



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-386

---

---

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Aproximación metodológica para modelización econométrica de la productividad en la extinción de incendios forestales

RODRÍGUEZ Y SILVA, FCO.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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. Correo electrónico: ir1rosif@uco.es

### Resumen

La importancia de lo que se protege frente al avance del fuego en términos no sólo ecológicos y ambientales, sino en aspectos económicos, empieza a ser considerado en la actualidad un factor de gran importancia. En efecto, la importancia de la evaluación cuantitativa de las pérdidas económicas que el impacto de los incendios forestales genera en los recursos naturales, tanto en los de naturaleza tangibles como intangibles, ha de ser considerada como un factor de extraordinaria importancia en el balance analítico de la eficacia de un determinado programa de protección frente a los incendios forestales. La cuestión no resulta fácil, ya que la búsqueda de modelos de ayuda a la toma de decisión basados en la obtención econométrica de adecuadas funciones de producción, necesita de la correcta selección de variables que definen, interaccionan y determinan el problema. El presente trabajo incluye las principales consideraciones metodológicas para la definición y desarrollo de un modelo econométrico de producción de las operaciones de extinción, las variables a considerar, la opción de diseño econométrico escogido y la aplicabilidad del modelo en términos de uso en el campo de la gestión por parte de las administraciones con responsabilidades en la prevención y extinción de incendios.

### Palabras clave

Rendimientos, eficiencia, productividad, costes de extinción, modelización, combinación de recursos.

### 1. Introducción

Sociedad, paisajes forestales e incendios, constituyen un triángulo de interacción con importantes requerimientos y consecuencias. La muy alta causalidad de carácter antrópico en el origen de los incendios (95%) en áreas mediterráneas, pone manifiesto la intensidad en dicha interacción que por una parte, ha de ser entendida en relación con los efectos e impactos derivados de la ocurrencia, pero que por otra recoge la interdependencia que la sociedad en términos culturales y ambientales mantiene de forma bidireccional con los paisajes forestales. Indiscutiblemente dichas relaciones de interdependencias ofrecen un campo para la aplicación y desarrollo de investigaciones con claro enfoque de ciencias sociales, en las que la gestión preventiva, el análisis del riesgo y los condicionantes socioeconómicos se conforman como pilares básicos. Sequedad ambiental, efectos derivados del cambio climático y las consecuencias de una muy generalizada política de exclusión de fuegos, agravado por una incontrolada expansión urbanística en las áreas de contacto, con ausencia de normas de carácter preventivo y bajo escenario de elevado riesgo de incendios forestales, está generando que el desarrollo espacial de los incendios forestales, afecten a la vida y las propiedades de los ciudadanos. En este sentido, la preocupación de las autoridades por el control de este tipo de emergencias es creciente, destinándose fuerte inversiones presupuestarias a la prevención y extinción.

Las principales líneas de investigación desarrolladas desde mediados del primer cuarto del siglo XX hasta la actualidad, han permitido conceptualizar la problemática de la ocurrencia de los incendios forestales, no sólo en términos físicos, ecológicos, paisajísticos o tácticos y estratégicos, sino que los conocimientos adquiridos por la ciencia asociada al estudio de los fuegos forestales, definen una dimensión de mayor envergadura con una muy clara naturaleza de índole socioeconómica. Es decir, la envolvente de las investigaciones cobra a modo globalizador una visión de fuerte interacción social y económica, por su trascendencia e implicaciones en el papel que juegan la población y el paisaje al que la misma pertenece. Si bien las líneas anteriores aportan una información de partida para identificar los avances del conocimiento en los programas de defensa contra incendios forestales, no en todas se han producido los mismos niveles de profundización. Por el contrario, áreas muy complejas relacionadas con la operaciones de supresión y control de incendios forestales, se vienen manifestando altamente dificultosas para el desarrollo de investigaciones. En efecto, la dificultad para el monitoreo de las acciones de combate contra el fuego dadas las características de incertidumbre y complejidad en el movimiento de los medios de extinción en el entorno del fuego, hace que el seguimiento de las acciones de extinción y sus resultados en función de los escenarios, resulte muy complicado cuando se requiere trabajar con estándares de calidad y exactitud en la recogida de datos. Con todo y con ello, la necesidad de avanzar en el conocimiento resulta de extraordinaria importancia, en la medida que de la información recolectada, analizada y evaluada, depende la calidad de la ayuda en la toma de decisión, así como la asignación eficiente de los presupuestos en los programa de defensa contra incendios y manejo del fuego.

