Educación ambiental integral

Fundamentos del Comportamiento del Fuego en Incendios Forestales

CONICET

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

C I E M E P

INTA

INSTITUTO SUPERIOR DE FORMACIÓN DOCENTE 809 ESQUEL I S F D CHUBUT

SNMF Servicio Nacional de Manejo del Fuego

CIEFAP Conocimiento e Innovación en Bosques Patagónicos

Secretaría de Bosques

Ministerio de Educación

Gobierno del Chubut

PROGRAMA: EDUCACIÓN AMBIENTAL INTEGRAL

Fundamentos del Comportamiento del Fuego en Incendios Forestales

Ing. Ftal. Dante Guglielmín (FI-UNPSJB1, AFE2)

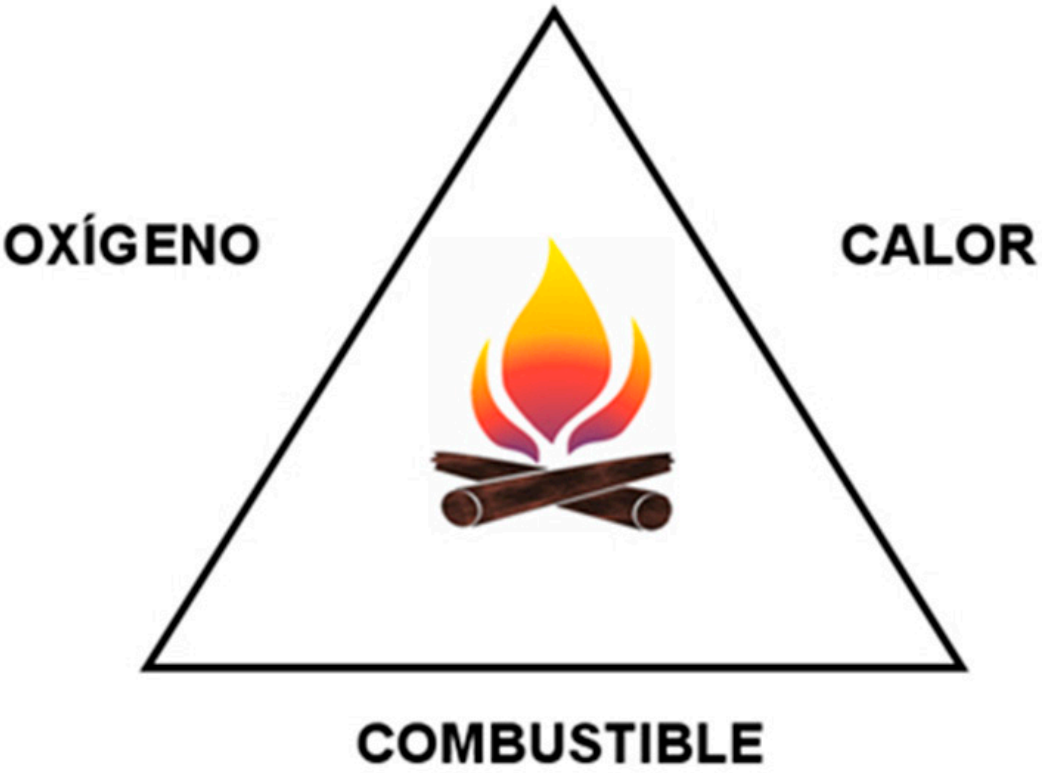
1. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco
2. Agencia Federal de Emergencia

Introducción

¿Qué es el fuego?

El fuego es un fenómeno físico-químico que se caracteriza por el desprendimiento de luz y calor producido por la combustión de un cuerpo. En el caso de los incendios forestales estos cuerpos se denominan combustibles forestales.

Para que se produzca un fuego debe estar presentes tres elementos, una fuente de ignición o de calor, combustible que en el caso de los incendios forestales es la vegetación y oxígeno, el cual es un gas que está presente en la atmósfera en un 21 % en promedio.



Las fuentes de ignición o causas pueden ser naturales o humanas (antrópicas). Dentro de las naturales están los rayos, las erupciones volcánicas y la autoignición. Dentro de las antrópicas existen dos principales grupos: las causas intencionales y las causas por negligencia.

