

El Análisis Económico del Riesgo y la Elección bajo Incertidumbre en la Planificación del Paisaje en Relación con los Incendios Forestales¹

Francisco Rodríguez y Silva²

Resumen

La toma de decisiones económicas en los programas de defensa contra incendios forestales y manejo del fuego no resulta fácil, cuando la misma se realiza bajo criterios de eficiencia. La determinación de variables a considerar y la carencia de datos analizados en relación con los resultados alcanzados por los planes de actuación adoptadas para reducir el impacto de los incendios, condicionan la adopción de soluciones estratégicas, tanto en gestión del paisaje frente a los incendios, como en las operaciones de supresión. Si ya de por sí, la decisión de cuánto, donde y como invertir los presupuestos de protección, resulta compleja, la elección en ambientes de riesgo e incertidumbre, viene sin duda a incrementar la dificultad en la búsqueda de las adecuadas soluciones.

La determinación de la función de utilidad esperada y la medición de la aversión al riesgo, aportan interesantes y avanzadas herramientas de diagnóstico que permiten comparar las respuestas que pueden proporcionar la aplicación de diferentes planes de actuación en el paisaje forestal y en función de los resultados obtenidos, seleccionar la mejor solución bajo escenarios de incertidumbre. La integración de variables que identifican la dificultad de extinción inicial que presenta el paisaje en estudio, así como la peligrosidad potencial de incendios forestales, y sus efectos en el cambio neto en el valor de los recursos por el impacto del fuego y los costes de extinción, ayudan a caracterizar el comportamiento de las funciones de utilidad esperadas. El presente trabajo analiza los resultados de diferentes funciones de utilidad y las compara con el fin de identificar la función de utilidad esperada con mejor capacidad explicativa, cuando se ha de elegir entre diferentes opciones de protección contra incendios bajo situaciones de incertidumbre generadas por el cambio climático, la probabilidad de ocurrencia, la influencia de comportamientos sociales, así como las diferentes

¹ Una versión abreviada de este trabajo se presentó en el Quinto simposio Internacional sobre Políticas, Planificación y economía de los Incendios forestales: Servicios ambientales e Incendios forestales, 14-18 de noviembre de 2016, Tegucigalpa, Honduras.

² Departamento de Ingeniería Forestal. Laboratorio de Incendios Forestales. Universidad de Córdoba, Edificio Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales, 14071, Córdoba, España. e-mail: ir1rosif@uco.es

capacidades de extinción, entre otros factores. La gestión de los combustibles forestales y las diferentes oportunidades de extinción en función de las combinaciones de medios de supresión, pueden ser tratadas desde el enfoque de la elección de soluciones estratégicas en escenarios de incertidumbre. Los modelos SINAMI (Rodríguez y Silva, González-Cabán. 2010) y Visual-SEVEIF (Rodríguez y Silva, et al. 2014), proporcionan los datos de partida para la toma de decisión y elección de soluciones bajo incertidumbre en el paisaje forestal.

Palabras clave: Riesgo, incertidumbre, planes operacionales, supresión, costes de extinción, cambio neto en el valor de los recursos

Introducción

Las acciones de defensa contra los incendios forestales, incluidas en el marco de los programas de actuaciones en el paisaje, han ido evolucionando con el tiempo. Los avances en la ciencia de la dinámica de las propagaciones espaciales del fuego en los escenarios forestales, y el mejor conocimiento de sus consecuencias en términos de severidad, daños ecológicos, económicos y servicio ambientales, han permitido de forma progresiva el ir acomodando las actuaciones de defensa a tenor de los avances en el conocimiento adquirido y la experiencia aprendida.

No obstante, la complejidad de los escenarios forestales, de igual modo, también ha sufrido modificaciones a lo largo de los últimos 50 años con mayor o menor intensidad en los países con mayor incidencia de incendios. En efecto, los cambios socioeconómicos y demográficos, por una parte y por otra la compleja acumulación de biomasa vegetal en óptimas condiciones para la ignición y posterior propagación, sujetas a severas condiciones meteorológicas, vienen generando una amplia muestra de paisajes forestales y paisajes mixtos urbano-forestal, en los que los modelos tradicionales de gestión de la defensa no alcanzan a dar una respuesta en términos de eficacia y seguridad.

En este marco de realidades, la toma de decisión se vuelve compleja e incierta (Minas et al. 2012). Además, los importantes requerimientos presupuestarios para disponer y gestionar los medios de extinción, incorporan factores y variables que hacen aún más difícil desarrollar acciones que se encuentren en la senda de la eficiencia (Rodríguez y Silva, González-Cabán. 2016). Indiscutiblemente sobre la toma de decisión, tanto a la hora de realizar cambios estratégicos en el paisaje a fin de una mejor ordenación de los combustibles forestales y en la gestión de una determinada emergencia, supeditada a la elección de planes de actuación, la

incertidumbre es un factor que condiciona las decisiones sobre la elección de la solución idónea.

