestal. Desgraciadamente no se pudo disponer de esta información. Cabe señalar que los datos de Castellón fueron los utilizados para desarrollar la funcionalidad de cálculo de mapas de riesgo mediante un proceso WPS.

Las variables que son tomadas tan sólo en la localización de los incendios son las llamadas marcas. En este artículo las marcas incluyen el año del incendio (2001-2008) para Cataluña y la causa del incendio (clasificado como; negligencia y accidente, intencionado, causa desconocida o reactivación).

Las covariables espaciales han sido también consideradas, en particular tres covariables continuas, pendiente, orientación y sombreado de la pendiente (tan sólo para Cataluña) y una variable categórica que es el uso del suelo. El uso del suelo obviamente afecta a la incidencia de los incendios forestales, pero además también las variables topográficas (pendiente, orientación y sombreado de la pendiente) afectan no sólo al combustible y a su combustibilidad (ORDÓÑEZ ET AL. 2012) sino también los efectos en las condiciones climáticas o los vientos dominantes locales. De hecho Dillon (DILLON ET AL. 2011) apunta a que las variables topográficas pueden ser relativamente más importantes como predictores de la severidad de los incendios forestales que las variables climáticas.

La pendiente es el grado de inclinación del terreno respecto a la horizontal. En este artículo, la pendiente para una localización concreta se ha calculado como el máximo rango de cambio de elevación entre la localización y sus alrededores. La pendiente se ha expresado en grados. La orientación se ha medido en grados en sentido de las agujas del reloj de 0 a 360, donde 0 es el norte, 90 es el este, 180 es el sur y 270 es el oeste. El sombreado es una técnica que usa la visualización del terreno teniendo en cuenta el relieve y una fuente de luz hipotética que crea un sombreado. Esta técnica se ha utilizado tan sólo para los datos de Cataluña, donde los valores de cada celda se determinan en función de la orientación del terreno respecto a la fuente de luz. Respecto a las variables de uso del suelo, se han empleado los datos del CORINE (Coordination of Information Environment). Se ha optado por estos datos por poder usar la misma fuente de datos para toda la Unión Europea en caso de querer replicar los resultados en otras localizaciones. En este artículo se han usado los datos del CORINE land cover mapa para el año 2006 (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY 2007). Los datos están a una escala de 1:100000 con una unidad cartografiada mínima de 25 ha. Los elementos lineales cartografiados son aquellos con un tamaño de al menos 100 m. La base de datos incluye 44 categorías, de acuerdo con la nomenclatura estándar Europea, organizado en 5 grandes grupos: Superficies artificiales, zonas agrícolas, zonas forestales, zonas seminaturales, zonas húmedas y aguas continentales (HEYMANN ET AL. 1994). Se han reclasificado los usos del suelo para estos trabajos en diez categorías: coníferas, bosques densos, pastos, frutales, zonas artificiales no agrícolas, zonas agrícolas, zonas forestales de

transición, matorrales, zonas naturales de pastos, bosques mixtos, zonas urbanas, playas, arenales, rocas, zonas quemadas y aguas continentales.

Para poder modelar la dependencia de los modelos puntuales con las covariables espaciales se requieren varias cosas. Primero, las covariables deben ser cuantitativas y observables en cada localización de la ventana (por ejemplo: pendiente, orientación y sombreado). Estas covariables pueden ser valores continuos o factores (como por ejemplo uso del suelo). Segundo, los valores de las covariables debe estar disponible para cada punto del modelo de puntos. Tercero, los valores en otros puntos de la ventana tienen que estar disponibles.

Clasificación del riesgo en Cataluña mediante geostatística

El más simple de todos los modelos de procesos puntuales es el de proceso de intensidad constante de Poisson, conocido más frecuentemente como el “complet spatial randomness” (CSR). En este modelo, los puntos de los modelos espaciales son estocásticos e independientes. La naturaleza del fenómeno que se está estudiando o la observación de las gráficas de los datos normalmente muestra de forma obvia cuando el CSR no es una opción realista.

La naturaleza del comportamiento de los modelos de puntos puede hacer pensar que se comprende de dos componentes, tendencia y dependencia, o interacción entre dos puntos del modelo. La manifestación más sencilla de la citada interacción consiste en cualquier atracción (agregación o clustering) o repulsión (regularidad) en el modelo. Un paso útil para el análisis de los modelos puntuales es la aplicación gráfica de herramienta que revela la información así como la naturaleza de la interacción. Una herramienta ampliamente extendida para la exploración de la interacción es la función K de Ripley (RIPLEY 1976; RIPLEY 1977; CRESSIE 1993; P. J. DIGGLE 2003).

