

Momento Propicio para el Tratamiento del Combustible y la Extinción en la Aminoración del Riesgo de Incendio Forestal^{1 2}

Mariam Lankoande,³ Jonathan Yoder⁴

Resumen

La aminoración del riesgo de incendio forestal mediante el control integral de la vegetación *ex ante* está recibiendo más atención en los Estados Unidos, después del gran hincapié hecho en la extinción durante un siglo. Esta ponencia presenta un modelo económico dinámico con tres conjuntos de variables de elección de entrada: el momento propicio para las intervenciones de control integral de la vegetación previas al aprovechamiento, la fecha de dicho aprovechamiento, y las labores de extinción previstas en un contexto donde dicho control previo reduce el riesgo de incendio forestal. El modelo se puede aplicar a tres importantes aspectos de política general: 1) una representación general de la relación entre la aminoración *ex ante* del riesgo mediante el control integral de la vegetación y la extinción del incendio forestal, que puede aplicarse a una clase amplia de preferencias concretas; 2) las consecuencias del daño potencial grave del fuego en la colindancia urbana/forestal en los regímenes de control integral de la vegetación; y 3) las consecuencias que prevén las normas sobre responsabilidad civil para la quema prescrita y las cargas excesivas de combustible, en las decisiones que se toman en el control integral de la vegetación. Los resultados de la simulación numérica se presentan y comentan como ejemplos de las consecuencias del modelo.

Introducción

Existen muchas propuestas para reducir el riesgo de las pérdidas económicas asociadas a los incendios forestales. Los diferentes tratamientos químicos y de clareo mecánico pueden reducir el riesgo de dichos incendios, al igual que lo pueden hacer las medidas a prueba de incendios en las estructuras fabricadas por el ser humano. El fuego por sí mismo, en forma de quema dirigida y planeada, puede ser útil para reducir el riesgo de incendio forestal (Prestemon y otros, 2001; Pattison, 1998; Babbitt, 1995).

¹ Una versión abreviada de esta ponencia se presentó en el segundo simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los programas de protección contra incendios forestales, 19–22 Abril, 2004, Córdoba, España.

² En toda esta ponencia se usa la notación matemática estadounidense, incluidos los años, cifras económicas, etc.

³ Mariam Lankoande es estudiante graduada, Department of Agricultural and Resource Economics, Washington State University, PO Box 646210, Pullman, WA 99164.

⁴ Jonathan Yoder es profesor auxiliar, Department of Agricultural and Resource Economics, Washington State University, PO Box 646210, Pullman, WA 99164.

combustible *ex ante* y la extinción *ex post*. Como la masa forestal crece y madura en el tiempo, y el riesgo de incendio cambia a la vez, nos centramos en el momento propicio de las intervenciones de ordenación del combustible, donde dichas intervenciones pueden realizarse mediante la quema prescrita o el clareo mecánico. El análisis está compuesto de dos partes. La primera es un modelo económico dinámico del momento propicio de las intervenciones para aminorar el riesgo de incendio forestal, del momento propicio del aprovechamiento, y de la extinción. En la segunda, examinamos tres asuntos de política general y de gestión concretos: a) una representación general de la relación entre la aminoración del riesgo *ex ante*, a través del control integral de la vegetación y la extinción del incendio forestal, que puede aplicarse a una clase amplia de preferencias específicas; b) las consecuencias del daño grave potencial del fuego en la colindancia urbana/forestal para los regímenes de control integral de la vegetación; y c) las consecuencias que prevén las normas de responsabilidad civil derivadas de las cargas excesivas de combustible y de los costes de la extinción, en las decisiones que se toman en el control integral de la vegetación. Los resultados de la simulación numérica se presentan como ejemplos de las consecuencias del modelo analítico.