Cuando se detecta un incendio y queremos iniciar las tareas de supresión o combate, necesitamos saber cómo se comportará para determinar la manera de combatirlo, si podemos hacerlo en la cabeza del incendio, en los flancos, en la cola, si se necesitará equipos de bombeo y/o el uso de maquinaria pesada y/o medios aéreos y/o más recursos humanos.

¿Cuáles son las formas de transmisión y transporte del calor en incendios forestales?

Existen tres mecanismos de transmisión y uno de transporte de calor:

Por radiación

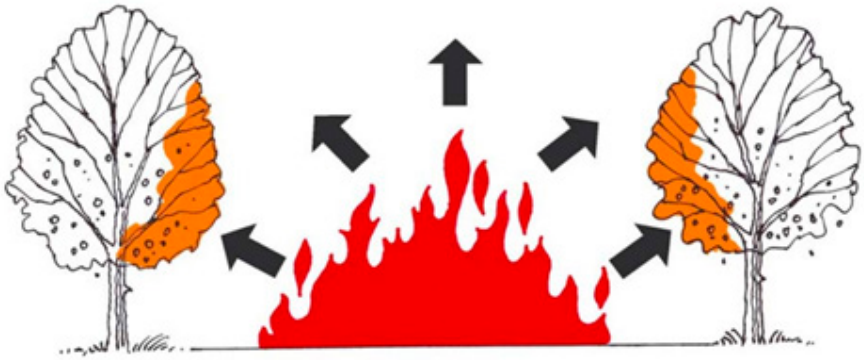
El calor se transmite por ondas similares al sol que viajan a la velocidad de la luz, y tienen la particularidad de calentar los cuerpos sólidos o líquidos, pasando a través del aire.

En los incendios forestales, la radiación emitida por los mismos está directamente ligada a la longitud de las llamas y por ende a la intensidad. Cuanta más intensidad tenga un incendio, mayores longitudes de llamas tendrá y mayor radiación emitirá.

Mientras más alejada esté la fuente de calor menor es la cantidad de calor recibida en un determinado punto.

Generalmente la radiación tiene menor influencia que la convección en la propagación de un incendio. Toma mayor importancia en casos particulares como cuando un

incendio se propaga pendiente abajo, ya que mayor proporción de calor producido por convección se disipará hacia el quemado (pendiente arriba).



La radiación se transmite en todas las direcciones a partir de la fuente de calor.

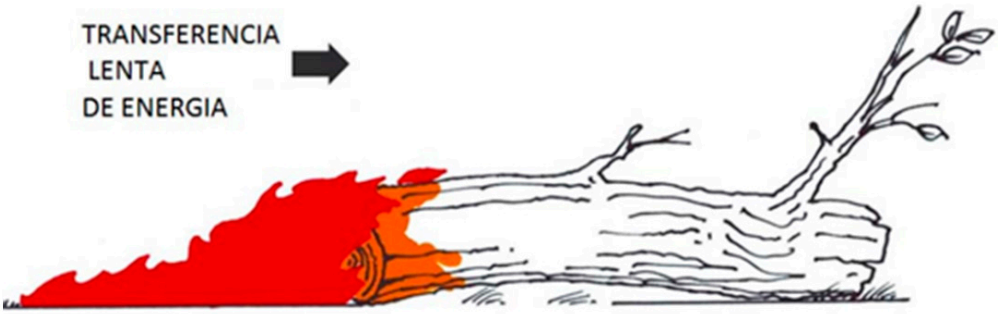
Por convección

Es la transmisión de calor a través de fluidos, ya sean gases o líquidos. En el caso de los incendios forestales un caso muy representativo de este tipo de transporte de calor son las Columnas de Convección. El aire (gas) en superficie, donde se está desarrollando el incendio se calienta, se expande, se hace más liviano y tiende a subir. Básicamente una columna de convección lo que está haciendo es transmitiendo calor por convección desde la superficie hacia arriba.

Por conducción

El calor se transmite por contacto a través de las moléculas de los cuerpos sin que éstas se desplacen.

A diferencia de lo que ocurre con los metales, las maderas son malas conductoras del calor, por lo que en incendios forestales para que produzca este tipo de transmisión debe haber contacto físico entre los combustibles como en el caso de los incendios subterráneos o troncos en superficie.