La idea básica en la interpretación de la función K es que la constante de intensidad del proceso Poisson (un proceso que expone el CSR) tiene una función K igual a $K(r)=\pi r^2$. Si hay una atracción (con un impacto sobre la distancia r, el radio circundante del dominio), entonces K(r) es mayor de lo que sería bajo CSR. De forma inversa, si hay una repulsión, entonces K(r) es menor de lo que sería bajo CSR.

Los modelos espaciales estudiados son el Proceso de Poisson, el Proceso de Thomas, Proceso Área Interacción, Inferencia estadística y análisis de la segregación espacial. Puede ampliarse la información geostatística de este artículo en el siguiente enlace http://figshare.com/articles/Aplicación_de_modelos_de_procesos_puntuales_para_la_caracterización_espacio_temporal_del_régimen_de_incendios_en_el_este_de_España_a_provincias_de_Castellón_y_Girona_/661617

Clasificación del riesgo en Castellón mediante servicio WPS

Tal y como se ha comentado anteriormente se ha utilizado el interfaz estándar Web Processing Service (WPS) de la OGC. Esta interfaz mejora la interoperatividad del procesamiento en infraestructuras de datos espaciales basadas en estándares internacionales. Esto quiere decir que este proceso se puede ejecutar en cualquier software que implemente este estándar, permitiendo encadenar WPS ya definidos para construir uno de nuevo. De las implementaciones de código abierto existentes del estándar se ha reutilizado la ofrecida por 52North.

Para agilizar y facilitar el uso de esta herramienta se ha optado por definir las entradas en el formato ESRI shapfile. Estas entradas son: contorno, punto incendio, pendiente, usos del suelo, orientación, elevación. Todas las capas de entrada deben ser puntos. Por último tan sólo queda definir el método estadístico que se quiere ejecutar. Las entradas al proceso WPS quedarían como muestra la Figura 1.

La salida del proceso es en dos formas, una con los resultados georeferenciados utilizando el formato KML. En el formato KML se devolverán los resultados para cada uno de los métodos de entrada seleccionados. La segunda salida es una gráfica donde se muestra el ajuste del modelo estadístico a los datos de entrada. Esto permite apreciar el ajuste de cada uno de los modelos aplicados.

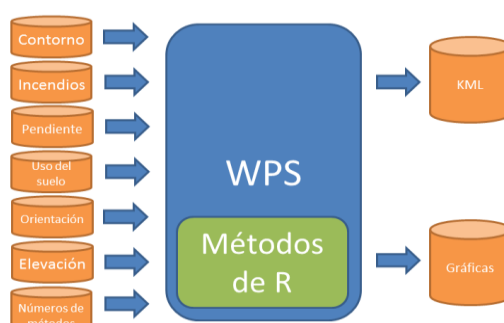


Figura 1: Entradas y salidas del sistema.

Como se ha descrito anteriormente es necesario aportar todas las capas necesarias en formato shp. Esto requiere cierto trabajo previo, en algunos casos, de preparación de los datos ya que es necesario transferir información que puede estar en formato raster a puntos. Las pruebas se realizaron tan sólo para la provincia de Castellón.

4. Resultados

Clasificación del riesgo en Cataluña mediante geostatística

Para modelar el comportamiento de los incendios forestales se han usado tres diferentes modelos para cada año y causa. Inicialmente, se ha introducido de forma individual cada una de las covariables (pendiente, orientación, sombreado, uso del suelo). En cada uno de los modelos, no obstante, debido al gran número de modelos resultantes para todas las posibles combinaciones se decidió centrarse tan sólo en cuatro covariables conjuntas, al cubrir éstas los resultados individualizados dando una información generalizada.

Descartando los modelos homogéneos, ya que la intensidad es claramente variable en el caso de la modelización de incendios forestales, se empezó con el modelo más simple, el proceso no homogéneo de Poisson. Se procedió seguidamente con el proceso de modelo agrupado, específicamente el proceso Thomas, y finalizando con el proceso puntual de área-interacción. En total 60 modelos se ajustaron a los datos. Entre ellos, y en concordancia con el ajuste del modelo observado en la distribución espacial de los incendios forestales. Se seleccionaron los 20 mejores modelos. Es interesante hacer constar que el proceso Thomas se ajustó tan sólo a los incendios forestales de causas naturales para prácticamente todos los años

de estudio de la zona de Cataluña (a excepción del 2007). Hacer constar que el modelo de área-interacción muestra ser claramente mejor que los otros dos modelos. Este modelo se ajusta bien en la mayoría de los casos, pero no a los intencionados. El resultado de estimar los 20 mejores modelos se muestra en la Tabla 1 y la simulación de las envolventes del área de ajuste en la Figura 2.

