

## **CAPÍTULO 6**

### **ESTABLECIMIENTO DE ZONAS DE SEGURIDAD PARA PREVENCIÓN Y EMERGENCIAS**



## 6.1. INTRODUCCIÓN

El interés por las denominadas zonas de seguridad radica en su misma definición: un área con las dimensiones suficientes y localización apropiada como para proporcionar seguridad (ausencia de peligro y daños, o condiciones de bajo riesgo). Por tanto, es una zona en la que el personal dedicado a la extinción puede trabajar o que puede ser necesario utilizarla como zona o ruta de escape. Asimismo, las zonas de seguridad son también de aplicación en la salvaguarda de bienes y, más concretamente, de viviendas (masías, urbanizaciones, etc.). Finalmente, este concepto es también de utilidad en el diseño de determinadas infraestructuras de prevención (cortafuegos).

En el campo de los incendios de hidrocarburos existen trabajos interesantes como los realizados por Croker y Napier (1986), Bagster y Pitblado (1989) y Satyanarayana *et al.* (1991) que, si bien no proporcionan distancias de seguridad que sean aplicables directamente en casos de incendios forestales, si son una referencia que da orientación, tanto por la metodología empleada, como por la información relativa a la vulnerabilidad a la radiación térmica. Esta última permite obtener datos referentes a los posibles daños que son ocasionados por diversos niveles de flujo térmico en personas y en diversos materiales y, en definitiva, permite establecer los criterios necesarios para la toma de decisiones.

Como ya se ha mencionado, en el campo de los incendios forestales existen pocas publicaciones con propuestas cuantitativas. En este sentido destaca el trabajo de Butler y Cohen (1998), quienes establecen como criterio máximo tolerable para bomberos un flujo de calor de  $7 \text{ kW/m}^2$  (con ropa y equipo de protección para el cuerpo, incluidos la cabeza y el cuello, usualmente empleado por los bomberos del servicio forestal de los Estados Unidos). Como conclusión, proponen zonas de seguridad para bomberos y sugieren como regla general una distancia mínima entre incendio y bomberos de cuatro veces el promedio de altura de la llama; en posteriores experimentos sugieren que para pequeñas alturas (alrededor de 1 metro de altura de la llama) esta regla subestima la energía de radiación (Butler y Cohen, 2000).

Otra referencia importante que debe tenerse presente y que ya ha sido mencionada en el capítulo anterior, es la normativa vigente (decreto 64/1995) del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya, la cual exige para las urbanizaciones que no tengan una continuidad inmediata con la trama urbana y que estén situadas a menos de 500 m de la masa forestal, una zona de protección de 25 metros de amplitud considerada desde el perímetro exterior.

Sin embargo, analizando la información disponible sobre este campo, es evidente que existe una importante laguna en lo que respecta a lo que podría denominarse diseño “ad-hoc” de distancias o zonas de seguridad.

En el presente capítulo se presenta una metodología para el establecimiento de zonas de seguridad en función de las condiciones existentes (o potenciales) en caso de un incendio forestal: tipo de vegetación y peores condiciones meteorológicas (humedad atmosférica, velocidad y dirección del viento) razonablemente previsibles. Dicha metodología se ha basado en la predicción del flujo de calor mediante las expresiones seleccionadas en el capítulo anterior y en los valores de vulnerabilidad (de personas y bienes) escogidos de la bibliografía.

## 6.2. VULNERABILIDAD AL FLUJO TÉRMICO

En las metodologías de análisis de riesgos, una vez calculados los efectos de un accidente (dosis de un producto en el caso de escape tóxico, sobrepresión en el caso de una explosión, radiación térmica en el caso de un incendio) la estimación de las consecuencias se lleva a cabo mediante la aplicación de los denominados “módulos de vulnerabilidad”.

Los módulos de vulnerabilidad son expresiones matemáticas empíricas o semiempíricas, a veces adaptadas a un tratamiento estadístico de una muestra de datos experimentales o correspondientes a accidentes reales, que relacionan el efecto (intensidad de radiación, dosis, sobrepresión) con la consecuencia (número o porcentaje de muertos, número de heridos, número de personas con quemaduras de primer, segundo o tercer grado, destrucción de viviendas o equipos, etc.).

Entre los modelos de vulnerabilidad para personas, destacan los basados en las ecuaciones propuestas por Eisenberg *et al.* (1975), de amplia utilización. Los modelos relativos a la estimación de consecuencias sobre bienes, suelen basarse en el establecimiento de valores límite o “umbral”, que determinan una gama determinada de daños.

En el caso de la radiación térmica, se han seleccionado los valores umbral propuestos por diversos autores (Casal *et al.*, 1999), algunos de ellos con una amplia aceptación, mostrándose en la Tabla 6.1 los niveles de daño ocasionados por distintos flujos térmicos.