De acuerdo con ello, la incorporación de herramientas de naturaleza econométrica, permiten implementar modelos y algoritmos que ayudan a establecer criterios de optimización en la asignación de los presupuestos. En los planteamientos indicados anteriormente, cobra gran importancia la capitalización de la experiencia, ya que del análisis de cómo se gestionaron las operaciones de extinción, los recursos despachados y los costes generados, se puede llegar a modelar el proceso. El análisis de la eficiencia y productividad ofrece interesantes opciones de cara el estudio combinado de los costes de extinción y valoración económica residual de los recursos naturales tras sufrir el impacto del incendio forestal. Permitiendo a partir de los resultados, de una parte analizar y clasificar los resultados obtenidos tras la aplicación operacional de las opciones de extinción acordadas y de otra, obtener la información necesaria para la realización de ajustes en la combinación de los recursos de extinción. Sin duda todo ello ofrece herramientas de carácter objetivo para su aplicación en la planificación económica y en la toma de decisión.

## 2. Objetivos

El objeto del presente trabajo, es realizar una aproximación de carácter metodológico, que permita sentar las bases para abordar estudios y análisis sobre la eficiencia y productividad de las operaciones de extinción de incendios forestales. Para ello se ha considerado de importancia determinar la estructura y naturaleza de la base de datos que, a partir de los registros de los incendios acaecidos en una determinada comarca, permitirán identificar las variables que pueden aportar información de relieve en la modelización econométrica de la productividad vinculada a las operaciones de extinción de incendios forestales.

## 3. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo han sido seleccionados un total de 20 incendios de la base de datos correspondiente al plan INFOCA de Andalucía (2000-2006). A partir de la información disponible relacionada con las condiciones de las operaciones de extinción y siguiendo la metodología de la evaluación de la eficiencia (Rodríguez y Silva, González-Cabán. 2016), se ha obtenido la relación por cada uno de ellos, entre los costes de extinción y el valor económico que, de acuerdo a los planes operacionales establecidos consiguieron salvar de los efectos de la propagación del fuego. La

creación de una base de datos actualizable de planes de ataque con la identificación de las pautas de comportamiento (factores humanos), condiciones ambientales (escenarios de los hechos) y estrategias de combate adoptadas, proporciona la estructura de la “memoria objetiva y de grupo” que da el acceso a las experiencias pasadas, facilitando compartir el conocimiento al nivel de la capitalización o al nivel del rescate y posterior utilización de la información ya reconocida y aprendida, haciendo posible el establecimiento de una "red de transmisión de la experiencia" entre los diferentes responsables de la organización de control y extinción de los incendios forestales. La definición de la experiencia pasa antes de todo, por la investigación de los hechos acaecidos, el análisis y la comprensión de los mismos, ello permite extender posteriormente lo aprendido y reconocido hacia la capitalización, o dicho de otra forma hacia la “memoria objetiva y de grupo” (Rodríguez y Silva et al. 2007). A partir de la generación de la base de datos obtenida a través de la capitalización, se ha de realizar la selección de las variables y parámetros que permitirán estudiar, analizar y evaluar la productividad y eficiencia de las operaciones de extinción. Fundamentalmente deberán ser considerados los siguientes:

- Tasa de producción de línea de fuego extinguida (m/min)
- Factor de contracción superficial ACF, (se entiende como la diferencia entre la unidad y el cociente entre la superficie real afectada por la propagación del incendio y la superficie obtenida en evolución libre, es decir sin operaciones de extinción, sujeta al tiempo transcurrido desde la detección hasta que el incendio es controlado) (Rodríguez y Silva, 2007), (Rodríguez y Silva, y González-Cabán, 2010), (Rodríguez y Silva, y González Cabán, 2016)
- Superficie afectada promedio por incendio forestal registrado (ha/incendio)
- Costes de extinción promedio por superficie afectada, (€/ha)
- Costes unitarios de los medios de extinción
- Rendimientos operacionales por cada medio de extinción
- Cociente entre coste de extinción y cambio neto en el valor de los recursos
- Relación de medios de extinción intervinientes, con especial detalle en la proporción de tiempos individuales de actuación en relación con la suma total de tiempos operacionales de todos los recursos intervinientes por incendio.

La disponibilidad de una adecuada base de datos que incorpore las variables anteriormente indicadas, posibilita los estudios de eficiencia y productividad de los medios de extinción en las acciones dirigidas al control y supresión del fuego en los incendios forestales. En la actualidad la disponibilidad de datos fiables y veraces, que definen y cuantifican las variables anteriormente indicadas, resulta ser escasa, siendo estos datos, complejos de obtener, mantener y alimentar a lo largo del tiempo. Esta realidad es común incluso en los países más avanzados en el desarrollo e implementación de programas de defensa contra incendios forestales. Con todo y con ello, es una línea de trabajo en curso y de gran importancia estratégica de cara a la definición de nuevas herramientas inteligentes de ayuda en la toma de decisión. Los resultados que se obtienen cuando sobre las experiencias derivadas de las operaciones de extinción de incendios, se aplican análisis de eficiencia y productividad, resultan decisivos de cara a la validación o modificación y ajustes de los procedimientos de extinción. En efecto, el análisis objetivo que proporcionan las técnicas de evaluación de la eficiencia, permite la reorganización estratégica con vistas a la mejor combinación de medios de extinción en función de los escenarios de supresión, máxime cuando en la evaluación se consideran costes, rendimientos operacionales y superficie protegida frente al impacto del incendio forestal. La variables que han sido determinadas en el presente desarrollo metodológico en relación con la revisión de las operaciones de extinción han sido recopiladas para cada uno de los 20 incendios de forma tabulada, incluyendo información relacionada con los tiempos empleados para cada medio de extinción y sus correspondientes costes de extinción (tabla 1).