Un modelo del momento propicio para la ordenación del combustible y el aprovechamiento

El beneficio neto de la ordenación de la masa forestal está modelado como una rotación Faustmann modificada en la que el propietario aumenta al máximo el valor neto actual previsto de la rotación, eligiendo las fechas previstas de las intervenciones de control integral de la vegetación, aprovechamiento y extinción, dado un incendio forestal. En cualquier momento, durante el tiempo de maduración de la masa forestal, puede darse el caso de dicho incendio, que pueda provocar daños tanto en dicha masa, como en otras propiedades no madereras. La trayectoria en el tiempo del riesgo de incendio esta influida por las intervenciones de ordenación del combustible (de ahora en adelante, “intervenciones”), y la extensión del daño dado que un incendio forestal pueda crear, antes de que pueda disminuir el aprovechamiento, gracias a las labores de extinción. Reed (1984, 1987), Yoder (en prensa), y otros han desarrollado modelos de rotación de la madera, bajo riesgo de incendio forestal y control integral de la vegetación. Este modelo es diferente en cuanto que es igual a una rotación anidada, que considera a la vez, el momento propicio tanto para las fechas de intervención, como para las del aprovechamiento.

En este contexto, la optimización resulta de maximizar conjuntamente las intervenciones previas al aprovechamiento $n-1$, y una fecha de aprovechamiento (la intervención n^{th}), más las labores de extinción en caso de incendio. Un componente básico del problema es que las intervenciones afectan a la probabilidad de incendio forestal. Dado el vector del momento propicio óptimo $\mathbf{T}_n = [T_{n,1}, T_{n,2}, \dots, T_{n,n}]'$, la probabilidad de que suceda un incendio forestal en cualquier momento t_0 , dentro de la rotación es:

$$F(t_0, \mathbf{T}_n) = \int_0^{T_1} f(t)dt + \int_{T_1}^{T_2} f(t - T_1)dt + \dots + \int_{T_{i-1}}^{t_0} f(t - T_{i-1})dt$$

donde $f(t)$ es la probabilidad de que ocurra un incendio en un momento t . Adviértase, también, que toda intervención produce un reajuste en la probabilidad de que un

incendio forestal destructivo vuelva a su estado inicial. En los cálculos siguientes, necesitaremos una versión ponderada de $F(t_0, \mathbf{T}_n)$, evaluada en los tiempos de intervención:

$$G(T_{n,i}, \mathbf{T}_n) = \int_0^{T_1} e^{-rt} f(t) dt + \int_{T_1}^{T_2} e^{-rt} f(t - T_1) dt + \dots + \int_{T_{i-1}}^{T_i} e^{-rt} f(t - T_{i-1}) dt.$$

La persona responsable aumenta al máximo el valor neto actual previsto de los beneficios, dada la incertidumbre de que suceda un incendio forestal. La porción de los beneficios y los costes de la producción de madera, y la aminoración del riesgo de incendio forestal pueden descomponerse por grupos de la forma siguiente:

1. Si no sucede ningún incendio antes del aprovechamiento, el propietario recibe el valor de la madera de fuste, que es $e^{-rT} V(T_{n,n})$. Para simplificar, asumimos que el valor que desarrolla la madera no es una función de intervenciones, sino tan solo el tiempo desde la plantación.
2. Si sucede algún incendio forestal, el propietario recibe $(1 - g(s))V(T_{n,n})$ en el período $T_{n,n}$, donde $g(s)$ es la fracción del valor perdido de la madera a causa del fuego. Las labores de extinción s reducen la fracción pérdidas, pero a una tasa de disminución tal que $g'(s) < 0$ y $g''(s) > 0$. No se obtiene una pérdida financiera en términos de valor de madera en el momento del incendio forestal, porque dicha madera no se ha vendido todavía. Asumimos que esta madera se ha aprovechado al mismo tiempo, sin tener en cuenta si el incendio sucede o no.
3. Si un incendio sucede en un momento X , los costes totales de extinción $\tau \cdot s$ se pagan, cuyo valor actual es $e^{-rX} \tau s$. Sin embargo, como X es aleatorio, el propietario aumentará al máximo el valor descontado previsto de esta variable aleatoria, que es $s \cdot \tau \cdot G(T_{n,n}, \mathbf{T}_n)$.
4. Alguna parte del valor de la propiedad no maderera, puede quedar dañada. Para evitar esto, introducimos una constante D que representa el daño potencial de dicha propiedad. Este daño aumenta cuando, y si, sucede un incendio forestal, y la extensión de las pérdidas puede atenuarse mediante la extinción. Por tanto, el valor actual esperado de los daños en los bienes no madereros es $g(s) \cdot D \cdot G(T_{n,n}, \mathbf{T}_n)$.
5. Dados los costes marginales de intervención w , el valor actual de los costes de intervención en la intervención i de n son $w e^{-rT_{n,i}}$, si no se dan incendios forestales antes de $T_{n,i}$. Sin embargo, puede suceder un incendio forestal antes de cualquier intervención dada. Por lo tanto, el coste actual esperado de cualquier intervención dada $T_{n,i}$ es $w \cdot e^{-rT_{n,i}} \cdot (1 - F(T_{n,i}, \mathbf{T}_n))$.