Tabla 6.1. Efectos y consecuencias para diversos flujos térmicos<sup>1</sup>

Radiación Térmica kW/m <sup>2</sup>	Efecto
1,4	Se considera inofensivo para personas sin protección especial
1,7	Mínimo necesario para causar dolor
2,1	Mínimo necesario para causar dolor después de 60 s
4,0	Suficiente para causar dolor con una exposición de 20 s (quemaduras de primer grado)
4,7	Causa dolor en 15 – 20 s y heridas después de 30 s
11,7	El acero delgado (parcialmente aislado) puede perder su integridad mecánica
12,6	La madera puede alcanzar el punto de ignición después de una larga exposición; 100 % de letalidad
25,0	El acero delgado (aislado) puede perder su integridad mecánica
37,5	Suficiente para causar daños a equipos de proceso y colapso de estructuras

<sup>1</sup> Los valores propuestos para personas se basan en las ecuaciones *probit* mediante el modelo generalizado de Eisenberg (1975).

El “límite tolerable” –expresión poco precisa- para las personas se considera del orden de 5 kW/m<sup>2</sup>. A esta intensidad, el tiempo necesario para sentir dolor (piel desnuda) es de aproximadamente 13 s, y con 40 s pueden producirse quemaduras de segundo grado. En general, se considera que no hay dolor –sea cual sea el tiempo de exposición- con flujos térmicos inferiores a 1,7 kW/m<sup>2</sup> (Casal *et al.*, 1999).

Si la persona está vestida y la ropa es resistente a la radiación, su presencia reduce la superficie del cuerpo expuesta: se considera, en general, que sólo se irradia el 20 % de la superficie del cuerpo, que comprende la cabeza (7 % de la superficie del cuerpo), las manos

(5 %) y los brazos (8 %); evidentemente, la situación es distinta si la persona está especialmente protegida (por ejemplo, un bombero adecuadamente equipado). En el caso de ropa que arde (por ejemplo, tejido de fibra artificial), su combustión provocará quemaduras graves.

Existen ecuaciones “*probit*” para estimar las consecuencias de la radiación térmica con y sin protección (quemaduras de primer grado, de segundo grado, de tercer grado y mortalidad). Asimismo, y en lo que respecta a la vulnerabilidad de las personas, es interesante tener en cuenta el efecto del aire caliente; la tabla adjunta (Casal *et al.*, 1999) da información sobre la respuesta fisiológica en estas condiciones.

Tabla 6. 2. Consecuencias del aumento de temperatura del aire sobre las personas

Temperatura en °C	Respuesta fisiológica
125	Bastantes dificultades para respirar
140	Tolerable durante 5 minutos
150	Temperatura límite para escapar
160	Dolor rápido e insoportable (con la piel seca)
180	Heridas irreversibles en 30 s
205	Tiempo de tolerancia del sistema respiratorio: menos de 4 minutos (con la piel mojada)

### 6.3. DETERMINACIÓN DEL FLUJO DE RADIACIÓN TÉRMICA MEDIANTE EL MODELO DEL CUERPO SÓLIDO

Para la determinación del flujo de radiación térmica mediante el modelo del cuerpo sólido, se han establecido las siguientes suposiciones:

- A la transmisividad y a la emisividad se les asigna el valor de 1. Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, estos parámetros pueden tener valores menores a la unidad; sin embargo, en los cálculos ingenieriles suelen tomarse las condiciones más críticas, que proporcionan un mayor margen de seguridad. Por otra parte, dicho valor para estos parámetros es una suposición frecuentemente empleada por los investigadores en este campo, por tanto, los resultados pueden ser contrastados con otros resultados publicados.
- Se considera un promedio de temperatura constante y válido para toda la superficie de la llama. Se ha tomado como valor promedio 1200 K (valor acorde con las observaciones realizadas en la Figura 5.3.1 de la sección 5.3). También se ha considerado un valor constante para la temperatura del medio ambiente y se le ha asignado el valor de 295 K.
- Las suposiciones realizadas en el capítulo 5 para la determinación del factor de vista continúan siendo válidas. Se ha empleado las ecuaciones para la determinación del factor de vista seleccionadas en dicho capítulo.

### 6.3.1. Determinación del flujo de radiación térmica para un frente de llama considerado de forma rectangular

Para la determinación del calor de radiación emitido por un frente de llama de forma rectangular hacia un elemento diferencial perpendicular a una esquina (considerado como caso 1 y representado en la Figura 5.4.13), se ha empleado el factor de vista que se obtiene mediante las ecuaciones de McGuire (1953). También se obtiene el flujo de radiación en una situación de mayor riesgo (caso 2), y se coloca al elemento diferencial paralelo al centro del frente de llama (tal como se encuentra en la Figura 5.4.7). La ecuación empleada para la determinación del factor de vista para esta situación es la 5.32 (McGuire, 1953).

La representación gráfica de los resultados obtenidos se muestra en las Figuras 6.3.1 a 6.3.4. Para la primera situación, en la Figura 6.3.1 se presentan los resultados obtenidos mediante la ecuación propuesta por McGuire (Ecuación 5.31).