*Tabla 1. Ejemplo de resultados obtenidos para uno de los 20 incendios analizados en relación con los costes de extinción*

| Nº de unidades | Precios            | Tipo de recurso de extinción.<br>Incendio 14.<br>61,69 ha | Coste de extinción € | Tiempo de intervención en minutos | Ponderación   | Numerador Eficiencia |
|----------------|--------------------|---|----------------------|-----------------------------------|---------------|----------------------|
|                | Unitarios € x hora |   |                      |                                   | ( $\beta_j$ ) | Ce*( $\beta_j$ )     |
| 1              | 5245,28            | Avión CL215T  | 28.062,25 €          | 321                               | 0,073         | 2.047,27 €           |
| 2              | 1830               | Helicóptero Bell412                                       | 7.808,00 €           | 128                               | 0,029         | 227,14 €             |
| 1              | 2100,8             | Helicóptero KAMOV K32                                     | 18.031,87 €          | 515                               | 0,117         | 2.110,55 €           |
| 2              | 653,2              | Avión Air Tractor 802                                     | 9.035,93 €           | 415                               | 0,094         | 852,25 €             |
| 4              | 217,49             | Brigada de 12 componentes                                 | 12.251,94 €          | 845                               | 0,192         | 2.352,93 €           |
| 2              | 73,2               | Bulldozer   | 1.115,08 €           | 457                               | 0,104         | 115,82 €             |
| 14             | 138,7              | Brigada de 7 componentes                                  | 25.534,67 €          | 789                               | 0,179         | 4.578,83 €           |
| 8              | 70,86              | Vehículo autobomba  | 8.786,64 €           | 930                               | 0,211         | 1.857,18 €           |
| TOTAL          |                    |   | 110.626,37 €         | 4.400                             |               | 14.141,96 €          |

Por otra parte, para la aplicación metodológica indicada anteriormente, se requiere la evaluación del valor económico de los recursos naturales (tangibles e intangibles) y las pérdidas económicas que de acuerdo al nivel de intensidad energética desarrollada por el fuego se produce en los recursos naturales afectados. 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 et al., 2009). 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 longitud de las llamas, denominada "matriz de depreciación" (Molina et al., 2011; Rodríguez y Silva et al., 2012).

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 que el fuego desarrolla (Kw/m). En este trabajo se ha utilizado el programa informático Visual-Seveif (figura 1) (desarrollado por el Laboratorio de Defensa contra Incendios Forestales de la Universidad de Córdoba), éste se conforma como una herramienta informática que permite trabajar tanto en tiempo real, simulando el desarrollo espacial de fuegos de superficie y de

copa, como abordar la ejecución de estudios territoriales de carácter potencial, mediante los cuales determinar y caracterizar las posibles evoluciones de los incendios, sujetos a condiciones finales de contorno espacial o temporal.

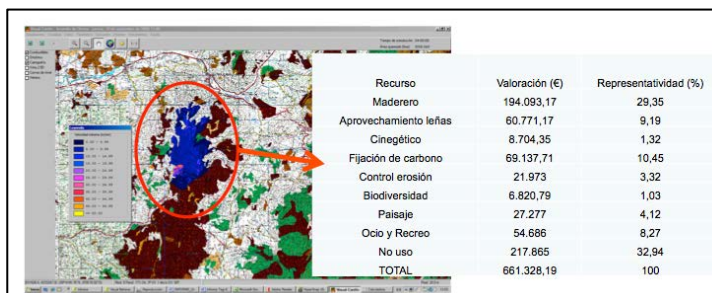


Figura 1. Evaluación económica del impacto del incendio mediante Visual-Seveif

Las posibilidades de importación y exportación de perímetros geo-referenciados, tanto en formatos vectorial como raster, permite fácilmente el volcado de la información generada hacia sistemas de información geográficos (SIG). Visual-Seveif, posibilita la realización de estudios de diagnóstico del territorio dirigidos hacia la prevención y gestión estratégica de la defensa frente a los incendios forestales (Rodríguez y Silva, et al. 2012, 2014). La oportunidad de incorporar el modelo Visual-Seveif en los trabajos de análisis de la eficiencia y de la productividad relacionados con los trabajos de extinción de incendios forestales, se fundamenta en el hecho de que las pérdidas económicas, en términos de euro por hectárea, que se obtienen por evaluación de la suma de daños y perjuicios generados por el incendio forestal en el total de los recursos (tangibles e intangibles), ofrece la posibilidad de interrelacionar dicha información con los costes de extinción derivados de la combinación de medios de extinción despachados para alcanzar la supresión. La aplicación de esta herramienta y sus algoritmos de evaluación econométrica, permite la obtención del valor económico de las pérdidas en la superficie afectada por el incendio. La importación a través del programa informático Visual-Seveif ©, del perímetro final del incendio y la determinación píxel a píxel del comportamiento energético del fuego, proporciona la información base sobre la que se obtiene la depreciación del valor de existencia de los recursos afectados. En este sentido, la diferencia entre el valor inicial y el valor de las pérdidas, representa el valor económico residual o salvado del impacto del fuego. Esta información resulta ser decisiva, ya que a partir de ella, se puede fundamentar el estudio de la eficiencia, al comparar lo salvado con los costes de extinción que la combinación de los medios de extinción ha representado en el incendio en cuestión.