Al poner cada uno de estos elementos juntos y descontando apropiadamente para una serie infinita de rotaciones de aprovechamiento, el valor actual de la función de los beneficios netos previstos que hay que maximizar es:

$$\begin{aligned}
 E[PV(NB)]_n &= \frac{1}{1 - e^{-rT_{n,n}}} \left(\begin{array}{l} E[PV(\text{timber value})] \\ -E[PV(\text{suppression costs + damage})] \\ -E[PV(\text{intervention costs})] \end{array} \right) \\
 &= \frac{1}{1 - e^{-rT_{n,n}}} \left(\begin{array}{l} [e^{-rT_{n,n}} (1 - F(\mathbf{T}_n, T_{n,n}))g(s)V(T_{n,n})] \\ -[G(\mathbf{T}_n, T_{n,n})(\tau s + g(s)D)] \\ -I_{n>1} [w \sum_{i=1}^{n-1} e^{-rT_{n,i}} (1 - F(\mathbf{T}_n, T_{n,i}))] \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

(*) [*timber value*: valor de la madera; *suppression costs + damage*: costes de extinción + daños; *intervention costs*: costes de intervención]

Donde, para resumir la notación:

- $E[PV(NB)]_n$ es el valor actual de los beneficios netos previstos dadas n intervenciones;
- r es la tasa de descuento;
- \mathbf{T}_n es un vector ($n \times 1$) de $(n-1)$ fechas de intervención y aprovechamiento;
- $T_{n,i}$ es el tiempo de la intervención i^{th} ; la intervención n^{th} es el aprovechamiento.
- $V(T_{n,n})$ es el valor de la madera de fuste en la temporada de aprovechamiento;
- $F(\mathbf{T}_n, T_{n,i})$ es la probabilidad de que suceda un incendio forestal antes de un tiempo $T_{n,i}$, dado el vector de intervención \mathbf{T}_n ;
- $G(\mathbf{T}_n, T_{n,i})$ es la probabilidad descontada (valor actual) de que suceda un incendio antes del tiempo $T_{n,i}$, dado el vector de intervención \mathbf{T}_n ;
- s son las labores de extinción en el caso incendio forestal;
- $g(s)$ es la fracción del valor potencial perdido en caso de incendio;
- D es el daño potencial del valor de la propiedad no maderera;
- τ es el coste por unidad de labores de extinción;
- w es el coste para cada quema prescrita. Si no se dan intervenciones previas al aprovechamiento, la suma de los costes totales de la intervención es igual a cero;
- $I_{n>1}$ es una indicador variable que equivale a uno, si hay intervenciones previas al aprovechamiento (p. ej., si $n > 1$), y cero si lo contrario.