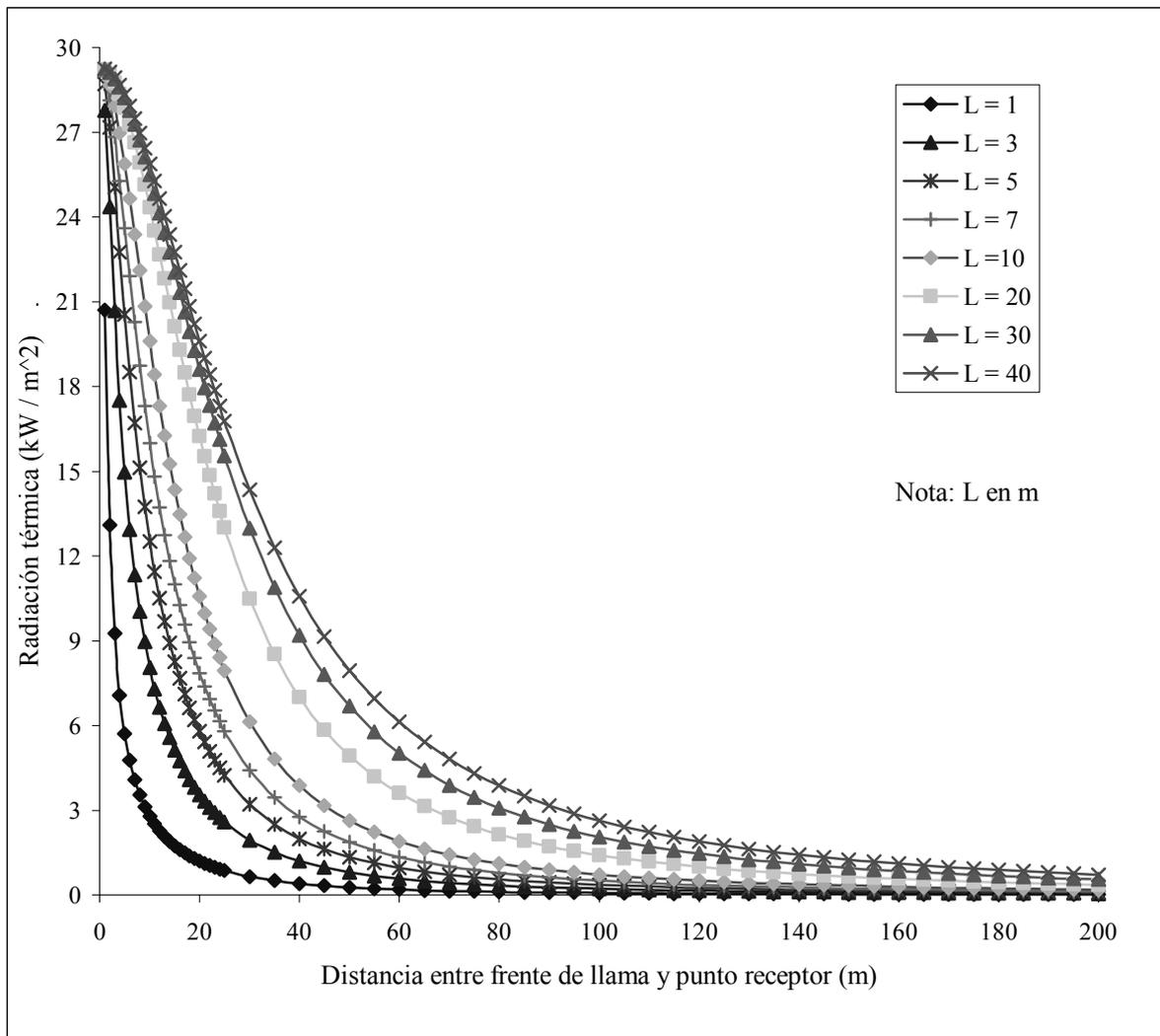


Figura 6.3.1. Radiación térmica en función de la distancia entre punto receptor y frente de llama para diferentes alturas del frente (determinación del factor de vista mediante la ecuación (5.31) de McGuire).

La Figura 6.3.2 es una ampliación de la zona que incluye los flujos de radiación térmica considerados como límites tolerables ( $4,7$  a  $12,6 \text{ kW/m}^2$ ), que constituyen el criterio para el establecimiento de la zona de seguridad. Los flujos máximos son del orden de los  $29 \text{ kW/m}^2$ , que lógicamente corresponde a los frentes de llama más altos con las distancias (emisor - receptor) más cortas. Sin embargo, cabe hacer notar que el valor de  $29 \text{ kW/m}^2$  es alcanzado desde alturas de llama de  $7 \text{ m}$  para una distancia entre emisor - receptor de  $1 \text{ m}$  (y para el caso de distancias de  $2 \text{ m}$  prácticamente desde alturas de llama de  $10 \text{ m}$ ). Lo anterior muestra como la distancia entre emisor-receptor es más significativa que la altura de llama (obsérvese que las variaciones en los valores de flujo de radiación térmica son menores con respecto a cambios en la altura que si se varia la distancia entre emisor y receptor).