Para este estudio los recursos naturales que han sido considerados como principales en el proceso de evaluación del impacto económico son; madera, leña, frutos, caza, biodiversidad y recreación. Para cada uno de los incendios estudiados se ha generado una tabla resumen que incluye los resultados de la aplicación del programa Visual-Seveif (tabla 2).

Tabla 2. Ejemplo de resultados obtenidos para uno de los 20 incendios analizados en relación con la determinación de las pérdidas económicas y valores salvados.

| Recurso\valor económico (€) incendio 14 | Valor de existencia (€) | Valor de perdidas (€) | Valor salvado (€) | Ponderación (αi) | Valor salvado*(αi) (€) |
|---|-------------------------|-----------------------|-------------------|------------------|------------------------|
| MADERA                                  | 145.879,12              | 56.781,45             | 89.097,67         | 0,641532         | 57.159,02              |



|               |            |            |            |          |           |
|---------------|------------|------------|------------|----------|-----------|
| LEÑA          | 25.426,34  | 11.734,26  | 13.692,08  | 0,09858  | 1.349,87  |
| BIODIVERSIDAD | 25.116,24  | 5.386,75   | 19.729,49  | 0,142058 | 2.802,75  |
| RECREACIÓN    | 45.124,62  | 28.761,24  | 16.363,38  | 0,117821 | 1.927,96  |
| TOTAL         | 241.546,32 | 102.663,70 | 138.882,62 |          | 63.239,60 |

La evaluación de la eficiencia, puede ser analizada siguiendo el método propuesto por Rodríguez y Silva y González-Cabán (2016), a través de un estimador (ET), basado en el valor que se obtiene de restar a la unidad, el cociente entre unos productos (medios combinados de extinción) y unas entradas (valor económico de los recursos afectados). Para establecer una coherencia dimensional, es necesario realizar ajustes en el cociente anterior, para ello se introducen pesos que normalizan la heterogeneidad entre las variables que constituyen la expresión matemática. Así, para el caso de las salidas (diferentes recursos o medios de extinción que han intervenido), los pesos seleccionados ( $\beta_j$ ) (tabla 2), se identifican con la ponderación de tiempos de intervención de cada recurso en relación con el tiempo total transcurrido desde el inicio de las acciones de extinción, hasta que se consigue el control del incendio. Con relación a la variable, “valor económico de cada recurso natural”, la ponderación se consigue introduciendo el parámetro ( $\alpha_i$ ) (tabla 3), que relaciona el valor económico de cada recurso con relación al valor económico total obtenido como suma de los valores económicos de cada uno de los recursos naturales presentes en la superficie afectada por el incendio. De forma cualitativa se puede fijar una clasificación por intervalo, que permite establecer una graduación de la eficiencia (tabla 3):

Tabla 3. Clasificación de la eficiencia

| Intervalo del valor de la eficiencia (ET) | Clasificación cualitativa |
|---|---------------------------|
| $ET < 0,25$                               | BAJA                      |
| $0,26 \leq ET < 0,5$                      | MODERADA                  |
| $0,6 \leq ET < 0,75$                      | ALTA                      |
| $0,8 \leq ET < 1$                         | MUY ALTA                  |

De forma complementaria y con miras a la determinación de la frontera estocástica de gran utilidad en el análisis de la eficiencia. Se determinó por cada uno de los 20 incendios, el “Factor de Contracción Superficial”, (se entiende como la diferencia entre la unidad y el cociente entre la superficie real afectada por la propagación del incendio y la superficie obtenida en evolución libre, es decir sin operaciones de extinción, sujeta al tiempo transcurrido desde la detección hasta que el incendio es controlado) (Rodríguez y Silva, 2007), (Rodríguez y Silva, y González-Cabán, 2010, 2016). Este parámetro resulta de gran utilidad, al incluir los efectos operacionales del control del perímetro del fuego, frente a lo que sería el resultado final sin llevar a efecto actividad de extinción alguna. En esencia permite asociar al análisis, el resultado de los rendimientos operacionales de carácter conjunto. La base de datos fue igualmente ampliada, incorporando a la misma los índices de peligro meteorológico de ocurrencia de incendios forestales (Rodríguez y Silva, 2002, 2004) y de dificultad de extinción (Rodríguez y Silva, et al. 2014), así como los medios de extinción ponderados movilizados para cada incendio desagregados en medios terrestres y medios aéreos. Para el estudio y determinación de la frontera estocástica ha sido seleccionado el método propuesto por Battese y Coelli en 1992. Dichos autores propusieron una función de frontera estocástica para ser utilizada con datos panel, en la cual los efectos de cada firma (en este caso cada uno de los incendios forestales) se asume que se distribuyen como una variable aleatoria con distribución normal, truncada en cero que, incluso puede variar en el tiempo. Su modelo se expresa de la siguiente forma:

$$Y_{it} = \beta X_{it} + (V_{it} - U_{it}), i = 1, \dots, N, t = 1 \dots T$$

donde  $Y_{it}$  es el logaritmo de la producción del incendio forestal  $i$  en el periodo de tiempo  $t$ .  $X_{it}$  es un  $k \times 1$  vector de cantidades (en logaritmos) de input que combina el incendio forestal  $i$  en el periodo de tiempo  $t$ ;  $\beta$  es un vector de coeficientes a determinar;  $V_{it}$  es una variable aleatoria que está distribuida como una normal  $N(0, \sigma_v^2)$ , e independiente de:  $U_{it} = (U_i \exp(-\eta(t-T)))$ , donde  $U_i$  es una variable aleatoria no negativa que recoge la ineficiencia técnica de cada firma y que presenta una distribución independiente truncada en cero  $N(\mu, \sigma_u^2)$ .

es un pa

técnica de la función de frontera para los modelos de Battese y Coelli se definen como:

$$EFF_i = E(Y_i'(U_i, X_i)) / E(Y_i'(U_i = 0, X_i))$$

donde  $Y_i'$  es la producción del incendio  $i$ , que será igual a  $Y_i$  cuando la variable dependiente es el valor original y será igual a  $\exp(Y_i)$  cuando se haya transformado en logaritmos. La medida de eficiencia,  $EFF_i$  tendrá un valor entre cero y uno. La base de datos confeccionada para poder realizar la determinación de la frontera estocástica y la obtención de las funciones de producción ha requerido ajustes y modificaciones en relación con la elaborada para los análisis anteriores.

#### 4. Resultados

La determinación del índice de eficiencia de acuerdo a la metodología indicada anteriormente, ha sido calculada para los veinte incendios objeto del estudio. Los cálculos han puesto de manifiesto que el 45% de los incendios (9 de los 20) han sido gestionado con una muy alta eficiencia, el 15% (3 de los 20) han sido gestionado con una alta eficiencia, el 15% (3 de los 20) con una moderada eficiencia y un 25% (5 de los 20) con una baja eficiencia, en resumen se puede manifestar que la gestión operacional de las acciones de extinción han sido en 12 de los incendios de calidad y en sólo cinco de los incendios la gestión fue de baja calidad (figura 2). De los resultados obtenido se desprende que es necesario proceder a revisar las estrategias de combate diseñadas y así como la elección y combinación de los medios de extinción que en cada uno de los cinco incendios en los que el análisis de la eficiencia puso de manifiesta la baja calidad de la misma

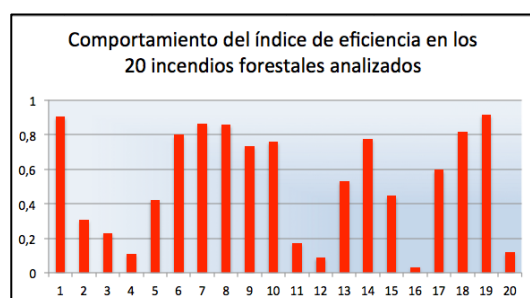


Figura2. Representación del índice de eficiencia para los 20 incendios analizado

Con independencia de la selección de estrategias y combinación de medios de extinción, los escenarios meteorológicos en los que se realizaron las operaciones de extinción constituyen un importante factor a considerar, dada las condiciones restrictivas que pueden llegar a representar en las intervenciones de los medios de extinción. Tal y como se indicó en el apartado metodológico y en relación con el análisis de la productividad, fueron considerados además del factor de contracción superficial, los índices dificultad de extinción ( $I_{dex}$ ) y de peligro meteorológico de ocurrencia de incendios forestales. La incorporación de dichas variables identificativas de cada incendio, permitió el recoger los efectos de la meteorología en las diferentes funciones de producción obtenidas en el marco conceptual de la eficiencia.