El número de variables de elección y, por tanto, el número de condiciones de primer orden para el problema dependen del número de intervenciones previas al aprovechamiento. En consecuencia, si asumimos que existe una solución para un máximo, para encontrar el vector de los argumentos que maximiza esta función se necesitan dos pasos. Primero, el vector de los tiempos de intervención óptimos \mathbf{T}_n y

las labores de extinción s está elegido de forma condicionada a un número específico de intervenciones. La optimización condicional se realiza sobre conjuntos de intervenciones factibles $n=1\dots m$, para encontrar m vectores condicionalmente óptimos $T_1\dots T_m$ y cada uno de sus valores asociados de las s óptimas. Entonces, se eligen los vectores $[T_b, s]$ que maximizan $E[PV(NB)]_n$.

Especificación de la simulación

El modelo anterior debe especificarse completamente para su simulación. Para un caso simulado, especificamos el modelo para intentar el cálculo estimado de un bosque de pinos ponderosa del interior de la región del noroeste. Para un periodo sin incendios, utilizamos una distribución Weibull con parámetros de localización, escala y configuración de $a=0$, $b=30$, $c=2$, respectivamente. Esto da por resultado una

función de densidad de probabilidad de $f(t)=0.002e^{-0.001t^2}$, y una función de

densidad acumulativa de $F(t)=1-e^{-0.001t^2}$, para la cual el período medio sin incendios es de aproximadamente 26.6 años (véase Smith and Fischer, 1997). Seguimos a Yang, Kozak y Smith (1978) y usamos una distribución Weibull para representar la función del valor que desarrolla la madera, cuyos parámetros se calculan de acuerdo con los datos presentados en Oliver and Powers (1978), para redondearlos después. La función de densidad Weibull estimada fue entonces ponderada por 500,000 para representar el valor que desarrolla la madera en el tiempo: $V(t)=500000(1-e^{-0.0005t^2})$. El efecto de la extinción está calculado en términos

de daños predeterminados. Para que en este ejemplo sea más sencillo, definimos esta función en términos de la fracción de daño potencial evitado, y basamos dicha

función como una función de densidad exponencial, $g(s_n)=e^{-0.1s_n}$, donde las labores de extinción s_n están definidas como una unidad de costes de extinción $\tau=5,000$. El coste unitario de una intervención de ordenación del combustible se establece en 1,000, y la tasa de descuento en 0.05. Finalmente, para tener en cuenta los daños causados por un incendio forestal, además de las pérdidas del valor de la madera, establecemos que D es, o igual a 200,000, o a cero (en el caso de que no haya daños externos, o no exista responsabilidad por daños).

Resultados

La *Tabla 1* contiene los resultados para tres conjuntos de estrategias de gestión: la utilización, a la vez, de las intervenciones de ordenación del combustible y la extinción, solo la intervención, y solo la extinción sin utilizar la ordenación del combustible. Cada una de estas estrategias de gestión se estudia en dos hipótesis diferentes: una con daño potencial cero para la propiedad no maderera, y otra con daño potencial de 200,000 para dicha propiedad. Los propietarios de tierras no son, por lo general, legalmente responsables de los daños por incendios forestales que se deban, en parte, al combustible acumulado en sus tierras, aunque la ley en relación a estos riesgos puede estar cambiando (véase Bakken, 1995).⁴ Por tanto, incluso si

⁴ Varios estados, incluido el de Washington, disponen de leyes parlamentarias que contemplan la responsabilidad civil en las leñas de corta, pero no para otros tipos de vegetación inalterada.

podiera haber daños externos, los propietarios de tierras tienen incentivos débiles para tenerlos en cuenta en sus procesos de toma de decisiones. Los turnos de rotación de la madera para las hipótesis son bastante cortos. Sin embargo, los resultados son suficientes para ilustrar las relaciones que se establecen en términos de ordenación del combustible, aprovechamiento de la madera y extinción de los incendios forestales.