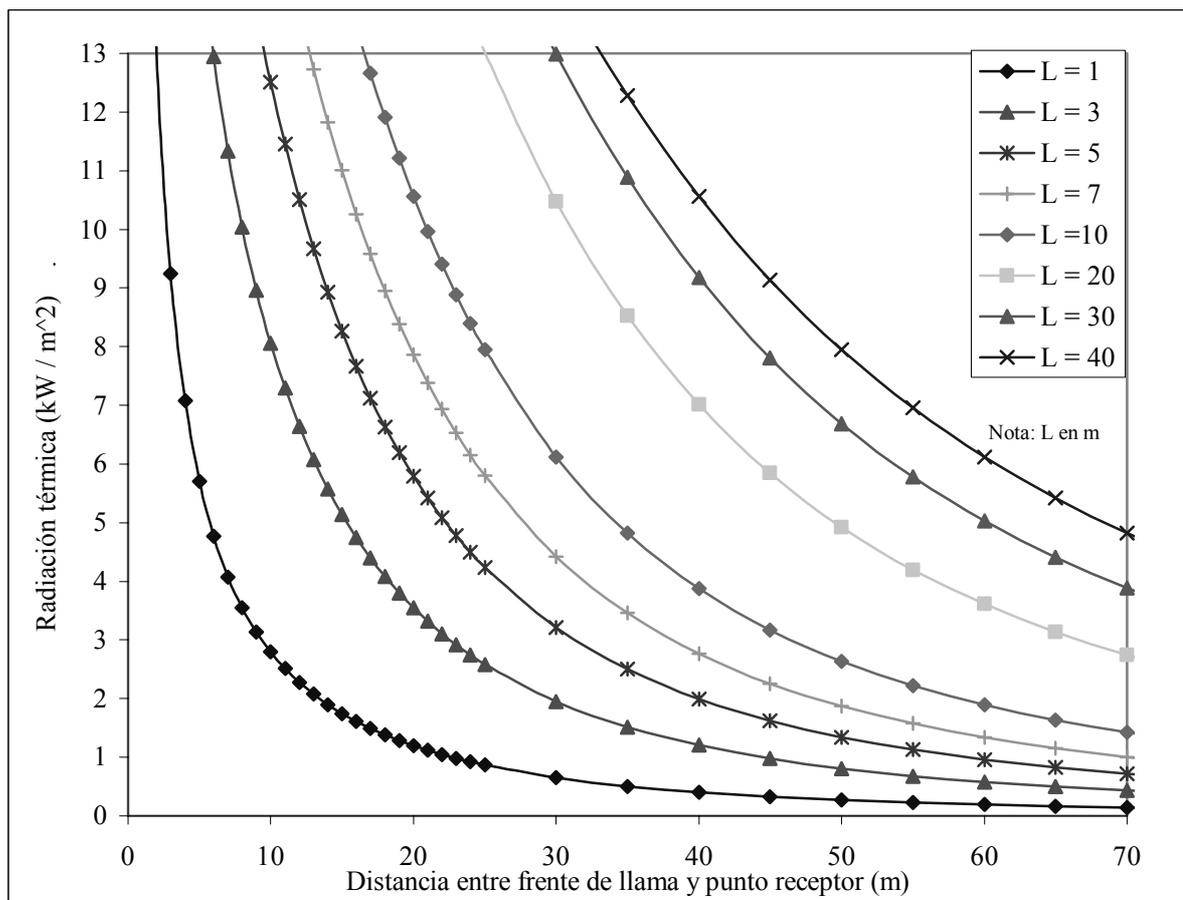


Figura 6.3.2. Ampliación de la zona de mayor interés de la gráfica 6.3.1 (ecuación (5.31)).

La Figura 6.3.3 presenta los resultados para el segundo caso considerado: Flujo de radiación térmica para la configuración que sitúa al elemento diferencial paralelo al centro de la fuente emisora (correspondiente a la Figura 5.4.7). Al igual que para el primer caso, se muestra una ampliación de la zona de mayor interés (Figura 6.3.4). Debido a que las ecuaciones 5.29 y 5.32 (McGuire, 1953) proporcionan los mismos resultados, el factor de vista puede determinarse mediante cualquiera de ellas.

Como era de esperar, el flujo de calor de radiación es superior a la anterior disposición geométrica, alcanzando el valor máximo ( $116,5 \text{ kW/m}^2$ ) con la altura máxima del frente de llama ( $40 \text{ m}$ ).