El Idex, representa el índice de dificultad de extinción (simplificado), calculado para las condiciones de comportamiento del fuego promedio de cada incendio. En su determinación han sido considerados los efectos del calor por unidad de área desprendido por el fuego y la longitud de llama (Rodríguez y Silva et al. 2014). El IPMIF, representa el índice de peligro meteorológico de ocurrencia de incendio forestal y permite obtener mediante diversos subíndices o índices parciales de cálculo, la evaluación de la predicción del peligro meteorológico de incendios forestales, y la estimación de la velocidad de propagación del incendio tras la ignición, una vez consolidada la combustión (Rodríguez y Silva y Aguado. 2004). RpMAR, representa la contabilidad de medios aéreos que han intervenido en cada incendio obtenida mediante la ponderación del número de unidades y el factor de proporcionalidad del tiempo de intervención en relación con el tiempo total de intervención de todos los medios aéreos intervinientes. RpMT, representa la contabilidad de medios terrestres que han intervenido en cada incendio obtenida mediante la ponderación del número de unidades y el factor de proporcionalidad del tiempo de intervención en relación con el tiempo total de intervención de todos los medios terrestres intervinientes.  $F_{cs}\%$ , representa el factor de contracción superficial. La tabla elaborada para el tratamiento de la eficiencia en la frontera estocástica, (productividad de las operaciones de extinción), permite comparar los resultados de cada una de las variables consideradas para los veinte incendios analizados (tabla 4).

Tabla 4. Variables determinadas para la evaluación de la productividad

| Nº Incendio | FCS % | Rendimiento m/min | Rp MAR | Rp MT | Idex | IPMIF  |
|-------------|-------|-------------------|--------|-------|------|--------|
| 1           | 11,14 | 44,26             | 11,52  | 37,28 | 6,49 | 228,31 |
| 2           | 0,56  | 33,83             | 8,35   | 37,39 | 6,46 | 188,31 |
| 3           | 13,79 | 4,38              | 15,55  | 59,93 | 5,25 | 131,52 |
| 4           | 5,31  | 23,88             | 19,33  | 48,24 | 6,28 | 171,07 |
| 5           | 18,22 | 24,00             | 31,65  | 39,35 | 5,59 | 149,13 |
| 6           | 46,65 | 3,33              | 17,84  | 34,93 | 5,38 | 133,42 |
| 7           | 90,14 | 3,97              | 18,91  | 33,53 | 4,87 | 128,86 |
| 8           | 24,91 | 9,07              | 14,13  | 29,65 | 6,05 | 158,80 |
| 9           | 14,34 | 23,50             | 29,16  | 45,78 | 6,45 | 187,84 |
| 10          | 12,46 | 199,80            | 62,98  | 79,72 | 6,58 | 209,83 |
| 11          | 87,71 | 33,30             | 52,26  | 84,66 | 6,25 | 160,10 |
| 12          | 98,47 | 15,53             | 34,00  | 73,08 | 6,28 | 169,10 |
| 13          | 70,38 | 5,20              | 10,48  | 55,03 | 6,31 | 178,56 |
| 14          | 35,83 | 26,54             | 14,20  | 45,72 | 6,63 | 209,83 |
| 15          | 77,35 | 60,65             | 36,78  | 39,78 | 6,78 | 295,08 |

|    |       |        |       |       |      |        |
|----|-------|--------|-------|-------|------|--------|
| 16 | 87,31 | 73,68  | 32,55 | 43,75 | 6,59 | 252,48 |
| 17 | 45,14 | 234,53 | 36,77 | 43,79 | 7,35 | 380,73 |
| 18 | 74,85 | 191,14 | 35,05 | 52,71 | 8,12 | 420,89 |
| 19 | 55,72 | 165,72 | 10,22 | 41,79 | 7,86 | 318,41 |
| 20 | 48,52 | 228,93 | 29,80 | 48,63 | 7,14 | 361,89 |

Haciendo uso del programa FRONTIER 4.1 (Coelli. 1996) se ha realizado el análisis para cada una de las dos conformaciones. En primer lugar ha sido considerada como variable explicada para la determinación de la función de producción, el rendimiento conjunto de todos los medios de extinción intervinientes, expresados en metros de control de perímetro por minuto. Para esta primera elección la eficiencia técnica promedio para los 20 incendios analizados, que devuelve el programa FRONTIER 4.1 en relación con la función de producción considerada es 0,114. En segundo lugar ha sido considerada como variable explicada para la determinación de la función de producción, el Factor de Contracción Superficial FCS, expresados en porcentaje de disminución de la superficie libre en relación a la superficie final resultado de las operaciones de extinción. La eficiencia técnica promedio obtenida con la segunda función de producción considerada ha sido de 0,1258.

Entre las dos opciones planteadas se ha podido comprobar que la solución basada en obtención de la función de producción considerando el Factor de Contracción Superficial, como variable explicada, ha proporcionado una mayor eficiencia promedio en el análisis de los veinte incendios, con menores resultados de la varianza y del log de máxima verosimilitud. Los resultados obtenidos para cada modelo de productividad han sido los siguientes (tablas 5 y 6):