La responsabilidad en la búsqueda de la solución, genera en el sujeto que ha de decidir finalmente la repuesta al problema (por ejemplo la elección de una determinada combinación de recursos en número y clases para una concreta acción de extinción) posturas que pueden estar caracterizadas por presentar una mayor o menor aversión al riesgo. A veces, la solución con mayor riesgo puede conllevar el pago de un resultado de alta eficiencia, pero la incertidumbre de lo que ocurrirá y de que formas las variables en juego condicionarán o afectarán a la solución escogida reduce las probabilidades de escoger tal respuesta a la emergencia.

Por otra parte con frecuencia, la elección de las soluciones en ambiente de incertidumbre (como se caracterizan la actuaciones de supresión y extinción de incendios), suelen estar alejadas de modelos de decisión apoyados en fundamentos de predicción económica y optimización de rendimientos. En parte por la falta de conocimientos en estas disciplinas y por otra, condicionado por el reducido desarrollo y disponibilidad de modelos que en materia de gestión de incendios forestales proporcionen un horizonte de soluciones en ambiente de incertidumbre. La adopción de soluciones sigue estando basada en la experiencia empírica de los actores.

El trabajo que se presenta abre una línea de búsqueda de soluciones modeladas y fundamentadas en principios de eficiencia económica con el fin de generar aportaciones conceptuales y herramientas que reduciendo la incertidumbre, ofrezcan de forma progresiva un catálogo de soluciones que incrementen la eficacia y reduzcan los costes de las operaciones de extinción y de manejo del fuego (Rodríguez y Silva, González-Cabán, 2016).

Material y métodos

La mayor parte de las elecciones que han de ser tomadas, tanto en la elaboración como en el desarrollo de los programas de defensa contra incendios forestales, no están exentas de incertidumbre, entre algunas se pueden citar la elección del tipo y número de helicópteros de acuerdo a su capacidad de extinción en función de los escenarios de comportamiento del fuego, la mayor o menor de presencia de turbulencias y comportamientos erráticos del viento en las proximidades de los frentes de fuego, o lo resultados finales de determinada acción de combate para frenar la propagación de un determinado sector de propagación. Además, detrás del conjunto de decisiones, también existen criterios de carácter económico que en

función de las decisiones que se puedan adoptar, representan consecuencias en los incrementos de los costes y generación de gastos extraordinarios.

Por todo ello, el objetivo de la modelización de algoritmos de ayuda a la toma de decisión, han de ir dirigidos a reducir en la medida de lo posible la incertidumbre (Minas et al. 2012), generando entornos de trabajo en los que la variabilidad de los parámetros que inciden en la toma de soluciones y respuestas, se encuentren en parte convertidos por la información que aportan en el marco de la certidumbre.

Haciendo uso de las experiencias derivadas de los fundamentos teóricos de la “la teoría de la elección bajo incertidumbre” (Gollier, 1999), se pueden encontrar respuestas tras la definición y valoración individual del riesgo. Ello supone el alcanzar un grado de conocimiento del escenario en el que la decisión a tomar, varía de acuerdo a la mayor o menor disponibilidad de los actores a exponerse al riesgo y sus consecuencias.

La metodología seguida en el desarrollo del presente trabajo, responde a un proceso de integración de bloques temáticos que permiten comprender a través de la interconexión entre ellos, los fundamentos que facilitan la reducción de la incertidumbre en la elección de respuestas estratégicas (figura nº1).

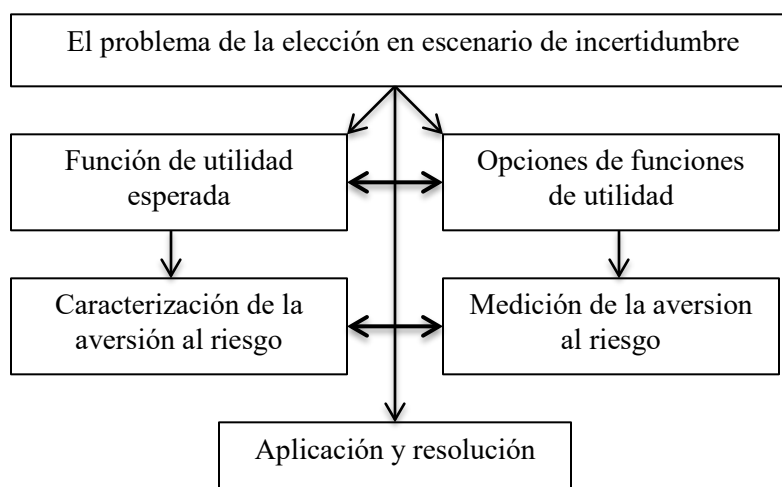


Figura 1. Integración de bloques temáticos que facilitan la reducción de la incertidumbre en la elección de respuestas estratégicas

1.- Función de utilidad esperada

En los escenarios de incertidumbre, las posibilidades de elección de los actores se presenta condicionada por factores ajenos a los propios decisores. Al conjunto de escenario de incertidumbre donde los actores no tienen factores concretos de control, reciben la denominación de “*estados de la naturaleza*” (Variant, 2005). Por otra

parte es importante indicar que conceptualmente, las influencias y/o efectos de carácter positivo (beneficios) o negativos (impactos y deterioros), dependen de los criterios preferenciales de los actores y de cómo puedan influenciar al resultado.