Por Pavesas

Esta no es una forma de transmisión del calor, es una forma de transporte de calor o fuego en un incendio, por lo que es altamente importante tenerla en cuenta por sus efectos en originar focos secundarios.

Las pavesas son fragmentos de vegetación encendidos que salen del perímetro del incendio, pudiendo generar o no focos secundarios. Dichas pavesas pueden salir de dicho perímetro ya sea a través de la columna convectiva, el viento o por rodamiento o gravedad.

¿Cuáles son las partes de un incendio forestal?

Cabeza

Parte del incendio que se propaga generalmente con mayor rapidez determinando la principal dirección de avance o propagación del incendio. Fuego frontal, es decir a favor del viento y/o pendiente.

Cola

Se la ubica generalmente en el sector opuesto a la cabeza. Casi siempre es la parte que avanza con mayor lentitud, inclusive puede no tener actividad. Es el lado opuesto al avance principal. Fuego de retroceso, es decir en contra del viento y/o pendiente.

Flancos

Son los costados del incendio, los flancos derecho e izquierdo se establecen siempre desde la cola del incendio, NO desde la cabeza. Fuego lateral o de flanco.

Borde

Límite de separación entre la superficie quemada y no quemada, en todo el perímetro del incendio.

Perímetro

Longitud total del borde.

Dedos

Porciones del incendio que sobresalen del perímetro del incendio en forma generalmente alargada y angosta, que se forman por haber tenido mayor velocidad de propagación ya sea porque por donde se formaron había mayor pendiente y/o mayor intensidad del viento y/o mayor carga disponible de combustibles. Asimismo, los dedos pueden formarse porque en los sectores contiguos haya habido menor propagación ya sea por haberse presentado menor pendiente y/o menor intensidad del viento y/o menor carga disponible de combustible.

Bahías

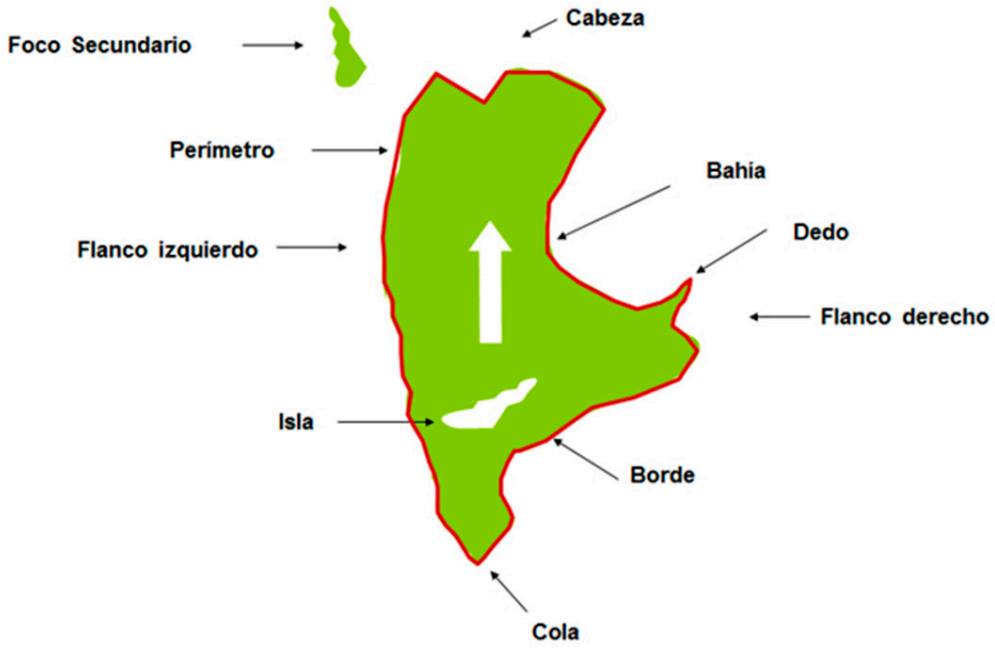
Porciones no quemadas entre dedos o en cualquier otro sector del incendio que ocasionan entrantes de cierta profundidad en el borde del incendio.