Tabla 5. Modelo 1. Rendimiento=F(RpMAR, RpMT, Idex, IPMIF)

| <u>Modelo 1: Rendimiento=F(RpMAR, RpMT, Idex, IPMIF)</u><br>Log máxima verosimilitud= -0,99484. Sigma <sup>2</sup> =0,1633 |                 |                |                 |
|--|-----------------|----------------|-----------------|
| Beta   | Coefficiente    | Error estándar | t-ratio         |
| Beta 0   | -0.94840987E+02 | 0.11970061E+03 | -0.79231835E+00 |
| Beta 1   | 0.11279801E+01  | 0.84393332E+00 | 0.13365749E+01  |
| Beta 2   | 0.52860770E+00  | 0.85151098E+00 | 0.62078789E+00  |
| Beta 3   | -0.11818389E+02 | 0.25274319E+02 | -0.46760465E+00 |
| Beta 4   | 0.86342712E+00  | 0.24366293E+00 | 0.35435310E+01  |
| Sigma <sup>2</sup>   | 0.12638416E+04  | 0.93884451E+02 | 0.13461671E+02  |
| Gamma  | 0.36909502E-01  | 0.48612154E+00 | 0.75926488E-01  |

Tabla 6. Modelo 2.  $FCS=F(RpMAR, RpMT, Idex, IPMIF)$ 

| <u>Modelo 2: <math>FCS=F(RpMAR, RpMT, Idex, IPMIF)</math></u> |                 |                |                 |
|---|-----------------|----------------|-----------------|
| Log máxima verosimilitud= -0,95772. $\Sigma^2=0,1121$         |                 |                |                 |
| Beta  | Coefficiente    | Error estándar | t-ratio         |
| Beta 0  | 0.10772088E+03  | 0.82752046E+01 | 0.13017308E+02  |
| Beta 1  | -0.79192276E-01 | 0.67909989E+00 | -0.11661359E+00 |
| Beta 2  | 0.75821011E+00  | 0.68382113E+00 | 0.11087843E+01  |
| Beta 3  | -0.24066728E+02 | 0.95885797E+01 | -0.25099367E+01 |
| Beta 4  | 0.28284257E+00  | 0.14159634E+00 | 0.19975274E+01  |
| $\Sigma^2$  | 0.86845668E+03  | 0.15737954E+02 | 0.55182310E+02  |
| Gamma   | 0.44035536E-01  | 0.41218539E+00 | 0.10683430E+00  |

De lo anterior se puede extraer como resultado, que la evaluación de la productividad a partir de la generación de un modelo econométrico de la productividad en que ésta sea determinada a través del factor de contracción superficial, proporciona una mayor calidad informativa, en relación a la evaluación de la eficiencia y productividad. En este caso la función de productividad ha sido obtenido a través de un modelo lineal multivariable en base a los rendimientos operacionales de los medios de extinción, la dificultad de extinción y el peligro meteorológico.

## 5. Discusión

El estudio y análisis de los resultados operacionales, abre una puerta necesaria para profundizar en la capitalización de la experiencia. La monitorización de las secuencias operacionales en la consecución de los objetivos recogidos en los planes de ataque, permite realizar un seguimiento de los resultados logrados e identificar aquellos otros objetivos que sin embargo no pudieron ser alcanzados. La recogida de variables y el comportamiento mantenido por las mismas a lo largo del tiempo que duraron las operaciones de extinción, conforman el punto de partida para evaluar las causas que pudieron limitar las acciones de extinción. El trabajo que se presenta, incluye un doble enfoque, por una parte el estudio de la eficiencia individualizada por cada incendios registrado. Esta línea de análisis proporciona información final en la que se puede testar la calidad de las operaciones de extinción que fueron desarrolladas teniendo en consideración, como se ha indicado en la descripción metodológica, los costes de extinción y el valor económico de los recursos que se han podido salvar. La oportunidad y ventaja de este método de evaluación, es la de proporcionar un análisis de las elecciones de medios de extinción, la combinación entre ellos, los tiempos operaciones acordados en la planificación operacional y los resultados obtenidos. En este sentido, el valor que devuelve tras los cálculos, el índice de eficiencia técnica, proporciona una información de gran utilidad, al objetivar los resultados alcanzados por cada equipo de extinción definido (combinación de diferentes tipos de recursos). De esta forma, valores bajos de eficiencia sugieren la realización de un estudio de detalles de los rendimientos operacionales desarrollados por los componentes de dicho equipo. Es decir, resulta factible la redefinición de combinaciones de medios, hacia otra organización de equipos de extinción, que por diferentes capacidades puedan ofrecer mejores

resultados y por consiguiente incrementen los rendimientos operacionales futuros. Indirectamente, se puede obtener información en relación con las deficientes condiciones que pueda presentar el escenario de trabajo, por escasas infraestructuras de apoyo en las tareas de extinción, incrementándose en consecuencia, los costes de extinción. Por otra parte, un segundo enfoque se dirige hacia la determinación de funciones de producción que ayuden a los gestores, en la determinación de cuáles podrían ser las respuestas en la variable explicada en términos de productividad. Concretamente y en la aproximación metodológica objeto del presente trabajo, se ha realizado el análisis comparado de dos soluciones. Una que viene a determinar los rendimientos expresados en metros por minutos de línea de fuego extinguida y otra que proporciona el factor de contracción superficial (FCS). Con relación a la medición de la eficiencia comparada entre ambos, el segundo procedimiento de evaluación de la productividad ha proporcionado una mejor calidad representada en un 9,3%, con menor varianza y mejor comportamiento del test de verosimilitud. A partir de esta aproximación metodológica, es factible el desarrollo de modelos explicativos, conjugando variables que aporten información de aquellos factores que tras el monitoreo realizado, ofrezcan la suficiente calidad predictiva para proporcionar información de la capacidad de producción que proporciona una determinada combinación de equipos formados para la extinción de incendios forestales.