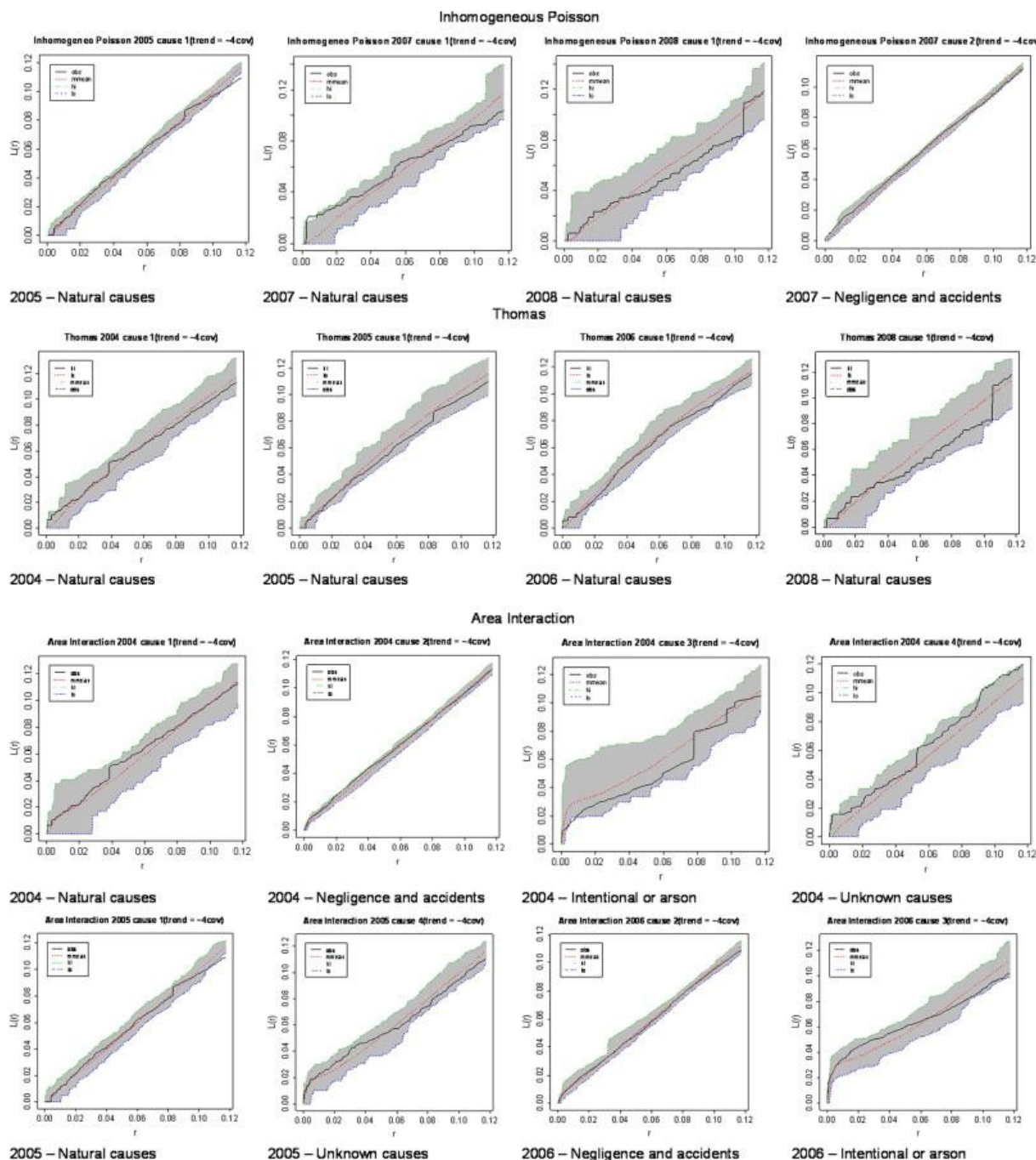


Figura 2: Simulación de las envolventes de los 20 modelos con mejor ajuste en la estimación de la distribución espacial de los incendios forestales.