Tabla 1: Resultados de la simulación

Estrategias de gestión	Tipo de responsabilidad	Momento propicio para quema prescrita	Óptimo # de combustibles	Turno óptimo de rotación	Unidades de extinción	Beneficio neto
Caso 1: Intervención y extinción	No responsable	$x_{6,1}=4.8,$ $x_{6,2}=9.1,$ $x_{6,3}=13.1,$ $x_{6,4}=16.7,$ $x_{6,5}=20.0,$ $x_{6,6}=22.8,$ $s_6=1.9.$	5	22.8	1.9	45419.3
	Responsable (200,000\$)	$x_{4,1}=4.6,$ $x_{4,2}=9.6,$ $x_{4,3}=15.0,$ $x_{4,4}=20.8,$ $s_4=16.5.$	3	20.8	16.5	37696.5
Caso 2: Solo intervención	No responsable	$x_{6,1}=4.9,$ $x_{6,2}=9.2,$ $x_{6,3}=13.1,$ $x_{6,4}=16.6,$ $x_{6,5}=19.8,$ $x_{6,6}=22.5.$	5	22.5	--	45351.7
	Responsable (200,000\$)	$x_{7,1}=2.7,$ $x_{7,2}=5.5,$ $x_{7,3}=8.3,$ $x_{7,4}=11.2,$ $x_{7,5}=14.2,$ $x_{7,6}=17.2,$ $x_{7,7}=20.3.$	6	20.3	--	33018.8
Caso 3: Solo extinción	No responsable	--	--	13.4	--	42003.2
	Responsable (200,000\$)	--	--	7.1	14.3	9221.6

Consideremos el caso 1, donde se aplican, a la vez, las intervenciones en el combustible y la extinción, y donde no hay daños externos de los que preocuparse ($D=0$ desde el punto de vista del propietario de la madera). Dados los parámetros del modelo, el valor actual neto previsto de la función objetivo está maximizado con la aplicación de 5 intervenciones de ordenación del combustible, una fecha de aprovechamiento de 22.8 años, y unas labores de extinción de 1.9 unidades. Las intervenciones en los turnos óptimos de rotación se acortan a medida que los progresos de dicha rotación de la madera se inician con el primero, a los 4.8 años, y

el último (al final de la aprovechamiento) a los 2.8. La razón de lo anterior reside en que la pérdida potencial derivada de los incendios forestales crece al igual que crece el valor de la madera, así que tiene sentido económico reducir, más a menudo, el riesgo de incendio forestal a medida que aumenta el valor de la madera. Consideremos ahora qué sucede cuando el daño potencial aumenta hasta 200,000. Las unidades que representan las labores de extinción aumentan desde poco menos de dos a más de 16 unidades, y la fecha del aprovechamiento de la madera se adelanta. Esto se debe en parte, al menos, indudablemente, al gran incremento en los gastos de extinción.

Cuando se utiliza exclusivamente la intervención de la ordenación del combustible y no la extinción (caso 2), el número de intervenciones retrocede hasta cinco y seis, con y sin daños externos respectivamente. Sin ningún daño, el turno de rotación óptimo es ligeramente más corto que cuando se utiliza la extinción. Además, y aunque las diferencias son sutiles, las intervenciones se posponen un poco, y se agrupan cuanto más se acerca el turno de la rotación de la madera en comparación con los resultados del caso 1. Por tanto, intuitivamente, las intervenciones en el combustible se utilizan, con más frecuencia, para sustituir a la extinción, cuando los valores de la madera son más altos. Cuando están implicados los daños externos, la rotación de madera cae más de dos años, y el número de intervenciones aumenta de uno a seis.

En el caso 3, no se pone en práctica ningún régimen de ordenación del combustible, y solo la extinción y el momento propicio del aprovechamiento de la madera dependen de las variables de elección. En este caso, las fechas del aprovechamiento de la madera son impresionantemente bajas, a los 13 y 7 años respectivamente.⁵ De modo interesante, sin ordenación del combustible, y sin daños potenciales a la propiedad no maderera, el resultado es que el riesgo de incendio forestal está relacionado totalmente con la reducción del momento del turno de rotación de la madera, antes de depender de la extinción. Cuando el daño de la propiedad no maderera se establece en 200,000, la extinción, sin embargo, salta por encima de las 14 unidades.