## 6. Conclusiones

La aplicación de las herramientas de análisis de la eficiencia y productividad, constituyen una novedosa oportunidad para realizar investigaciones y estudios de pronóstico sobre los resultados de las operaciones de extinción. Ello proporciona la posibilidad de reducir la incertidumbre operacional en aras de conseguir a partir de la capitalización de la experiencia, información fiable y constatada científicamente para realizar mejoras y correcciones en la selección y combinación de los medios de extinción en función de los escenarios operacionales, redundando ello en la mejor calidad en las acciones de planificación estratégica de las operaciones de supresión y extinción de los incendios forestales. Obviamente las mejoras en la planificación del ataque, de acuerdo a lo analizado en el presente trabajo, repercute en una reducción de los costes de extinción y en un incremento en el valor económico salvado de los recursos naturales, frente al impacto del fuego en la propagación espacial de los incendios forestales.

## 7. Agradecimientos

El autor manifiesta su agradecimiento al proyecto GEPRIF (RTA2014-00011-C06-01), financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación a través del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). De igual modo manifiesta su agradecimiento a la dirección del Plan INFOCA de la Junta de Andalucía (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio), por el acceso a las bases de datos y el apoyo en los trabajos de monitoreo de campo y de investigación que han sido necesario realizar en la consecución de los objetivos de este trabajo.

## 8. Bibliografía

BATTESE, G.; COELLI, T.; 1992. Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data: with Application to Paddy Farmers in India. *Journal of Productivity Analysis* 3(1-2): 153-169.

COELLI, T.; 1996. A guide to FRONTIER Version 4.1: a computer program for stochastic frontier production and cost function estimation". Centre for Efficiency and Productivity Analysis (CEPA Working Paper). University of New England.

MOLINA, J.R.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; HERRERA, M.A.; ZAMORA, R.; 2009. A simulation tool for socio-economic planning on forest fire suppression management. *Forest Fires: Detection, Suppression and Prevention*. Nova Science Publishers. USA.

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.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2002. Visual Forest Fire Weather Index (VFFWI) a mathematical model for the prediction of forest fires weather danger in Mediterranean ecosystems. IV Conference on Forest Fire.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; AGUADO, I.; 2004. El factor meteorológico en los incendios forestales. En nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales. Editores: Emilio Chuvieco Salinero y María del Pilar Martín Isabel. Colección de Estudios Ambientales y Socioeconómicos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; 2005. Sinami, un método para el análisis económico de los planes de defensa contra incendios forestales mediterráneos, desarrollo de una aplicación desde una perspectiva provincial. 4º Congreso Forestal Español. La ciencia forestal: respuesta para la sostenibilidad. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Junta de Andalucía. Gobierno de Aragón. Zaragoza.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; MOLINA MARTÍNEZ, JR.; RODRÍGUEZ LEAL, J.; 2014. The efficiency analysis of the fire control operations using the VISUAL-SEVEIF tool. Chapter 7 - Social and Economic Issues. *Advances in Forest Fire Research* [http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6\\_210](http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6_210)

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; MOLINA MARTÍNEZ, J.R.; GONZÁLEZ-CABÁN, A.; 2014. A methodology for determining operational priorities for prevention and suppression of wildland fires. *International Journal of Wildland Fire*. <http://dx.doi.org/10.1071/WF13063>. [www.publish.csiro.au/journals/ijwf](http://www.publish.csiro.au/journals/ijwf)

RODRIGUEZ Y SILVA, F.; 1999. A forest fire simulation tool for economic planning in fire suppression management models: an application of the Arcar-Cardin. Proceedings of the Symposium on Fire Economics, Planning and Policy: Bottom lines, USDA Forest Service. Pacific Southwest Research Station. General Technical Report PSW-GTR-173. San Diego California.

RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; MOLINA, JR.; HERRERA, M.; ZAMORA, R.; 2007. Vulnerabilidad socioeconómica de los espacios forestales frente al impacto de los incendios, aproximación metodológica mediante sistemas de información geográficos (proyecto Firemap). IV International Wildland Fire Conference. Proceedings. Sevilla. ([www.wildfire07.es](http://www.wildfire07.es)).

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.

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.; 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.; 2016. Contribution of suppression difficulty and lessons learned in forecasting fire suppression operations productivity: a methodological approach. *Journal of Forest Economics*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfe.2016.10.002>