Islas

Sectores no quemados en el interior del incendio.

Focos secundarios

Fuegos existentes fuera de los bordes del incendio principal, originados por pavesas transportadas ya sea por la columna de convección, el viento o por rodamiento.



¿Cuáles son los posibles estados de un Incendio Forestal?

Desde sus comienzos, hasta la extinción final, los incendios pasan por distintos estados.

1. Fuera de Control, Descontrolado o Activo

El fuego se propaga libremente.

Bajo este estado se define a los fuegos que aún no han sido atacados, o a aquellos en

los que en uno o varios sectores no han podido ser contenidos o atacados. Ejemplo: la cola y los flancos están contenidos pero la cabeza está descontrolada, estado del incendio: descontrolado.
Se sugiere utilizar el término Activo principalmente para fines periodísticos y/o políticos.

2. Detenido o contenido

Por cualquier circunstancia natural, ambiental o a raíz de los trabajos de combate, la propagación de los diferentes sectores del incendio ha sido detenida.
Esta situación puede revertirse por distintos factores (cambio de la dirección del viento y/o aumento de la intensidad del viento y/o aumento de la pendiente y/o aumento de la carga disponible de combustible, etc) y volver a la condición anterior de "fuera de control", "descontrolado" o "activo".

3. Circunscripto

Este estado implica la existencia de recursos empeñados en el control distribuidos en todas las partes del incendio independientemente si presenta actividad significativa o no. Línea de control establecida.
En esta etapa quizás falten asegurar puntos de anclajes (lugares donde empiezan y terminan las líneas de defensa), completar algunas podas o limpiezas, corregir y mejorar el trazado de las líneas, hacer quemas de ensanche, quemas de islas o bahías, etc.
Esta situación puede revertirse por distintos factores (cambio de la dirección del viento y/o aumento de la intensidad del viento y/o aumento de la pendiente y/o aumento de la carga disponible de combustible, etc) y volver a la condición de "fuera de control", "descontrolado" o "activo".

4. Controlado

Este estado implica que las tareas de control han sido exitosas, estableciéndose límites al avance del fuego. Existe una línea de control asegurada, sin que haya posibilidades de que el fuego pueda sobrepasarla, pudiendo existir actividad ígnea (puntos calientes) en el interior del quemado.
Esta situación es irreversible, ya que un incendio declarado técnicamente controlado no debería volver a la etapa "fuera de control, descontrolado o activo". Esto implica

que para declarar un incendio como controlado debe existir absoluta seguridad en el éxito de las tareas.

5. Extinguido

El incendio no muestra signos de actividad en ninguna de sus partes, implica la ausencia de focos ígneos o puntos calientes. Las tareas de liquidación y guardia de cenizas han terminado.

Algunos incendios grandes, aunque sean dados por controlados, pueden no declararse extinguidos durante mucho tiempo ya que su liquidación total a veces no puede llevarse a cabo rápidamente a raíz de diversos factores: extensión, accesos, tipo de suelo, mucha carga de combustibles gruesos superficiales, fuego subterráneo, movilidad, etc.

¿Qué es el comportamiento del fuego?

Es la manera en la que el fuego reacciona ante los factores del entorno en el que tiene lugar el incendio. Para su mejor comprensión los factores que afectan al comportamiento del fuego se agrupan en: factores asociados al combustible, a la topografía y a la meteorología; los tres tipos de factores en su conjunto conforman el TRIÁNGULO DEL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO.

Por otra parte, el comportamiento del fuego puede cuantificarse o describirse a través de diferentes variables como, por ejemplo: la velocidad de propagación, la longitud de llama, la intensidad lineal y la tasa de crecimiento del perímetro entre otras.

Triángulo de Comportamiento del Fuego

¿Todos los incendios se comportan de la misma manera?

No. Cada incendio tiene sus propias variables de comportamiento.