Un estado de la naturaleza se puede definir como la descripción de un determinado resultado de la incertidumbre. Representando por (E), como el conjunto formado por todos los estados de la naturaleza posibles, y por (e) un elemento finito del total de estados posibles, la probabilidad de que dicho estado se pueda dar será $p(e)$ y la misma por definición ha de cumplir que:

a) $P(e) \geq 0$

b) $\sum_{e \in E} p(e) = 1$

A tenor de lo definido, la solución pasa por la determinación y construcción del plan contingente. Por éste se entiende el plan de consumo que viene a representar una concreta especificación sobre el número de unidades a consumir en cada uno de los estados de la naturaleza. En esencia, el plan de consumo contingente puede de igual forma ser definido como una variable aleatoria que toma un valor de respuesta con una probabilidad concreta.

En este sentido, si una determinada decisión estratégica en términos de extinción de incendio o de manejo del fuego en la ordenación del combustible forestal, es entendida como una acción de consumo a considerar de una cesta de bienes disponibles (oportunidades estratégicas de acciones), y a su vez se entiende que dicha opción de consumo tiene el comportamiento de una variable aleatoria (c), entonces sujeto a los condicionantes de las preferencias comparadas, se puede determinar la denominada utilidad esperada de poder desarrollar el plan de consumo contingente seleccionado.

Matemáticamente esta definición puede quedar identificada por la siguiente expresión: $E[U(c)] = \sum p(e)U(c)$. A partir de la expresión anterior y conocidos diferentes planes contingente de consumo, o dicho de otra forma diferentes opciones de planes operacionales de extinción o combinaciones estratégicas de recursos de extinción en un mismo plan de actuación (Castillo, Rodríguez y Silva. 2015), es posible obtener y comparar dos planes en función de la utilidad esperada que cada uno de ellos puede proporcionar: $E[U(c_1)] > E[U(c_2)]$. En determinadas ocasiones, el “plan de consumo contingente” puede pasar a ser considerado “plan de consumo cierto”, y en tal caso el escenario de incertidumbre se convierte en escenario de certidumbre. Es decir el número de unidades de consumo no varía en los diferentes estados de la naturaleza y en consecuencia la utilidad esperada de las diferentes opciones estratégicas es la misma.

Con el fin de clarificar los conceptos anteriores y a modo de ejemplo, se incluyen a continuación dos planes contingentes (c_1) y (c_2) en términos de capacidad de extinción, tiempos de intervención y costes de extinción (tablas 1 y 2).

Tabla 1. Plan de contingencia C_1

Nº de unidades Plan contingente C_1	Tipo de recurso de extinción	Productividad unitaria en m/min	Coste unitario de extinción por hora (€)	Tiempo total de intervención en minutos	Coste de extinción total (€)	Factor de ponderación de rendimientos	Capacidad de extinción (m/min)
3	Avión CL215T	85	4,571.92	826	188,820.27	0.143	36.53
3	Helicóptero Bell412	55	1,828.57	456	41,691.35	0.079	13.05
3	Helicóptero KAMOV K32	75	2,101.09.	350	36,769.06	0.061	13.66
4	Avión Air Tractor 802	65	652.99	458	19,937.98	0.079	20.65
10	Brigada (15 componentes)	8.5	551.00	1,670	153,362.19	0.290	24.62
1	Bulldozer	35	73.29	256	312.71	0.044	1.55
4	Camión autobomba	15	94.01	1,750	10,967.53	0.304	18.21
Índice operacional C_1	15.82			5,766	451,861.09		128.27

Tabla 2. Plan de contingencia C_2

Nº de unidades Plan contingente C_2	Tipo de recurso de extinción	Productividad unitaria en m/min	Coste unitario de extinción por hora (€)	Tiempo total de intervención en minutos	Coste de extinción total	Factor de ponderación de rendimientos	Capacidad de extinción (m/min)
4	Avión CL215T	85	4,571.92	950	289,554.89	0.1746	59.38
4	Helicóptero Bell412	55	1,828.57	321	39,131.35	0.0590	12.98
4	Helicóptero KAMOV K32	75	2,101.09	185	25,913.43	0.0340	10.20
2	Avión Air Tractor 802	65	652.99	750	16,324.76	0.1379	17.92
10	Brigada (15 componentes)	8.5	551.00	934	85,772.63	0.1717	14.59
2	Bulldozer	35	73.29	450	1,099.37	0.0827	5.79
5	Camión autobomba	15	94.01	1,850	14,492.81	0.3401	25.51
Índice operacional C_2	16,54			5,440	472,289.25		146.37

Como se puede observa en los resultados obtenidos al final de ambas tablas, las opciones que presentan los dos planes de contingencia, muestran interesantes diferencias como resultado de las combinaciones en número y tipo de los medios de

extinción seleccionados para la opción c_1 y la opción c_2 . La opción c_2 , resulta más costosa, tiene mayor capacidad de producción pero se consigue la extinción del incendio en menor tiempo, por el contrario la opción c_1 , presenta menores costes, menor productividad, pero invierte mayor tiempo en alcanzar la extinción. De acuerdo con ello los valores del índice operacional que se obtienen para el plan de contingencia c_1 , es de 15,82 unidades y para el plan de contingencia c_2 es de 16,54 unidades. Para la determinación del índice operacional (I_{op}) se ha considerado el siguiente algoritmo: $I_{op_i} = 10^{-4} \cdot [0,35 \cdot (\text{Coste total de extinción})_i + 0,65 \cdot (\text{Capacidad de extinción})_i]$.

