

Evaluación del efecto de la carga de combustible y de la inclinación del terreno sobre la velocidad de propagación del fuego bajo condiciones de laboratorio

Alexandre Beutling¹, Felipe Beutling², Antonio Carlos Batista³, Lorena Stolle⁴

Resumen

En el laboratorio de incendios forestales de la Universidad Federal del Paraná-Curitiba, Brasil, fue realizada una investigación sobre quema de acículas de *Pinus elliottii* Engelm. con el objetivo de evaluar la influencia de la inclinación del terreno (cinco niveles de inclinación: 0, 5, 10, 15 y 20 grados de inclinación) y de la carga del combustible a zero por ciento de humedad ($w_1 = 0,2 \text{ kg m}^{-2}$ y $w_2 = 0,4 \text{ kg m}^{-2}$) sobre la velocidad de propagación del fuego. Para cada una de las cargas (w_1 y w_2) fueron realizadas cinco repeticiones en cada uno de los niveles de inclinación, totalizando 50 quemas. En cada quema fueron obtenidas mediciones de longitud de las llamas y velocidad de propagación del fuego, realizando el monitoreo de la temperatura y humedad relativa del aire. Los resultados presentados indican que hasta 10 grados de inclinación, la carga es el factor más importante en la variación de la velocidad de propagación y en los niveles de inclinación 15 y 20, la inclinación es el factor más importante en la variación de la velocidad de propagación del fuego (*tabla 1*).

Tabla 1 - Comparación de promedios para las velocidades de propagación del fuego en quemas de acículas de *Pinus elliottii*, bajo condiciones de laboratorio, Curitiba-Brasil.

Método: 95 pct Student-Newman-Keuls				
Carga	Inclinación	Lecturas	Velocidad (m s ⁻¹)	Grupos Homogéneos
0,2	5°	45	0,000478574	X
0,2	plano	45	0,000503836	X
0,4	plano	45	0,000579103	XX
0,2	10°	45	0,000597506	XX
0,4	5°	40	0,000647513	X
0,2	15°	45	0,000882968	X
0,4	10°	45	0,000897455	X
0,4	15°	45	0,00129253	X
0,2	20°	45	0,00139211	X
0,4	20°	45	0,001915	X

1 Ingeniero Forestal M.Sc. Universidade Federal do Paraná, Paraná, Brasil

2 Académico en Ingeniería Forestal, Fundação Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, Brasil

3 Profesor Dr. Departamento de Ciencias Forestales da Universidade Federal do Paraná, Paraná, Brasil

4 Ingeniero Forestal. Universidade Federal do Paraná, Paraná, Brasil

Introducción

Durante la ocurrencia de un incendio forestal, el tipo de combustible, las condiciones atmosféricas y el relieve interactúan entre sí determinando el comportamiento del fuego. El comportamiento del fuego se relaciona principalmente con la velocidad en la cual éste se propaga sobre la superficie alcanzada y la dimensión desarrollada por las llamas. En este contexto, la topografía ejerce importante papel pues según Couto y Cândido (1.980) “la velocidad desarrollada por un incendio forestal cuesta arriba es casi directamente proporcional a la inclinación topográfica”. Brown y Davis (1.973) mencionan que la topografía implica en significativos cambios en el peligro de incendios. De acuerdo con estos autores, el efecto de la topografía sobre el comportamiento del fuego puede ser comparado al efecto del viento sobre el fuego, manteniendo los demás factores constantes. De acuerdo con Soares (1.985), investigaciones en quemas controladas realizadas en el sureste de Estados Unidos, se han registrado velocidades de propagación del fuego entre 20 a 30 m/hora (promedio de $0,0069 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) en declives y entre 158 a 198 m/hora (promedio de $0,049 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) cuesta arriba. Goldammer (1.982) mencionó que la velocidad de propagación del fuego dobla en cuesta arriba de 10° y se hace hasta cuatro veces mayor a 20° .

Con base en estos conceptos, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el grado de influencia de cinco niveles de inclinación del terreno sobre la velocidad de propagación del fuego, a partir de quemas de acículas en condiciones de laboratorio, utilizando dos cargas de material combustible.