Variables de comportamiento

↓

-Longitud de Llama
-Velocidad de Propagación
-Intensidad de línea o intensidad lineal
-Tasa de Crecimiento del Perímetro y/o de Superficie
-Carga Consumida
-Altura de llama

MENSURABLES

- Presencia de focos secundarios
-Tipos de fuego
- Columna convectiva

Las variables de comportamiento del fuego van a estar afectadas por los factores

asociados a los combustibles (estado, ubicación, tamaño, continuidad, carga, contenido químico, densidad, compactación y contenido de humedad), a la meteorología (temperatura, humedad relativa, intensidad y dirección del viento, precipitaciones y nubes) y a la topografía (altitud, exposición, pendiente y accidentes geográficos), y a su vez el incendio puede afectar a algunos factores como el contenido de humedad de los combustibles, a la temperatura, a la humedad relativa, generar sus propios vientos y sus propias nubes (pyrocumulos).

¿Cómo varían los factores en el tiempo y en el espacio?

Si algún factor se modifica en el tiempo (de un momento a otro) o en el espacio (de un lugar a otro) posiblemente el comportamiento del fuego también se modificará.

Algunos factores cambian más rápidamente que otros en el espacio y/o en el tiempo.

Topografía:

No cambia en el tiempo durante el desarrollo de los incendios.

Puede variar bruscamente, muchas veces en distancias muy cortas, por ejemplo, pasar de un lugar plano a un lugar con pendiente o viceversa.

Combustibles:

El tipo de vegetación puede cambiar mucho entre lugares cercanos.

La humedad de los combustibles vivos y muertos, varía en el espacio y en el tiempo, debido a cambios en la topografía y en las condiciones meteorológicas.

La existencia de un fuego puede modificar la humedad de los combustibles cercanos.

Meteorología:

Las variables meteorológicas mencionadas se modifican constantemente a lo largo del día.

Los cambios responden a distintos fenómenos propios de la atmósfera o son causados por variaciones en la vegetación y en la topografía, por lo que podemos encontrar

grandes diferencias en la temperatura, humedad, precipitación o viento, entre lugares muy próximos.

El incendio puede modificar las condiciones meteorológicas del lugar en el que se desarrolla.

Estos factores no solo pueden modificar al comportamiento del fuego, sino que algunos también se modifican entre sí.

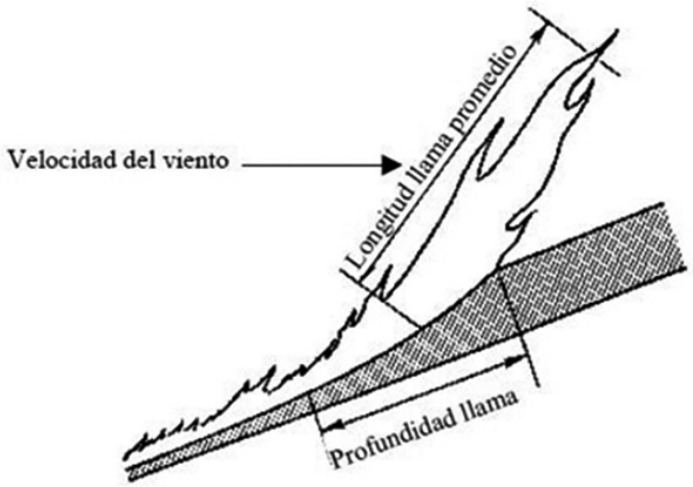
Variables de Comportamiento del Fuego

El comportamiento del fuego puede medirse o caracterizarse a través de variables como la velocidad de propagación, la longitud de llama, la intensidad lineal, la tasa de crecimiento del perímetro, la presencia o no de focos secundarios, la carga consumida, la altura de llama, las características de la columna convectiva, los tipos de fuego. Desde que un fuego se inicia y hasta que alcanza un estado de gran actividad, evoluciona a lo largo del tiempo atravesando distintas etapas. Todo incendio, cualesquiera sean sus dimensiones en el momento de realizar su evaluación, se ha iniciado de alguna forma, se propaga de acuerdo a las condiciones del entorno, lo hace a una determinada velocidad, liberando determinada cantidad de energía en forma de calor, y crece hasta que se realice sobre el mismo alguna acción de supresión o bien se produzca algún cambio en el ambiente que inhiba su desarrollo. Cada uno de estos procesos, y otros que tengan lugar, pueden describirse a través de la evaluación, medición y caracterización de variables de comportamiento. Las dos variables básicas de comportamiento del fuego son la velocidad de propagación y la intensidad lineal (Rothermel,1983), y la interpretación de ambas permiten determinar otras tales como la distancia de propagación, el área y el perímetro del incendio, la longitud de llama, la ocurrencia de focos secundarios y el coronamiento en incendios de bosques o plantaciones, entre otras que se describen a continuación.