Se realizó un segundo filtro para seleccionar los modelos teniendo en cuenta el criterio de información de Akaike (AIC). Como es conocido, este criterio mide la bondad del ajuste del modelo en cuestión y es por lo tanto una herramienta efectiva para la comparación de modelos. Cuanto menor es el AIC, mejor es el modelo (en cuanto a bondad de ajuste). Tan sólo se usó el criterio del AIC para estos dos últimos modelos, Tabla 1. En estos casos, había

una pequeña diferencia generalizada entre los dos modelos analizados, excepto para aquellos incendios con causa de negligencia o accidentes en el año 2007 (para los datos de Cataluña), donde el modelo Poisson tiene el menor AIC.

Tabla 1: AIC de los mejores modelos Poisson y Área-interacción (mismo año y causa)

		AIC	
		Poisson	Area-interaction
2005	Causa 1	-1023.863	-1025.464
2007	Causa 1	-386.7365	-386.2792
2007	Causa 2	-3512.036	-735.2788

El análisis de la segregación espacial se muestra en la Tabla 2. Las cuatro probabilidades causa-especifica muestran la gran variación espacial para los cuatro años usando aleatoriamente 999 simulaciones reetiquetando las causas de incendios forestales en el caso de los tests de Monte Carlo para ambos, segregación espacial y cambios temporales, se rechazó la hipótesis nula en cada uno de los años y causas, respectivamente.

Tabla 2: Análisis de la segregación espacial.

	2004	2005	2006	2007	2008	Test Monte Carlo para cambios temporales y segregación espacial
dades específicas de causa						
Causa Natural	0.44982-5.353e-07	0.44781-1.262e-07	0.27130-0.00245	0.42920-0.00523	0.34484-0.05102	34
Negligencia o accidentes	0.52385-2.719e-05	0.91912-0.01334	0.89029-0.00814	0.26738-0.00135	0.37881-0.00833	2
Intencionado o pirómano	0.88786-0.31920	0.69422-0.00056	0.81789-0.01535	0.43960-0.00011	0.81901-0.17470	21
Desconocido y reavivado	0.47607-9.673e-06	0.46596-0.00674	0.55427-0.00300	0.88825-0.35331	0.39663-0.01364	44
Teste Monte Carlo para la segregación espacial	2	12	3	2	20	

Se puede observar como hay una gran variabilidad en la estimación de los efectos de las variables en la intensidad para todas las causas, años y los modelos de procesos puntuales que finalmente se ajustaron (ver Figura 3). Como resultado, la intensidad condicional debería variar en concordancia

Finalmente, se calcula la intensidad condicionada para los modelo puntuales espaciales, evaluando cada localización espacial para el ajuste del modelo. Nuestro interés es el uso de las intensidades para construir mapas de riesgo de incendios por año y causa de ignición 3, con la finalidad de poder aportar una herramienta para la gestión de los niveles de vulnerabilidad. Aquí se muestran tan sólo los mapas correspondientes a los mejores modelos (en término de bondad de ajuste) como por ejemplo: Area-interaction con la excepción de causas naturales en el 2006, donde el único modelo fue del proceso de Thomas, y el de negligencias y accidentes en 2007, construido a partir del modelo de Poisson, (los resultados no mostrados en este artículo pueden ser pedidos a los autores).