Estas opciones de consumo o planes de contingencia, concebidas como variables aleatorias c_i , incluidas en la función de utilidad definida en el programa de defensa contra incendios forestales y/o manejo del fuego, permite obtener el grado de utilidad que reportan desde el punto de vista de los resultados finales obtenidos. Estos resultados han de ser medidos en términos por ejemplo de la eficiencia, o de la relación coste/beneficio. En la elección de la función de utilidad que modela el resultado comparado de los planes de contingencia, hay que considerar el valor económico que se consigue salvar de los recursos tangibles e intangibles afectados por el incendio, interrelacionando matemáticamente el mismo con el valor de consumo que representa cada solución combinada de medios de extinción.

2. Aversión al Riesgo y su medida

La decisión de optar por un plan de contingente (plan de operación de extinción) entre los considerados, tiene una importante componente de la actitud frente al riesgo que presente al sujeto decisor. Para abordar con mayor detalle esta cuestión, es necesario conceptualizar lo que se denomina por “juego actuarialmente justo”, se define como aquel juego o lotería cuyo valor esperado es cero. Si se considera a (p) como la probabilidad con valores entre (0) y (1) , entonces $px + (1-p)y = 0$.

A partir de este concepto, se puede definir las posiciones de un sujeto decisor con relación al riesgo (Arrow, 1965):

- a) Aversión al Riesgo. Un sujeto decisor es averso al riesgo, cuando no está dispuesto con su decisión a asumir cualquier juego actuarialmente justo. Cumpliéndose a partir de la riqueza inicial M_0 del sujeto, con x e y como posibles ganancias (incremento en la riqueza, a partir de la inicial) y de acuerdo con sus respectivas probabilidades (p) y $(1-p)$, siendo U la función de utilidad del sujeto,
$$U(M_0) > p \cdot U(M_0 + x) + (1-p)U(M_0 + y)$$
$$U(M_0) = U(p \cdot (M_0 + x) + (1-p) \cdot (M_0 + y)) > p \cdot U(M_0 + x) + (1-p) \cdot U(M_0 + y)$$

Función estrictamente cóncava

- b) Neutral al Riesgo. Un sujeto decisor es neutral al riesgo, cuando es indiferente a asumir cualquier juego actuarialmente justo.

Matemáticamente esta figura es expresada de la siguiente forma,

$$U(M_0) = U(p \cdot (M_0 + x) + (1-p) \cdot (M_0 + y)) = p \cdot U(M_0 + x) + (1-p) \cdot U(M_0 + y)$$

Función lineal

- c) Amante al Riesgo. Un sujeto decisor es amante al riesgo, cuando está dispuesto a asumir cualquier juego actuarialmente justo.

Matemáticamente esta figura es expresada de la siguiente forma,

$$U(M_0) = U(p \cdot (M_0 + x) + (1-p) \cdot (M_0 + y)) < p \cdot U(M_0 + x) + (1-p) \cdot U(M_0 + y)$$

Función estrictamente convexa

La medida de la aversión al riesgo que presenta el sujeto decisor, depende de la mayor o menor concavidad que presenta la función de utilidad que es gestionada por el decisor (Pratt, 1964). El valor absoluto de la curvatura de una función de utilidad viene dada por $(-U'')$. Es decir la segunda derivada de la función de utilidad proporciona un información del grado de concavidad y cuanto mayor sea ésta, tanto mayor será la aversión al riesgo que presenta el sujeto decisor que gestiona dicha función de utilidad. Normalizando la segunda derivada con la primera derivada de la función de utilidad, se consigue un procedimiento de medida de la aversión del riesgo que resulta ser invariante frente a transformaciones afines (Arrow, 1964), (Pratt, 1965). El coeficiente de medida de aversión absoluta al riesgo viene determinado por la expresión: $R_a(M) = -[U''(M)/U'(M)]$. Cuando interesa determinar la aversión en proporción a la riqueza inicial, se utiliza la medida de aversión relativa cuya expresión es: $R_r(M) = -[U''(M)/U'(M)] \cdot M$

En la determinación de la función de consumo, han sido consideradas las siguientes variables:

- el valor por hectárea de los recursos naturales (V_R) (tangibles e intangibles), presentes en la zona en donde interesa contrastar los planes contingentes (planes operacionales definidos por combinaciones de medios de extinción),
- las pérdidas por hectárea (P_R) que se pueden producir en función del comportamiento del fuego (matriz de depreciación de los valores de los recursos afectados) (Rodríguez y Silva y González-Cabán, 2010, Molina et al. 2009, Rodríguez y Silva et al. 2014),
- el índice de capacidad operacional (Iop), que se obtiene interrelacionando los tipos de medios de extinción, la combinación numérica de los mismos, los costes unitarios, los tiempos de intervención y la capacidad operacional que desarrollan (control de línea de fuego)

Reuniendo estas variables en la expresión que proporciona la función de consumo, se obtiene el concepto de “riqueza” derivada del plan de contingencia considerado. Esta nueva variable explicada, pasa a ser la variable explicativa de la función de utilidad determinada para el análisis de la aversión al riesgo que presenta el sujeto decisor.