¿Cuáles son las principales variables de Comportamiento del Fuego?

Longitud de llama

Longitud de la llama medida a lo largo de su eje. Cuando la medición es efectuada para caracterizar el comportamiento del fuego, la longitud de llama se mide en el frente o cabeza del incendio. La longitud de llama es un indicador de la intensidad de la línea de fuego. Se expresa generalmente en metros. La longitud de llama que es un fenómeno fácilmente observable, se define como el largo promedio de las llamas medido a lo largo de su eje desde la base de la zona de llama hasta la punta.



Velocidad de propagación

variable del comportamiento del fuego que generalmente expresa la velocidad de desplazamiento de la cabeza del incendio, aunque también puede referirse a otros sectores del perímetro. Se expresa generalmente en m/min o m/s.

Presenta un amplio rango de variación, dependiendo de los diferentes factores que afectan al comportamiento del fuego. Como valores extremos de los mencionados anteriormente, Byram (1959) indica que los fuegos de turbera progresan a razón de algunos metros en varias semanas, mientras que en praderas de gramíneas Albini señala que la velocidad del fuego puede superar los 330 m/min (Guijarro Guzmán, 2003).

Intensidad de la línea o intensidad lineal

Es el calor liberado por unidad de longitud de avance del frente de fuego, por unidad de tiempo. Es la medida de intensidad del fuego más comúnmente utilizada, y también se la conoce como intensidad de Byram. Se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$I = H \cdot w \cdot r$$

Donde:

I = Intensidad lineal (KW/m)

H = calor de combustión del combustible (KJ/kg) w = carga de combustible consumida (kg/m2)

r = velocidad de propagación (m/seg)

La intensidad lineal puede utilizarse como una medida estándar con la cual los responsables de manejo del fuego pueden estimar la dificultad de control que presente un incendio y seleccionar las acciones de supresión apropiadas. La intensidad de un fuego determina que tan próximo pueden trabajar los combatientes al fuego, e indica que tipo de estrategias deberán tomarse tanto en ataque directo, paralelo o indirecto, para garantizar la seguridad del personal. A modo de ejemplo, el ataque directo con herramientas manuales y un control seguro de fuegos prescriptos es posible con intensidades de línea menores a 450 kW/m (equivale a 1,2 -1,3 m de longitud de llama); con equipo pesado puede controlarse un fuego con intensidad de línea por debajo de 1750 kW/m lo que equivale a una longitud de llama de aproximadamente 2,4 metros (U.S. Forest Service, 1978). La ocurrencia de focos secundarios comienza a ser critica a alrededor de 2000 kW/m (Hodgson, 1968); y los incendios se vuelven completamente incontrolables con intensidades superiores a 3700 kW/m, lo que equivale a una longitud de llama de 3,4-3,5 m (U.S. Forest Service, 1978).

Los efectos del fuego pueden relacionarse con la intensidad lineal, por ejemplo, con la altura de chamuscado que puede afectar el follaje de la copa de los árboles por calentamiento desde fuegos de superficie.

Tasa de crecimiento del perímetro

Es la relación entre el crecimiento del perímetro expresado en metros y el tiempo expresado generalmente en minutos, con lo cual la tasa de crecimiento del perímetro se informa en m/min o km/h o km/día. Durante un incendio puede resultar importante conocer esta variable debido a que se pueden tomar decisiones operativas que influyan significativamente en el éxito o no de las operaciones de control.

Carga consumida

Cantidad de materia orgánica que es consumida por el fuego, generalmente se expresa en Tn/ha o Kg/m2. Puede calcularse la carga consumida total o por clases diamétricas (carga consumida de combustibles finos, carga consumida de combustibles medios y carga consumida de combustibles gruesos). Esta diferenciación de cargas consumidas de acuerdo a las clases diamétricas puede resultar importante por ejemplo para determinar los efectos del fuego en un incendio o determinar el grado de alcance de los objetivos propuestos en una quema.