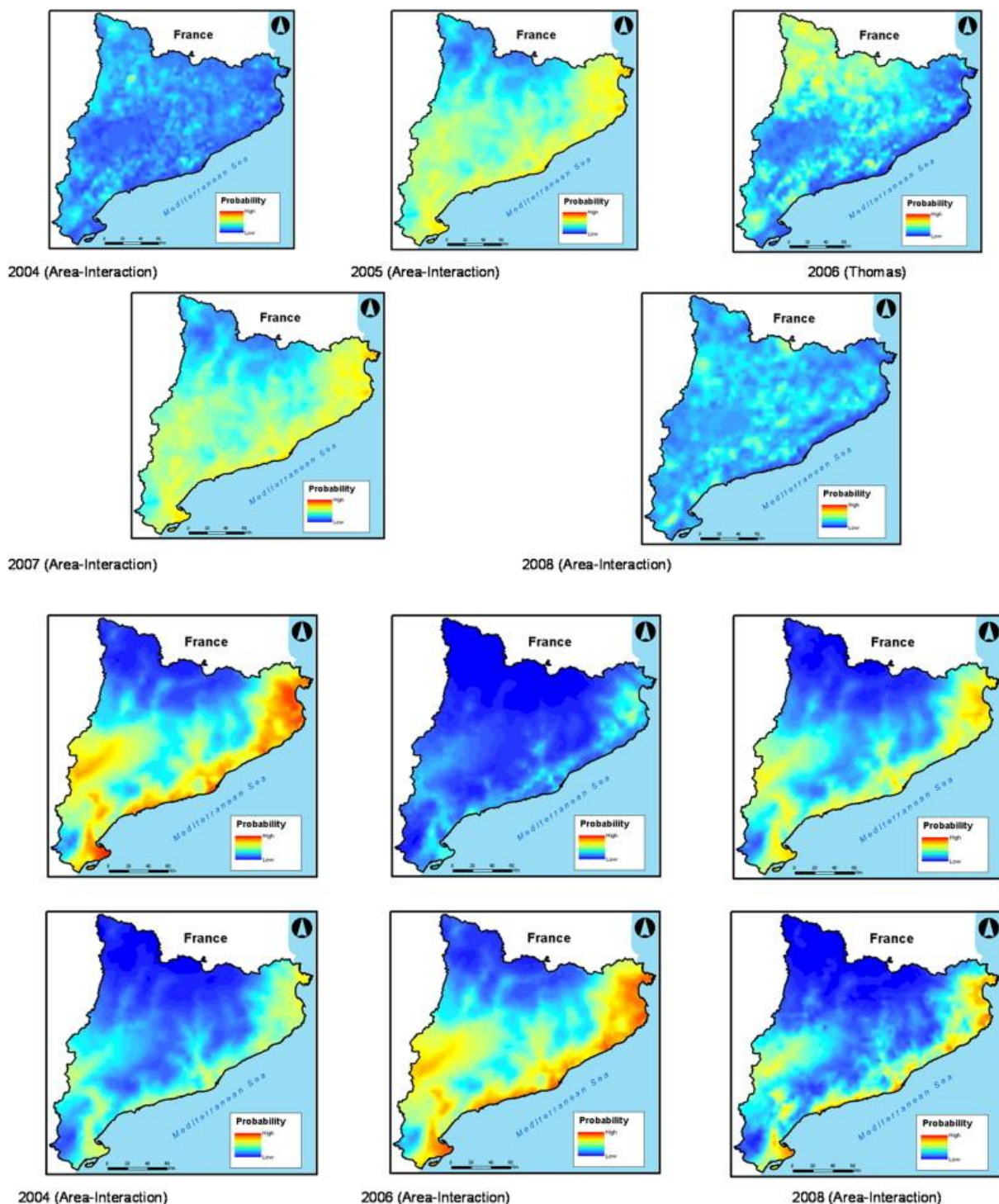


Figura 3: Mapas de riesgo de incendios por año y causa de ignición.

Con algunas excepciones (causas desconocidas y reactivaciones en 2004 y 2005, y causas naturales en 2005 y 2007) el riesgo para cada causa varía a lo largo de los años. Observar que de forma general, el riesgo para causas naturales en particular y en menor medida para causas desconocidas y reactivaciones no fue demasiado alto, mientras que para negligencias y accidentes (2004 y 2007) e intencionadas o pirómanos (2006 y 2008) el riesgo alcanzó niveles cercanos a los máximos en algunas áreas, principalmente en las zonas costeras y zonas urbanizadas.

Es en los incendios forestales atribuidos a causas naturales dónde se encontró una mayor variabilidad: cada año es completamente diferente respecto al resto. Esto puede ser debido a que los incendios forestales por causas naturales no están asociados a la presencia de actividad humana al estar ésta más localizada (áreas antropizadas) en el territorio.

Por otro lado están las causas antropológicas, se ve claramente el patrón en las zonas costeras (Barcelona y la costa Brava) dónde los incendios se dan principalmente en los meses de Julio y Agosto.

Clasificación del riesgo en Castellón mediante servicio WPS

Para unas capas geomorfológicas (altitud, orientación, pendiente) y uso del suelo se definió una malla de puntos distanciados cada 200 metros. Esta provincia por su tamaño tiene un coste computacional entre 42 segundos y 2 horas.

El resultado de salida es un KML que contiene una malla de puntos de la misma densidad que las capas de entrada (exceptuando los incendios) con la predicción de riesgo para cada uno de los modelos. El KML generado tiene para cada punto asociado un extendedData con los valores para cada uno de los modelos en que se ha ejecutado el proceso.