La función de consumo definida presenta la siguiente expresión matemática:

$$C = \frac{(VR-PR)}{Iop}$$

La función de utilidad seleccionada para el análisis de la aversión es $U=\ln(C)$, esta función de utilidad presenta el siguiente comportamiento en relación al criterio de Arrow-Pratt, siguientes:

1.- Aversión Absoluta al Riesgo:

$$AAR = -\frac{U''}{U'} = -\frac{\frac{-1}{C^2}}{\frac{1}{C}} = \frac{1}{C} > 0, \text{ Aversión al Riesgo}$$

La evolución del grado de Aversión Absoluta al Riesgo resulta ser decreciente con el consumo (C), en efecto la diferencial de AAR, con relación a un cambio infinitesimal del consumo resulta ser estrictamente decreciente:

$$\frac{dAAR}{dc} = -\frac{1}{C^2}$$

< 0 , Aversión Absoluta al Riesgo decreciente con el consumo

2.- Aversión Relativa al Riesgo: $ARR = C \cdot AAR = C \cdot \frac{1}{C} =$

1, Aversión Relativa al Riesgo constante

Haciendo uso de la utilidad esperada, se puede determinar la actitud frente al riesgo del sujeto decisor. Para ello es necesario determinar el valor de la utilidad esperada y establecer la comparación con el valor esperado. El cálculo numérico requiere la asignación de la probabilidad (p) que se entiende afecta a la decisión de seleccionar el plan contingente C_1 y la probabilidad (1-p) correspondiente al plan contingente C_2 . De acuerdo a lo indicado anteriormente, el procedimiento metodológico de cálculo quedaría de la siguiente forma:

Fase a), determinación del valor esperado:

$$V(C_1, C_2) = p \cdot C_1 + (1 - p) \cdot C_2$$

Fase b), determinación de la utilidad del valor esperado:

$$U(V(C_1, C_2)) = \ln(V(C_1, C_2))$$

Fase c), determinación de la utilidad esperada:

$$U(C_1, C_2) = p \cdot \ln(C_1) - (1 - p) \cdot \ln(C_2)$$

Estableciendo la comparación versus:

$$U(M_0) = U(p \cdot (M_0 + x) + (1 - p) \cdot (M_0 + y)) > p \cdot U(M_0 + x) + (1 - p) \cdot U(M_0 + y),$$

se confirma la existencia de función estrictamente cóncava y por consiguiente el sujeto decisor presenta aversión al riesgo.

Aplicando este procedimiento al escenario del paisaje forestal donde se localiza el propagación del incendio forestal, se puede evaluar que tipo de comportamiento frente al riesgo presenta el sujeto decisor, ante la decisión de seleccionar un determinado plan de contingencia.

Otras funciones de utilidad definidas sobre el consumo (en términos de elección de bienes que resuelven una determinada necesidad), pueden ser consideradas de forma similar a la elección realizada en el presente trabajo. Entre la familia de funciones de utilidad, se pueden considerar las siguientes (Gollier, 1999), (tabla nº3):

Tabla 3. Comparativa entre funciones de utilidad dependientes del valor del consumo (c)

Función de utilidad U(c)	Expresión matemática	Aversión absoluta al riesgo	Aversión relativa al riesgo	Consideraciones
Cuadrática	$U(c) = c - \frac{b}{2}c^2$ con $b > 0$	$Ra(c) = \frac{1}{1 - bc}$	$Rr(c) = \frac{b^2}{(1 - bc)^2}$	Tratamiento como bien inferior (a mayor valor de (c), mayor aversión absoluta al riesgo en la elección del plan de contingencia. Estrategia conservadora
CARA (Función de aversión absoluta al riesgo constante)	$U(c) = -\frac{1}{\gamma}e^{-\gamma c}$ con $\gamma > 0$	$Ra(c) = \gamma$	$Rr(c) = \gamma c$	Al ser la aversión relativa al riesgo creciente con el consumo, el modelo ofrece una proporción directa de la utilidad con el consumo
CRRA (Función de aversión relativa al riesgo constante)	$U(c) = \frac{c^{1-\sigma} - 1}{1 - \sigma}$ con $\sigma \geq 0$ Cuando $\sigma \rightarrow 1$, entonces $U(c) = \ln c$	$Ra(c) = \frac{\sigma}{c}$	$Rr(c) = c \frac{\sigma}{c} = \sigma$	Al ser la aversión absoluta al riesgo decreciente con el consumo, el modelo ofrece predisposición a la elección del plan de contingencia que presenta mayor nivel de consumo

El estudio del comportamiento de diferentes opciones de funciones de utilidad, en relación con su aplicabilidad en la evaluación de la selección del plan de contingencia en ambientes de incertidumbre, ofrece una importante herramienta en el análisis estratégico comparado de planes operacionales de extinción. Los resultados que se obtienen, proporciona la posibilidad de elaborar una carpeta de soluciones elegibles y estandarizadas según los escenarios de incertidumbre operacional identificados en el paisaje forestal a defender frente a los incendios forestales.