Material y métodos

Fueron recogidas acículas provenientes de un bosque de *Pinus elliottii* con edad estimada en 10 años, localizado en el Campus III – Jardín Botánico de la Universidad Federal de Paraná. El material recogido fue sometido al secado en estufas durante un periodo de 48 horas a temperatura constante de 75°C . Fueron utilizados en total 15,0 kg de acículas (peso seco) en la conducción del experimento, distribuidas en dos clases de carga (w_n), siendo ellas: carga uno (w_1) = $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ y carga dos (w_2) = $0,4 \text{ kg m}^{-2}$. El montaje de la “cama” – *fuelbed* – de combustible fue realizada sobre una superficie de 1 m^2 , en la cual cada carga fue distribuida homogéneamente, con variación sólo en el espesor del manto, de forma a mantener la densidad del combustible constante en todas las quemas. Durante la quema, fueron obtenidas las informaciones de altura de las llamas y la velocidad de propagación del fuego, medidas a partir de nueve intervalos iguales de 10 cm. Al final de cada quema fueron recogidas informaciones de temperatura y humedad relativa del aire. La *tabla 2* presenta el delineamiento del experimento, donde cada carga (w_n) fue sometida a quemas con cinco repeticiones en cada uno de los cinco niveles de inclinación del terreno que fueron probadas, totalizando 50 quemas.

El análisis estadístico de los datos fue realizado utilizando el software *Statgraphics plus 4.1*. Los resultados fueron sometidos a análisis de varianza y, cuando detectada diferencia significativa entre por lo menos un par de promedio de resultados, la metodología utilizada fue la prueba de comparación de medias de *Student, Newman y Keuls* (SNK).

Tabla 2 - Descripción del experimento

Carga (wn)	Densidad (kg m ⁻³)	Espesor del manto (m)	Inclinación (grados)	Nº de repeticiones
w1	6,66	0,03	0	5
w1	6,66	0,03	5	5
w1	6,66	0,03	10	5
w1	6,66	0,03	15	5
w1	6,66	0,03	20	5
w2	6,66	0,06	0	5
w2	6,66	0,06	5	5
w2	6,66	0,06	10	5
w2	6,66	0,06	15	5
w2	6,66	0,06	20	5

Resultados y discusión

En un primer momento fue necesario verificar la consistencia en el delineamiento y conducción del experimento, donde los valores de la velocidad de propagación del fuego resultantes de cada quema realizada en los respectivos grados de inclinación fueron sometidos al análisis de varianza, en la cual quedó comprobada la no existencia de diferencias significativas entre los promedios de repeticiones. De este modo, se ha dado continuidad a la evaluación del comportamiento del fuego.

Evaluación de la influencia de la declividad sobre la velocidad de propagación del fuego en quemas con carga de 0,2 kg m⁻²

Los valores promedios de las velocidades de propagación del fuego obtenidos de las quemas con carga de 0,2kg m⁻² están representados en la *tabla 3*.

Tabla 3 – Velocidad de propagación del fuego en los diferentes niveles de inclinación del terreno para carga de 0,2kg m⁻²

INCLINAÇÃO DO TERRENO (graus)	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO (m s ⁻¹)
Plano (0°)	0,000503836
Aclive com 5°	0,000478574
Aclive com 10°	0,000597506
Aclive com 15°	0,000882968
Aclive com 20°	0,00139211

Los valores promedios de velocidad de propagación obtenidos durante las quemas fueron sometidos al análisis de varianza donde, habiendo sido detectadas diferencias estadísticas entre por lo menos un par de medias, se procedió al cálculo de comparación de medias, cuyo resultado se encuentra en la *tabla 4*.

Tabla 4 – Prueba de comparación de medias para la velocidad de propagación del fuego en quemas con $0,2 \text{ kg m}^{-2}$.