El KML puede ser cargado en un GIS de escritorio para generar unos mapas con una clasificación por colores que ayude a la interpretación de los resultados. Como ejemplo se ha realizado un mapa dividido en 20 clases utilizando el método de división por cuartiles. El mapa de riesgo representado en la Figura 4 muestra el resultado del método área-interacción.

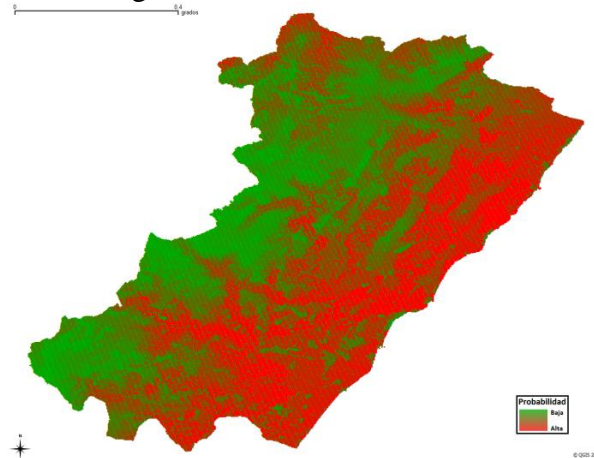


Figura 4: Mapa de predicción de riesgo del método Area Interaction con todas las covariables.

5. Discusión y Conclusiones

El estudio tiene tres hallazgos. Primero, la extensión de los grupos en los incendios forestales difiere a lo largo de las marcas, por ejemplo: años y causa del incendio forestal. Segundo, covariables como el uso del suelo, pendiente, orientación y sombreado tienen una influencia en la tendencia de la intensidad de la localización de los incendios forestales. Finalmente se han construido mapas de riesgo de incendio forestal por año y causa de ignición para los modelos estimados.

Con respecto al primer hallazgo, se concluye que, a pesar de la variabilidad encontrada entre las marcas, especialmente en el tiempo, el modelo que mejor se ajusta al comportamiento de incendios forestales para la mayoría de los años y causas, es el modelo de proceso puntual área-interacción. Este resultado es interesante porque nos permite extender el estudio hacia la modelización espacio-temporal permitiendo una mejora en la predicción del riesgo de incendio

Con respecto al segundo hallazgo, el análisis debería ser más completo, usando otras covariables como por ejemplo el combustible (presente en las localizaciones del incendio), inflamabilidad, proximidad a carreteras o puntos habitados y factores económicos como el precio de la tierra, pérdida económica o valor económico. Por otro lado, puede resultar interesante la introducción de algunas covariables meteorológicas como la temperatura, precipitación, viento o humedad del combustible.

Puntualizar que tan solo se ha modelizado la componente espacial dejando fuera la componente temporal. Esto implica la necesaria mejora en los esfuerzos de modelización. Estos esfuerzos deben ir dirigidos a la incorporación del tiempo en el propio modelo, considerando por lo tanto los modelos de procesos puntuales espacio-temporales. Algo positivo de esta aproximación es el poder modelizar y evaluar la interacción espacio-temporal, algo que no se ha considerado en este artículo. En el contexto de la modelización espacio-temporal, una aproximación útil es intentar modelizar la función intensidad espacio-temporal como una forma aditiva o multiplicativa de la intensidad espacial y temporal, y después añadir una componente espacio-tiempo residual (por ejemplo (P. DIGGLE ET AL. 2005)). Esto puede, probablemente, proporcionar mayor percepción del problema de la modelización de incendios forestales.

Con respecto al tercer hallazgo, se realizaron mapas que pueden ayudar a las autoridades a realizar planes para la prevención de incendios forestales, predecir zonas de riesgo de incendios de una forma más eficiente, realizar campañas de aviso más eficientes y mejorar la efectividad de las inversiones en prevención. De hecho si se entiende la prevención como una predicción de escenarios donde se pueden producir grandes incendios forestales, los mapas aquí realizados pueden ayudar a planificar medidas sobre el terreno, en términos de gestión de la prevención y gestión de los incendios forestales, identificando cada uno de los componentes de los incendios forestales a lo largo de los años. No obstante cabe destacar que estos mapas funcionan mejor cuando se trata de causas antrópicas.