Resultados

La aplicación del modelo, requiere el establecimiento de unas determinadas características territoriales, en las que se define el escenario de trabajo. De acuerdo con ello se ha considerado a modo de ejemplo, una celda de 2kmx2km. La evaluación económica de los recursos naturales (tangibles e intangibles) existentes en el interior alcanza el valor de 2.425€/ha. La determinación del valor económico de los daños que representaría la ocurrencia de un determinado incendio forestal, se analiza bajo dos aspectos. Los definidos por los resultados operacionales de los dos planes de contingencia (C₁) y (C₂). La capacidad de extinción del plan (C₁) es menor que la que se obtiene a través del plan (C₂), los costes totales de extinción también son menores, aunque el tiempo empleado en controlar el incendio es mayor.

Por otra parte el resultado del estudio del índice de peligro de ocurrencia de incendios apunta a que las probabilidades de vientos desecantes con velocidad alta es

del 15%, frente a una situación más benévola de menor peligrosidad y por consiguiente con menor conflictividad operacional, caracterizada por vientos más húmedos y de menor intensidad, con una probabilidad del 85%.

Las consecuencias de optar por un plan u otro representan, además de mayores costes de extinción con mayor capacidad de extinción (en el caso de seleccionar el plan contingente (C_2), un diferencial en la superficie finalmente afectada por el fuego. Con la elección del plan contingente (C_2), frente al (C_1), se reduce la superficie afectada en un 15% aunque los costes de extinción se incrementan en un 4,3%.

Otra cuestión necesaria es la determinación del cambio neto en el valor de los recursos naturales a consecuencia del impacto del incendio (CNV). Este resultado se puede obtener haciendo uso de la metodología del modelo SEVEIF (Molina et al. 2009, Rodríguez y Silva, 2014). La obtención de la diferencia entre el valor económico inicial de los recursos naturales (sin ser afectados por el incendio) y el valor final tras la afectación permite obtener el valor salvado. Integrando dicho resultado de forma conjunta con el valor del índice operacional (I_{op}) correspondiente al plan contingente seleccionado, se determina a través de la función de consumo, el valor de la “riqueza” en términos del valor económico que se ha conseguido salvar del impacto del incendio.

Los resultados obtenidos en función de la elección entre los planes de contingencia, objeto de la selección en función de los resultados del riesgo en escenarios de incertidumbre, y para el caso que ocupa el presente análisis de resultados, se muestran a continuación (tabla nº 4)

Tabla 4. Valores del CNV para cada plan de contingencia y escenario meteorológico

Escenarios meteorológicos	Probabilidad de ocurrencia (%)	CNV/Plan C_1 €/ha	CNV/Plan C_2 €/ha
EM ₁	15	2,425-850=1,575	2,425-550=1,875
EM ₂	85	2,425-650=1,775	2,425-450=1,975

Los correspondientes valores que alcanza la función de consumo, permiten obtener de forma comparada la “riqueza” derivada de los correspondientes planes de contingencia considerados. Dichos valores constituyen la variable explicativa (variable independiente) de la función de utilidad seleccionada para el análisis de la aversión al riesgo que presenta el sujeto decisor. En la determinación de los correspondientes valores de “riqueza”, hay que considerar los resultados que ofrecen los diferentes índices operacionales (I_{op}) y aplicar la función de consumo a cada uno

de los valores que representa el cambio neto en el valor de los recursos a resultados del plan de contingencia seleccionado y escenarios meteorológicos existentes (tabla nº5).

Tabla 5. Valores de la función de consumo para cada plan de contingencia, escenario meteorológico e índice operacional

Plan de contingencia	I_{op}	Escenario meteorológico	CNV €/ha	Valores de la función de consumo C €/ha
C_1	15.82	EM ₁	1,575	99.55
	15.82	EM ₂	1,775	112.19
C_2	16.54	EM ₁	1,875	113.36
	16.54	EM ₂	1,975	119.40

A la vista de los resultados obtenidos, se puede analizar la decisión que tomará el sujeto teniendo en consideración el valor esperado y la utilidad esperada, a partir de los valores de la función de consumo que, para cada escenario meteorológico y plan de contingencia disponible proporciona.

Se presenta dos posibles soluciones a escoger por el sujeto:

A)

- Optar por una solución fija dada por el plan de contingencia C_1 con un valor en la función de consumo de 112,19 €/ha.
- Optar por una solución dinámica, con una probabilidad del 35% de alcanzar un valor de la función de consumo de 99,95 €/ha (al seleccionar el plan de contingencia C_1) y con una probabilidad del 65% de alcanzar un valor de la función de consumo de 119,40 €/ha (al seleccionar el plan de contingencia C_2).