Altura de llama

Distancia vertical entre el suelo y la punta de la llama sin importar su inclinación. NO es buena variable de comportamiento del fuego ya que iguales alturas de llama pueden lograrse con intensidades lineales o longitudes de llama totalmente diferentes

Tipos de Fuego

Fuego frontal

Porción o parte de la línea de fuego de un incendio que propaga más rápidamente y cuya inclinación de las llamas es en dirección al material no quemado. Dirección del viento y/o pendiente a favor. Típico de la cabeza del incendio.

Fuego en retroceso

Porción o parte de la línea de fuego de un incendio que propaga más lentamente y cuya inclinación de las llamas es en dirección al material quemado. Dirección del viento y/o pendiente en contra. Típico de la cola del incendio.

Fuego con llama

Fuego producido por la combustión de los gases.

Fuego de rescoldo (glowing)

Fuego sin llama visible y sin propagación, que se produce generalmente detrás del paso del fuego de llama. Incandescente, su liberación de calor puede llegar a ser mayor que el fuego de llama.

Fuego subterráneo (smoldering)

Fuego que afecta a los combustibles subterráneos, sin llama y velocidad de propagación lenta. Puede quemar aun con altos contenidos de humedad en los combustibles.

Fuego superficial

Fuego que afecta a los combustibles superficiales.

Fuegos de copas

Fuego que afecta la copa de los árboles o combustibles aéreos. Se pueden definir tres clases diferentes de fuego de copas:

Fuego de copas pasivo

Coronamiento de uno o más árboles, pero sin que el fuego se propague de copa en copa.

Fuego de copas Activo

Fuego de copas continuo. El fuego afecta y avanza tanto en los combustibles aéreos como los superficiales al mismo tiempo, sin embargo, el fuego de los combustibles aéreos depende del calor liberado por el fuego en superficie.

Fuego de copas independiente

El fuego avanza por las copas de los árboles sin depender de un fuego superficial. Son infrecuentes.

Torbellinos o remolinos de fuego

Movimiento rotatorio de una columna de aire que transporta humo, restos de combustibles vegetales y llamas. Pueden ser de escasos centímetros o hasta cientos de metros de diámetro, generalmente están asociados a comportamiento extremo.

Bibliografía

- **Albini, F. A. 1969.** Heat Transfer and Fire Spread. U.S. Forest Service.
- **Albini, F. A. 1979.** Spot fire distance from burning trees- a predictive model. Gen. Tech. Rep. INT- 56. Odgen, UT: U.S. Department of Agriculture, F. S. Intermountain Forest and Range Experiment Station. 73p.
- **Albini, F. A. 1981.** Spot fire distance from isolated sources- extensions of a predictive model. Res. Note INT- 309. Odgen, UT: U.S. Department of Agriculture, F. S. Intermountain Forest and Range Experiment Station. 9p.
- **Albini, F. A. Y R. G. Baughman. 1979.** Estimating windspeeds for predicting wildland fire behavior. Res. Pap. INT- 221. Odgen, UT: U.S. Department of Agriculture, F. S. Intermountain Forest and Range Experiment Station. 12p.
- **Byram, G. M. 1959.** Combustion of forest fuels. 61-69. Forest Fire: control and use. Mc Graw Hill Book Co. N.Y.
- **Dentoni, M., Muñoz, M., Guglielmin, D., et. al. 2025**. Manual del Curso El Entorno del Fuego. Servicio Nacional de Manejo del Fuego. Agencia Federal de Emergencias. Ministerio de Seguridad de la Nación. 75 pp.
- **Guglielmin, D. 2023, Manual del Curso Combatiente de Incendios Forestales.** Servicio Provincial de Manejo del Fuego de la Provincia de Chubut. Secretaría de Bosques y Parques de la provincia de Chubut. PROSAP II. 104 pp.
- **Guijarro Guzmán. 2003.** Tesis doctoral: Comportamiento del fuego y régimen térmico en diferentes complejos de combustibles forestales. Universidad Politécnica de Madrid. Serie Forestal INIA. 221 p.
- **Hodgson, A. 1968.** Control burning in eucalypt forests in Victoria, Australia. J. For. 66 (8): 601-605.
- **U. S. Forest Service. 1978.** FBO field reference.