La metodología utilizada no ha permitido cuantificar y estimar la posible relación entre la distribución del riesgo y las causas de ignición. Los resultados pueden ser útiles en la gestión de los incendios forestales y en la planificación de la toma de decisiones. Los métodos mostrados en este artículo pueden contribuir a la prevención y la gestión de los incendios forestales, los cuales no son aleatorios en el espacio o el tiempo tal y como se ha mostrado en este artículo.

Para facilitar el uso de los modelos de procesos puntuales por los gestores forestales se ha implementado un servicio de procesamiento que mejora la interoperabilidad, implementado con interfaz estándar OGC WPS, que pone al alcance de todo el mundo unos modelos de predicción de riesgo de incendios y lo hace accesibles mediante servicio Web.

No obstante dependiendo de la de la cantidad de información que se utiliza para generar los mapas de riesgo los resultados se pueden obtener en un intervalo de tiempo de minutos a

horas. Hay que señalar que el WPS proporciona datos de forma relativamente rápida teniendo en cuenta el volumen de los datos.

Esta aproximación para la integración de modelos científicos en geoprocesamiento distribuido, facilita su despliegue en infraestructuras de datos espaciales ayudando a que podamos compartir dichos modelos y facilitar el uso.

Se ha mostrado como es posible mediante la gran colección de información sobre los incendios forestales que poseen las comunidades autónomas realizar unos mapas de riesgo bajo una aproximación geoestadística. Estos mapas de riesgo ofrecen la ventaja de incluir la causalidad por lo que señalan aquellas zonas donde el hombre es un factor preponderante respecto al inicio de un incendio forestal. La complejidad del trabajo con los modelos de procesos puntuales se ha reducido mediante el empleo de los servicios WPS.

A pesar de los avances mostrados es necesario seguir trabajando. Los procesos puntuales mostrados no incluyen la variable meteorológica, de gran importancia en los incendios forestales, por lo que es necesario seguir investigado para encontrar el modo de incluir esta covariable tan compleja de tratar. Respecto al servicio WPS este puede mejorarse tratando de facilitar los formatos de entrada así como ampliar las salidas gráficas.

6. Agradecimientos

Al Servicio de Prevención de Incendios Forestales del Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña por facilitar el acceso a los datos espaciales de los incendios forestales. A Jorge Suarez Torres jefe de la Sección de Prevención de incendios forestales por su desinteresada colaboración y a la Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente de la Generalitat Valenciana por la cesión de los datos de incendios forestal.

7. Bibliografía

ASIAIN, A. Y SEGOVIA, E., 2009. Incendimetro 2009: Bosque en peligro frente al cambio climático, WWF España.

BURGAN, R.E. Y ROTHERMEL, R.C., 1984. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system--FUEL subsystem, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden: U. S. Department of Agriculture, Forest Service.

BUTRY, D.T. Y PRESTEMON, J., 2005. Spatio-Temporal Wildland Arson Crime Functions. In American Agricultural Economics Association Annual meeting. Selected paper 136767. Providence, USA, p. 26.

CHEN, X., 2007. Spatial pattern of wildfire occurrences in Alabama, USA. International Journal of Environmental Studies, 64(2), pp.229–242.

CRESSIE, N.A.C., 1993. Statistics for spatial data Rev. ed., New York: Wiley.

DÍAZ-DELGADO, R. Y PONS, X., 2001. Spatial patterns of forest fires in Catalonia (NE of Spain) along the period 1975-1995 analysis of vegetation recovery after fire. Forest Ecology and Management, 147(1), pp.67–74.

DIGGLE, P.J., 2003. *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns* 2nd ed., Hodder Education Publishers.

DIGGLE, P., ROWLINGSON, B. Y SU, T.-L., 2005. Point process methodology for on-line spatio-temporal disease surveillance. *Environmetrics*, 16(5), pp.423–434.

DILLON, G.K., HOLDEN, Z.A., MORGAN, P., CRIMMINS, M.A., HEYERDAHL, E.K. AND LUCE, C.H., 2011. Both topography and climate affected forest and woodland burn severity in two regions of the western US, 1984 to 2006. *Ecosphere*, 2(12), p.130.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2007. CLC2006 Technical Guidelines.

FINNEY, M.A., 1998. FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation.

GEDALOF, Z., 2011. Climate and spatial patterns of wildfire in North America. *The Landscape Ecology of Fire. Ecological Studies*, 213, p.89.