A.1.- Valor esperado fijo

$$VE(\text{solución fija}) = 0,35 \times 112,19 + 0,65 \times 112,19 = 112,19 \text{ €/ha}$$

A.2.- Valor esperado dinámico

$$VE(\text{solución dinámica}) = 0,35 \times 99,95 + 0,65 \times 119,40 = 112,59 \text{ €/ha}$$

B.1.- Utilidad esperada fija

$$UE(\text{solución fija}) = 0,35 \times \ln(112,19) + 0,65 \times \ln(112,19) = 0,15 \times 4,72 + 0,85 \times 4,72 = 4,72 \text{ €/ha}$$

B.2.- Utilidad esperada dinámica

$$UE(\text{solución dinámica}) = 0,35 \times \ln(99,55) + 0,65 \times \ln(119,40) = 0,15 \times 4,6 + 0,85 \times 4,78 = 4,71 \text{ €/ha}$$

Al ser la utilidad esperada de la solución fija mayor que la utilidad esperada de la solución dinámica, $UE(\text{solución fija}) > UE(\text{solución dinámica})$, se puede observar que la actitud del sujeto decisor frente al riesgo, es recogida por la utilidad esperada y no el valor esperado, siendo por tanto la ecuación de la utilidad esperada la que debe ser considerada a la hora de analizar la decisión que tomará el sujeto en ambientes de incertidumbre.

La probabilidad de error o percance para que el sujeto decisor adopte un comportamiento indiferente entre las dos opciones (selección fija y selección dinámica), se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$0,35 \times \ln(112,19) + 0,65 \times \ln(112,19) = 0,15 \times 4,72 + 0,85 \times 4,72p' \times \ln(99,55) + (1-p') \times \ln(119,40) \\ 4,72 = p' \times 4,6 + (1-p') \times 4,78 \rightarrow p' = 0,33$$

Este resultado indica que la probabilidad de percance debe disminuir del 35% al 33%, para que el sujeto decisor se muestre indiferente entre seleccionar la solución fija o la solución dinámica.

El valor “equivalente certeza” de la opción de selección dinámica, se obtiene considerando la utilidad esperada de la selección dinámica:

$$U(EC) = UE(\text{selección dinámica})$$

$$\ln(EC) = 4,71 \rightarrow EC = e^{4,71} = 111,05 \text{ €/ha}$$

El “equivalente certeza”, proporciona información del comportamiento del sujeto decisor, el cual se muestra indiferente entre obtener un valor cierto de consumo igual a 111,05 €/ha que obtener con riesgo en el incremento de costes de extinción y la minoración del valor económico salvado de los recursos naturales, un valor esperado del consumo de 112,19 €/ha.

Finalmente la “prima de riesgo”, entendida ésta como la máxima cantidad que un sujeto decisor está dispuesta a pagar con tal de no correr riesgo, se determina por la diferencia entre el valor esperado de la solución fija y el “equivalente de certeza” determinado. Para el caso estudiado en el presente trabajo dicha prima es:

$$PR = VE(\text{Solución fija}) - EC = 112,19 - 111,05 = 1,14 \text{ €/ha}$$

Es decir, el sujeto decisor está dispuesto a renunciar como máximo a 1,14 €/ha, con tal de evitar el riesgo. Dicho de otra forma es la máxima cantidad que el sujeto decisor averso al riesgo está dispuesto a aceptar (pagar) con tal de no tener que asumir el riesgo. Integrando la información anterior en el gráfico de utilidades versus consumo, se puede mostrar tanto el “equivalente certeza” como la “prisma de riesgo” (figura nº 2).

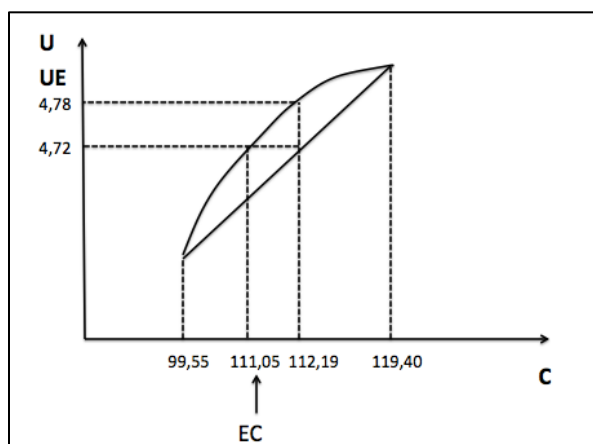


Figura 2. Gráfico de las utilidades esperadas versus valores de consumo obtenidos con el análisis de los planes de contingencia.