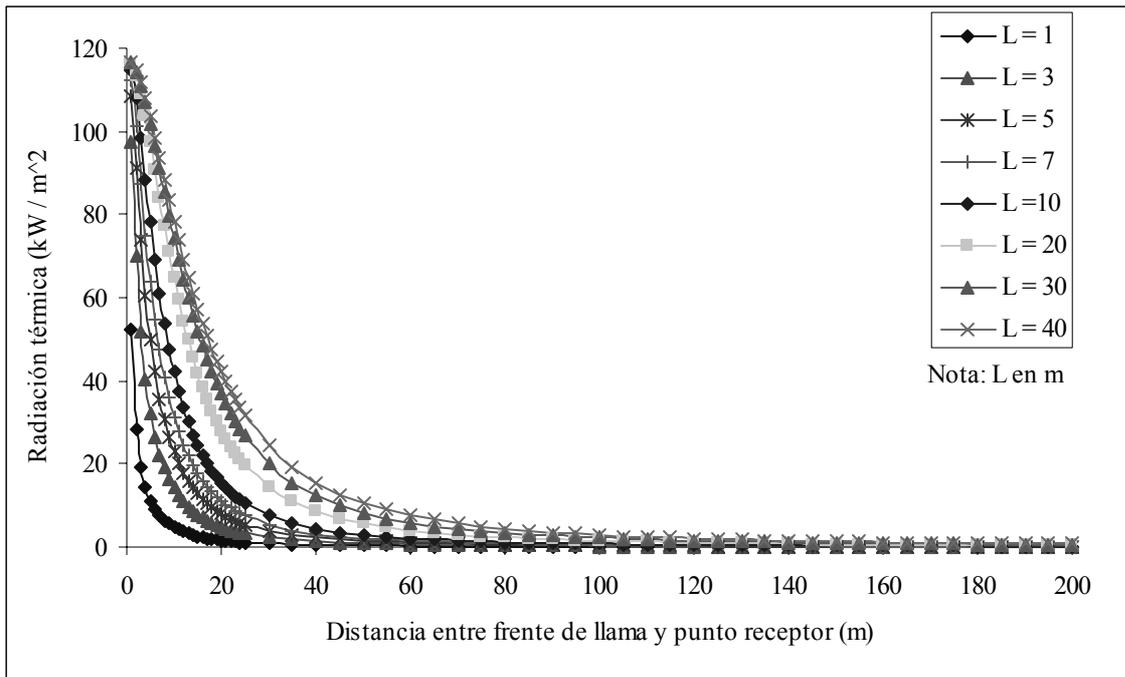


Figura 6.3.3. Radiación térmica en función de la distancia entre punto receptor y frente de llama para diferentes alturas del frente de llama (calculando el factor de vista mediante las ecuaciones (5.29) o (5.32) de McGuire).

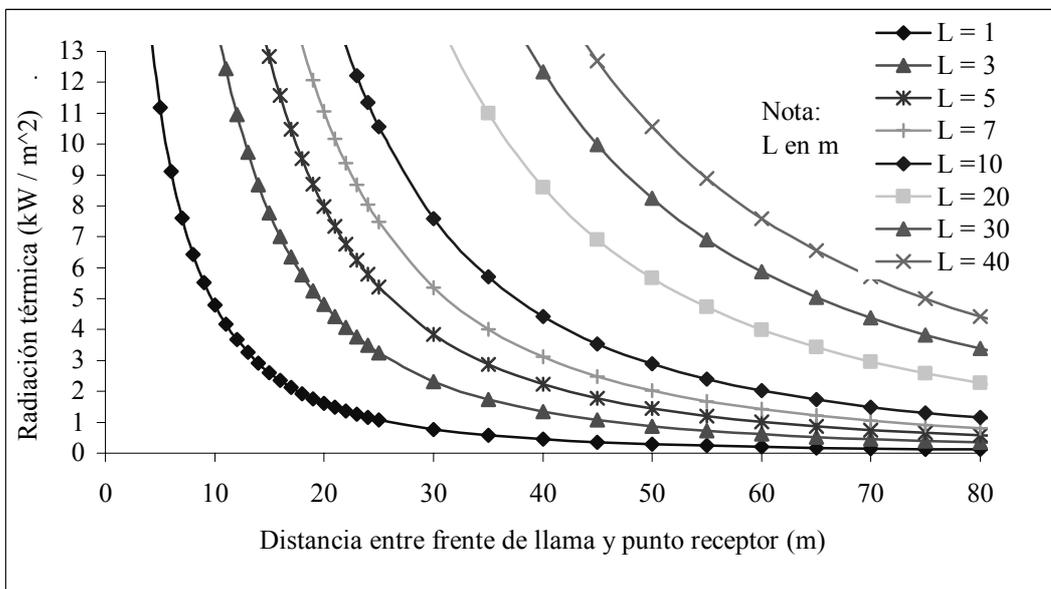


Figura 6.3.4. Ampliación de la zona de mayor interés de la gráfica 6.3.3. (ecuación (5.29) o (5.32)).