Método: 95 pct Student-Newman-Keuls				
Carga	Inclinación	Lecturas	Velocidad (m s^{-1})	Grupos Homogéneos
0,2	5°	45	0,000478574	X
0,2	plano	45	0,000503836	X
0,2	10°	45	0,000597506	X
0,2	15°	45	0,000882968	X
0,2	20°	45	0,00139211	X

De acuerdo con el resultado enunciado en la *tabla 4*, en la inclinación de 5° no fue verificada una diferencia de velocidad de propagación del fuego en relación al valor registrado para superficie plana. La velocidad de propagación en la superficie con 5° grados de inclinación se presentó incluso ligeramente inferior a la media registrada para superficie plana, que teóricamente debería presentar la menor velocidad de entre todos los niveles de inclinación. Sin embargo, en las demás inclinaciones se verificaron velocidades de propagación del fuego distintas para cada nivel de inclinación, confirmando la hipótesis de que la declividad se constituye en uno de los elementos que interfieren en el comportamiento del fuego. En relación al valor medio de la velocidad de propagación del fuego establecida para la superficie plana y con 5° de inclinación, se observó un aumento de velocidad de la orden de 1,21 veces con relación a 10°, 1,79 veces con relación a 15° y 2,83 veces con relación a 20°.

Evaluación de la influencia de la declividad sobre la velocidad de propagación del fuego en quemas con carga de $0,4 \text{ kg m}^{-2}$

Los valores medios de velocidad de propagación del fuego obtenidos de las quemas con carga de $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ están representados en la *tabla 5*.

Tabla 5 – Velocidad de propagación del fuego en los diferentes niveles de inclinación del terreno $0,4 \text{ kg m}^{-2}$

INCLINACIÓN DEL TERRENO (grados)	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (m s^{-1})
0°	0,000579103
5°	0,000647513
10°	0,000897455
15°	0,00129253
20°	0,001915

Los valores medios de velocidad de propagación obtenidos durante las quemas fueron sometidas al análisis de varianza donde, habiendo sido detectada diferencias significativas entre por lo menos un par de medias, se procedió al cálculo de comparación de las mismas, cuyo resultado se encuentra en la *tabla 6*.

Tabla 6 – Prueba de comparación de medias para velocidad de propagación del fuego en quemas con $0,4 \text{ kg m}^{-2}$.

Método: 95 pct Student-Newman-Keuls				
Carga	Inclinación	Lecturas	Velocidad (m s^{-1})	Grupos Homogéneos
0,4	plano	45	0,000579103	X
0,4	5°	40	0,000647513	X
0,4	10°	45	0,000897455	X
0,4	15°	45	0,00129253	X
0,4	20°	45	0,001915	X

De acuerdo con el resultado expresado en la *tabla 6* se ha verificado que, igualmente al resultado obtenido en las quemas con carga de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$, la velocidad de propagación en superficies con 5° de pendiente no fue afectada por el nivel de inclinación y, a pesar de este valor presentarse ligeramente superior a la media registrada para superficie plana, ambas fueron consideradas estadísticamente iguales por la Prueba SNK. Sin embargo, en las demás inclinaciones se observaron velocidades de propagación distintas entre sí, a medida en que aumentaba el nivel de inclinación de la superficie. En relación al valor medio de la velocidad de propagación del fuego establecida para la superficie plana y con 5° de inclinación, se observó un aumento de velocidad a razón de 1,46 veces en la superficie con pendientes de 10°; 2,11 veces con relación a 15° y 3,12 veces para superficies con 20° de inclinación. Chandler y otros (1983) al citar McArthur (1962) mencionó que la velocidad de propagación se duplica cada 10° de aumento en declividades del terreno

Evaluación de la influencia de la carga y de la declividad sobre la velocidad de propagación del fuego

Con el objetivo de determinar cual de los dos factores, carga o grado de inclinación, ejercen mayor influencia en la determinación de la velocidad de propagación del fuego, se ha realizado una nueva prueba estadística, en la cual fueron considerados todos los valores de velocidad del fuego obtenidos en las quemas con $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ y con $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ de carga. La *tabla 7* presenta el resultado del análisis de varianza, en la cual fue constatada diferencias significativas entre por lo menos un par de medias.

Tabla 7 – Análisis de varianza para velocidad de propagación del fuego

Fonte	SQ	GL	QM	F
Entre grupos	0,0000903514	9	0,000010039	191,60*
Dentro de los grupos	0,0000227916	435	5,23945E-8	
Total	0,000113143	444		

*significativo al nivel de 95pct

La *tabla 8* presenta el resultado de la prueba de comparación de medias.