Discusión

La gestión operacional de las actividades de extinción de incendios forestales, resulta ser compleja, al tener que tomar la dirección técnica de extinción del incendio, decisiones bajo escenarios de incertidumbre. La recopilación de la experiencia de los actores, basada en procesos previos de capitalización, no es frecuente. Esto implica la pérdida continuada de las vivencias al no ser protocolizada la metodología necesaria para recopilar, filtrar, ordenar y finalmente clasificar la información obtenida. La falta de costumbre en el monitoreo de datos relacionado con las operaciones de supresión, constituye uno de los problemas que limitan la reducción del desconocimiento en los escenarios de combate y extinción de los incendios forestales.

La mejora operacional y el progresivo incremento en las operaciones de extinción de los incendios forestales, se consigue con el avance del conocimiento que proporcionan las experiencias capitalizadas y el respaldo de las investigaciones científicas. En este sentido la toma de decisión basada en la reducción de la incertidumbre, conduce a soluciones más eficientes en los planes de extinción de

incendios forestales. La metodología propuesta en el presente trabajo, representa una primera aproximación en el uso de herramientas de análisis y predicción económica que proporcionan un horizonte de claridad en escenarios de incertidumbre.

El análisis del riesgo y de la incertidumbre, en términos de la utilidad esperada, ofrece oportunidades de diagnóstico en la selección de estrategias de extinción en el marco de la gestión del paisaje forestal y del manejo del fuego. La determinación del comportamiento del sujeto en relación con las posibles decisiones que puede adoptar frente al riesgo en escenario de incertidumbre operacional, abre una nueva vía para estudiar los resultados potenciales de los planes operacionales, conjugando en los mismos, la combinación estratégica de los medios de extinción, los costes de extinción y el cambio neto en el valor de los recursos afectados.

La inclusión en el análisis de factores relacionados con la probabilidad de éxito, ofrece de forma comparada los “beneficios” en términos de pagos resultantes tras el análisis comparado de los planes de contingencia definidos. La elección de la función de utilidad que sirve de respaldo al proceso analítico, es una de las partes principales de esta metodología. Desde funciones matemáticas a funciones econométricas que proporcionan resultados en términos de productividad (Cobb-Douglas, CES, Translog, etc.), existen diferentes opciones de estudios de la información de la calidad que facilitan cada una de ellas.

En el caso analizado en el presente trabajo, se ha optado por la función de utilidad que determina el logaritmo neperiano de la variable de consumo. Esta función devuelve una caracterización del comportamiento del sujeto, en el marco de la aversión al riesgo, caracterizado por la concavidad de la curva de utilidad (figura nº 2). Es importante indicar que en ambiente de incertidumbre y sobre todo en el marco de la gestión operacional de las emergencias, los sujetos decisores, optan por mantener un comportamiento de aversión al riesgo en contra de decisiones que asumen la aplicación de planes de contingencia más eficientes pero que o bien no cuentan con experiencia de resultados contratados, o las probabilidades de éxito son difíciles de acordar y por tanto de establecer.

En todo caso, la experiencia adquirida en la toma de decisiones empresariales en situaciones de incertidumbre (inversiones en bienes y equipos, inversiones bursátiles, compras de activos financieros, contratación de seguros, etc.), así como las investigaciones científicas en los modelos microeconómico de riesgo e incertidumbre, constituyen una sólida base para el desarrollo de herramientas de planificación y ayuda a la toma de decisión en las operaciones de extinción de incendios forestales.

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), por su apoyo y ayuda presupuestaria en la realización del presente trabajo.

Referencias

- Arrow, K. J. (1965).** "Aspects of the Theory of Risk Bearing". The Theory of Risk Aversion. Helsinki: Yrjö Jahnssonin Saatio. Reprinted in: Essays in the Theory of Risk Bearing, Markham Publ. Co., Chicago, 1971, 90–109.
- Castillo M., Rodríguez y Silva F. 2015.** Quantitative analysis of forest fire extinction efficiency. *Forest Systems* 24, e032, 9 pages
- Gollier C. 1999.** The Economics of Risk and Time. Cambridge. MA: MIT Press.
- Minas J.P., Hearne J. W., Hadmer J. W. 2012.** A review of operations research methods applicable to wildfire management. *International Journal of Wildland Fire* 21(3) 189-196 <http://dx.doi.org/10.1071/WF10129>
- 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. In: Columbus, F. (Ed.). *Forest Fires: Detection, Suppression, and Prevention*. Nova Science Publishers; 33-88.
- Molina, J.R., Rodríguez y Silva, F., Herrera, M.A. 2016.** Integrating economic landscape valuation into Mediterranean territorial planning. *Environmental Science & Policy* 56, 120–128.
- Pratt, J. W. (1964).** "Risk Aversion in the Small and in the Large". *Econometrica*. **32** (1–2): 122–136. [doi:10.2307/1913738](https://doi.org/10.2307/1913738). [JSTOR 1913738](https://www.jstor.org/stable/1913738)
- 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., Rodríguez J. 2014.** The efficiency analysis of the fire control operations using the VISUAL-SEVEIF tool. *Advances in Forest Fire Research*. http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6_210
- 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* 25 (2016) 149–159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfe.2016.10.002>
- Varian H., 2005.** Intermediate Microeconomics. 6th Edition. Word Press.