### 6.3.2. Determinación de flujo de radiación térmica para un frente de llama considerado de forma cilíndrica.

En las figuras 6.3.5 y 6.3.6 se representa el flujo del calor de radiación emitido por un frente de llama de forma cilíndrica con respecto a un elemento diferencial paralelo a la base del cilindro (caso 1) y con respecto a un elemento diferencial paralelo a la sección transversal

situada a la mitad de la altura del cilindro (caso 2, cuyas configuraciones han sido representadas en la Figura 5.4.8). Por considerarlo más representativo de un incendio, se le asigna al radio del cilindro un valor de 2 m (en el capítulo 5 se consideró también un radio de 1 m). Por otra parte, el factor de vista ha sido obtenido mediante la ecuación 5.33 (Kay, 1994).

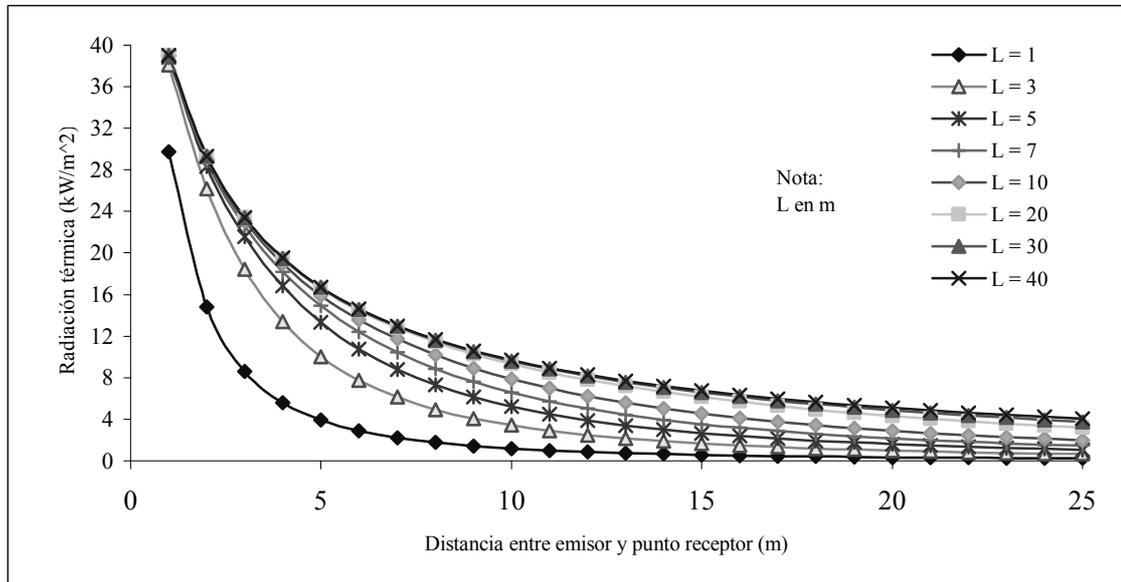


Figura 6.3.5. Radiación térmica en función de la distancia entre punto receptor y frente de llama de forma cilíndrica (caso 1). Se emplea para la determinación del factor de vista la ecuación (5.33) de Kay.

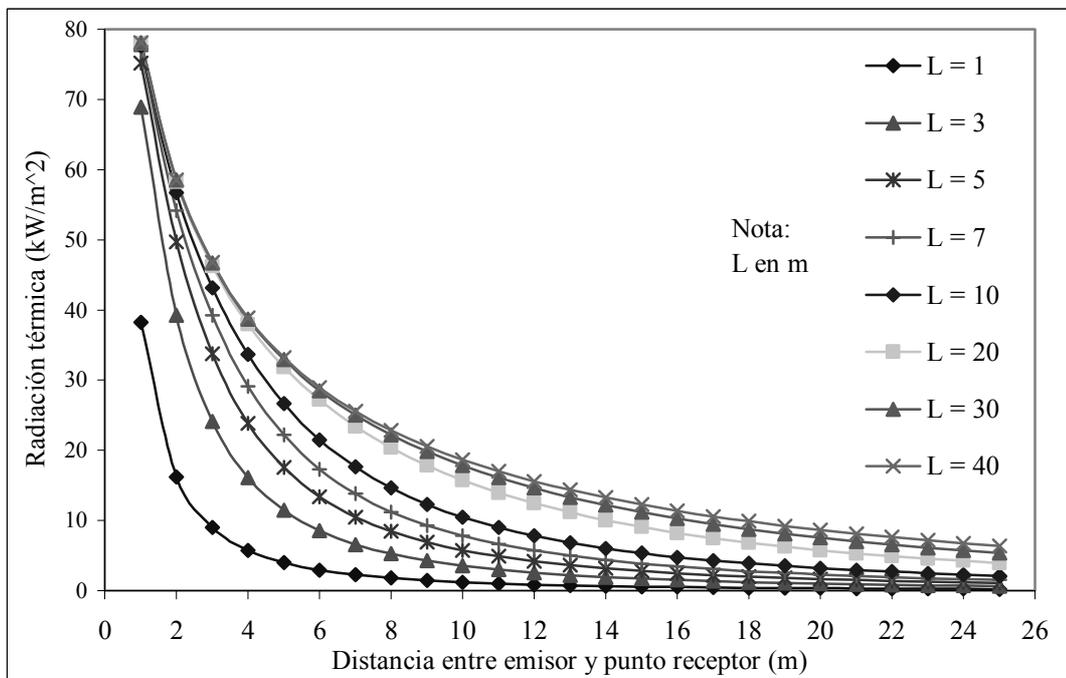


Figura 6.3.6. Radiación térmica en función de la distancia entre punto receptor y frente de llama de forma cilíndrica (caso 2). Se emplea para la determinación del factor de vista la ecuación (5.33) de Kay.