Tabla 8 – Prueba de comparación de medias para velocidad de propagación del fuego

Método: 95 pct Student-Newman-Keuls				
Carga	Inclinación	Lecturas	Velocidad (m s ⁻¹)	Grupos Homogéneos
0,2	5°	45	0,000478574	X
0,2	plano	45	0,000503836	X
0,4	plano	45	0,000579103	XX
0,2	10°	45	0,000597506	XX
0,4	5°	40	0,000647513	X
0,2	15°	45	0,000882968	X
0,4	10°	45	0,000897455	X
0,4	15°	45	0,00129253	X
0,2	20°	45	0,00139211	X
0,4	20°	45	0,001915	X

Los resultados de la prueba de comparación de medias demostraron que tanto el grado de inclinación cuanto la carga del material combustible ejercen influencias sobre la velocidad de propagación del fuego. Sin embargo, en base a los resultados obtenidos expresados en la *tabla 8*, se observó que la velocidad de propagación del fuego para carga de 0,2 kg m⁻² sometida a 0°, 5° y 10° de inclinación obtuvo media estadísticamente igual a la velocidad de propagación resultante de la carga de 0,4 kg m⁻² en superficie plana (0° de inclinación). Del mismo modo, fueron observadas velocidades de propagación semejantes cuando originadas de las quemaduras con carga de 0,2 kg m⁻² a 10° y 0,4 kg m⁻² a 0° y 5°, razón por la cual hasta el nivel de 10° de inclinación, el factor con mayor influencia sobre la velocidad de propagación del fuego aparentemente es la carga del material combustible existente sobre la superficie. Para las velocidades originadas de la quemadura con carga de 0,2 kg m⁻² a 15° y 0,4 kg m⁻² a 10°, tanto el grado de inclinación, como la carga del material combustible se equivalen en cuanto a la influencia sobre la velocidad de propagación. A partir de este punto se ha verificado la posibilidad de que la declividad pasa a ser el factor de mayor peso en la determinación de la velocidad de propagación del fuego, conforme a la tendencia demostrada por los resultados, donde la velocidad de propagación de la quemadura de 0,4 kg m⁻² a 15° de inclinación fue menor que la velocidad de propagación de la quemadura de 0,2 kg m⁻² a 20° y este por su parte, menor que de 0,4 kg m⁻² a 20°.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que:

- 1) En ambas cargas analizadas, la velocidad de propagación del fuego no fue afectada por la inclinación de 5°, siendo esta estadísticamente igual a la velocidad calculada para la superficie plana;
- 2) Analizando la velocidad de propagación de fuego, con relación a las diferentes cargas utilizadas, se ha verificado que existe una diferencia para cada uno de los grados de inclinación evaluados.

- 3) Con relación a la velocidad obtenida en superficie plana, para carga con $0,2 \text{ kg m}^{-2}$ se ha verificado un aumento de la orden de 1,21 veces en pendientes de 10° ; 1,79 veces en 15° y 2,83 con pendientes de 20° .
- 4) Con relación a la velocidad obtenida en superficie plana, para carga con $0,4 \text{ kg m}^{-2}$ se ha verificado un aumento de la orden de 1,46 veces en pendientes de 10° ; 2,11 veces en 15° y 3,12 con pendientes de 20° .
- 5) Hasta la inclinación de 10° , la velocidad de propagación del fuego aparentemente fue influenciada por la carga existente sobre la superficie del terreno;
- 6) Entre 10° y 15° , tanto la carga cuanto la inclinación del terreno aparentemente poseen el mismo “peso” en la determinación de la velocidad de propagación del frente de fuego;
- 7) A partir de 15° , la velocidad de propagación aparentemente fue influenciada por la inclinación de la superficie del terreno.

Referencias bibliográficas

- BROWN, A.A.; DAVIS, K.P. Forest fire: control and use. 2.ed. New York: McGraw Hill Book, 1973. 686p.
- CHANDLER, C. et al. Fire in forestry. Washington, D.C: 1983. v.1: Forest Fire behavior and effects.
- COUTO, E. A.; CANDIDO, J. F. Incêndios Florestais. Viçosa: Imprensa Universitária da UFV, 1980. 101p.
- GOLDAMMER, J. G. **Incêndios florestais**: prevenção, controle e uso do fogo. Curitiba: [s.n.], 1982. 93p.
- SOARES, R. V. Incêndios florestais: controle e uso do fogo. Curitiba: FUPPEF. 1985. 213p.