GRALEWICZ, N.J., NELSON, T.A. Y WULDER, M.A., 2012. Spatial and temporal patterns of wildfire ignitions in Canada from 1980 to 2006. *International Journal of Wildland Fire*, 21(3), pp.230–242.

HEYMANN, Y., STEENMANS, C., GROISSILLE, G. Y BOSSARD, M., 1994. CORINE Land Cover. Technical Guide.

LIU, Z., YANG, J., CHANG, Y., WEISBERG, P.J. Y HE, H.S., 2012. Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China. *Global Change Biology*, 18(6), pp.2041–2056.

MILLINGTON, JAMES D.A., WAINWRIGHT, J., PERRY, G.L.W., ROMERO-CALCERRADA, RAUL Y MALAMUD, B.D., 2009. Modelling Mediterranean landscape succession-disturbance dynamics: A landscape fire-succession model. *Environmental Modelling & Software*, 24(10), pp.1196–1208.

MILLINGTON, J.D.A., 2005. Wildfire risk mapping: considering environmental change in space and time. *Journal of Mediterranean Ecology*, 6(1/4), pp.34–32.

MILLINGTON, J.D.A., WALTERS, M.B., MATONIS, M.S. Y LIU, J., 2010. Effects of local and regional landscape characteristics on wildlife distribution across managed forests. *Forest Ecology and Management*, 259(6), pp.1102–1110.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENT, 2012. Avance informativo incendios forestales 1-enero a 31 Octubre 2012,

MIRANDA, B.R., STURTEVANT, B.R., STEWART, S.I. Y HAMMER, R.B., 2012. Spatial and temporal drivers of wildfire occurrence in the context of rural development in northern Wisconsin, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 21(2), pp.141–154.

MOREIRA, F., REGO, F.C. Y FERREIRA, P.G., 2001. Temporal (1958–1995) pattern of change in a cultural landscape of northwestern Portugal: implications for fire occurrence. *Landscape Ecology*, 16(6), pp.557–567.

- NAVEH, Z., 1975. The evolutionary significance of fire in the mediterranean region. *Vegetatio*, 29(3), pp.199–208.
- O'DONNELL, A.J., 2010. Spatial and temporal patterns of wildfires in semi-arid south-western Australia. Thesis (Ph.D.)--University of Western Australia, 2011. Australia: The university of Western Australia.
- ORDÓÑEZ, C., SAAVEDRA, A., RODRÍGUEZ-PÉREZ, J.R., CASTEDO-DORADO, F. Y COVIÁN, E., 2012. Using model-based geostatistics to predict lightning-caused wildfires. *Environmental Modelling and Software*, 29(1), pp.44–50.
- PASTOR, E., ZÁRATE, L., PLANAS, E. Y ARNALDOS, J., 2003. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(2), pp.139–153.
- PAUSAS, J.G., LLOVET, J., RODRIGO, A. Y VALLEJO, R., 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? – A review. *International Journal of Wildland Fire*, 17(6), pp.713–723.
- RIPLEY, B.D., 1977. Modelling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 39(2), pp.172–212.
- RIPLEY, B.D., 1976. The Second-Order Analysis of Stationary Point Processes. *Journal of Applied Probability*, 13(2), p.255.
- ROMERO-CALCERRADA, R., BARRIO-PARRA, F., MILLINGTON, J.D.A. Y NOVILLO, C.J., 2010. Spatial modelling of socioeconomic data to understand patterns of human-caused wildfire ignition risk in the SW of Madrid (central Spain). *Ecological Modelling*, 221(1), pp.34–45.
- ROTHERMEL, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden: U. S. Forest Service.
- DE SARRIÁ SOPEÑA, S., YEBRA VALVERDE, R.T. Y MENDOZA DOMÍNGUEZ, P., 2007. Sistema Integrado para la Gestión y Dirección de Incendios Forestales en Andalucía (SIGDIF). In 4th International Wildland Fire Conference, Wildfire 2007. Sevilla, Spain.
- SCHUT, P. ED., 2007. OpenGIS® Web Processing Service.
- TÀBARA, D., SAURÍ, D. Y CERDAN, R., 2003. Forest Fire Risk Management and Public Participation in Changing Socioenvironmental Conditions: A Case Study in a Mediterranean Region. *Risk Analysis*, 23(2), pp.249–260.
- YANG, J., HE, H.S. Y SHIFLEY, S.R., 2008. Spatial controls of occurrence and spread of wildfires in the Missouri Ozark highlands. *Ecological Applications*, 18(5), pp.1212–1225.