### 6.3.3. Discusión y análisis

El comportamiento general del flujo de radiación térmica se resume en la Figura 6.3.7. La zona más cercana al frente de llama (zona A) posee una pendiente negativa mayor, en valor absoluto, a la que se pueda presentar en la zona B y ésta a su vez mayor, en valor absoluto, a la observada en la zona C. Esto significa que pequeños cambios en la distancia son muy importantes para zonas cercanas a la llama; menos importantes para la zona B; y poco importantes para la zona C; es decir mientras que unos cuantos metros en la zona A pueden significar un daño irreparable, para la zona C pueden ser totalmente irrelevantes.

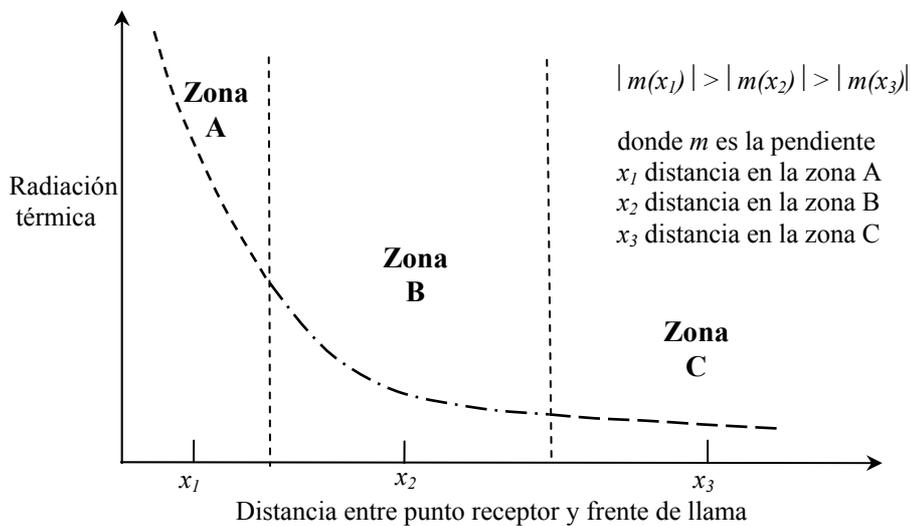


Figura 6.3.7. Comportamiento general del flujo de radiación térmica en función de la distancia.

El flujo de radiación térmica en función de la relación  $x/L$  se muestra en las figuras 6.3.8 a 6.3.13. En esta representación, se ha considerado un frente de llama de forma rectangular con dimensiones de 20 m de amplitud por 1, 2, 5, 15, 25 y 40 m de altura, respectivamente. Las ecuaciones de McGuire se han utilizado para la determinación del factor de vista. El caso 1 corresponde a la configuración de un punto receptor paralelo a una esquina del rectángulo considerado. Mientras que el caso 2 corresponde a un elemento diferencial paralelo al centro del rectángulo.

En la Figura 6.3.8 se ha representado el flujo de radiación térmica para un frente de llama de 20 m de ancho por 1 m de altura. Empleando las ecuaciones de McGuire, la configuración considerada para el caso 1, proporciona valores que suponen peligro para las personas en la región que corresponde a los valores de la relación  $x/L < 6$  (tomando como referencia  $4,7 \text{ kW/m}^2$ , flujo de calor suficiente como para dañar la piel de una persona). En cuanto a la configuración considerada por el caso 2, valores similares del flujo de radiación se encuentran hasta aproximadamente una relación  $x/L = 10$ .