Consecuencias para la gestión del riesgo de incendios en el medio forestal

Los resultados de la simulación anterior iluminan algo las relaciones entre la gestión *ex ante* de los combustibles y los efectos de los incentivos tanto en los daños potenciales graves, como en la falta de responsabilidad total en los incentivos en la gestión de dichos combustibles. Las relaciones entre dicha gestión para aminorar el riesgo de incendios forestales y la extinción, puede examinarse en las diferentes hipótesis expuestas arriba, que muestran cómo que la gestión de los combustibles, e incluso el aprovechamiento de la madera, pueden utilizarse como medios para reducir las labores de extinción. Si el daño potencial de los incendios forestales es grande, como en la colindancia forestal/urbana, tiene sentido cambiar las intervenciones de ordenación del combustible, y el aprovechamiento, bien aumentando el número de intervenciones, bien incrementando la frecuencia de aprovechamiento de la madera, incluso cuando la extinción se utilice en caso de incendio forestal. Finalmente, aun cuando los propietarios de tierras con vegetación inflamable puedan contribuir a la

⁵ De nuevo, estas edades de aprovechamiento forestal son excesivamente bajas, pero el caso ejemplifica las principales implicaciones del modelo.

incidencia y la gravedad de los incendios forestales, tienden a no enfrentarse a la responsabilidad civil por estas acciones. Por ésta, y otras razones, los incentivos para el uso de la ordenación de los combustibles en terrenos privados son relativamente débiles. Si, además, los costes de las labores de extinción provienen de organismos públicos, estos incentivos para reducir los riesgos de incendios forestales asociados con sus tierras son todavía menores.

Reconocimientos

Esta investigación está financiada por el Washington State Agricultural Research Center.

Referencias

- Babbitt, Bruce; Sampson, Neil. 1995. **To Take Up the Torch**. *American Forests* 101:17.
- Bakken, Stephen R. 1995. **The Liability and Environmental Consequences of not Burning in California**. In: **Proceedings of the Environmental Regulation and Prescribed Fire Conference**, 14-17 de marzo de 1995; Tampa, Florida; 131-138.
- Oliver, William W; Powers, Robert F. 1978. **Growth models for ponderosa pine: I. Yield of unthinned plantations in northern California**. Research Paper PSW-133, 21p. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service Berkeley, U.S.D.A, Berkeley, Calif.
- Pattison, Malka. 1998. **Fighting Fire with Fire: A Policy to Improve Resource Management and Reduce Risk**. *Renewable Resources Journal* pp. 13-17.
- Prestemon, Jeffrey P.; Mercer, D. Evan.; Pye, John M.; Butry, David T.; Holmes, Thomas P.; Abt, Karen L. 2001. **Economically Optimal Wildfire Intervention Regimes**. Chicago, IL: American Agricultural Economics Association Annual Meeting.
- Reed, William J. 1984. **The Effects of the Risk of Fire on the Optimal Rotation of a Forest**. *Journal of Environmental Economics and Management* 11:180-190.
- Reed, William J. 1987. **Protecting Forest Against Fire: Optimal Protection Patterns and Harvest Policies**. *Natural Resource Modeling* 2:22-53.
- Smith, Jane K.; Fischer, William C. 1997. **Fire Ecology of the Forest Habitat Types of Northern Idaho**. Technical Report INT-GTR-363, USDA Forest Service, Septiembre.
- Yang, Richard C., Antel Kozak, and J. Harry G. Smith. 1978. **The potential of Weibull-type functions as flexible growth curves**. *Canadian Journal of Forest Resources* 8:424-431.
- Yoder, Jonathan. In press. **Playing with Fire: Endogenous Risk in Resource Management**. *American Journal of Agricultural Economics*.