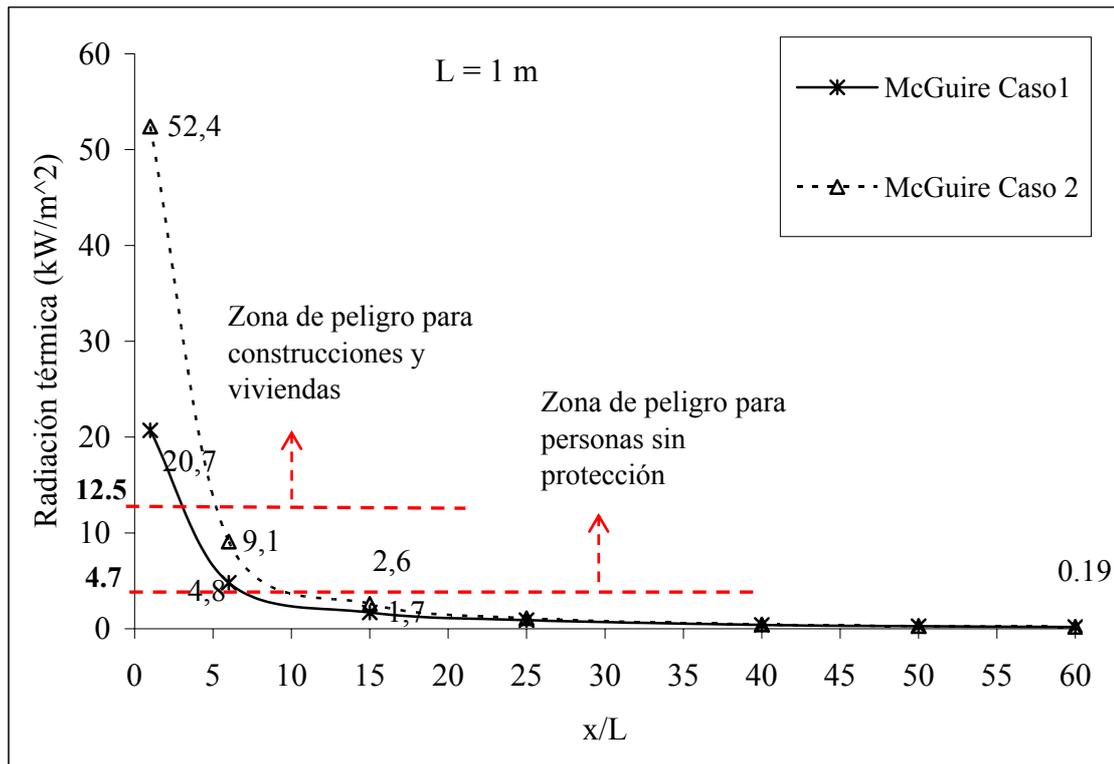


Figura 6.3.8. Flujo de radiación térmica para un frente de llama de forma rectangular de 20 m de ancho por 1 m de alto.

En la Figura 6.3.9 se muestra la misma representación que en la Figura 6.3.8, pero incrementando la altura del frente a 2 m. Obsérvese como para el caso 1, la relación x/L para la zona de mayor riesgo, conserva un valor de 6; mientras que para el caso 2, se reduce ligeramente y la zona que no significa un flujo de calor que dañe a la piel se presenta para valores de x/L > 8.

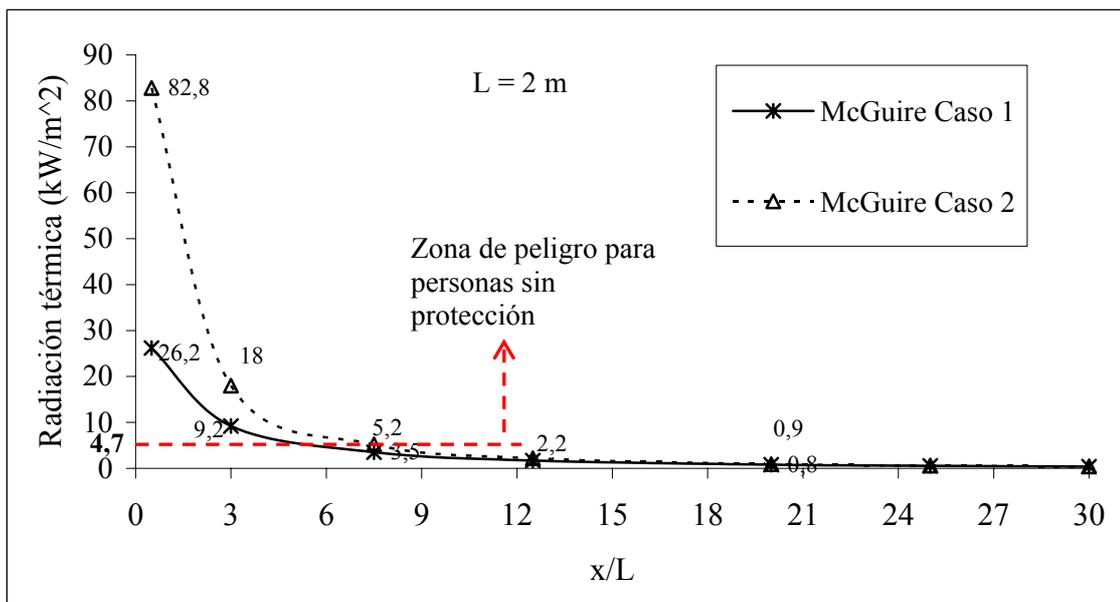


Figura 6.3.9. Flujo de radiación térmica para un frente de llama de forma rectangular de dimensiones de 20 m de ancho por 2 m de alto.

El comportamiento del flujo de calor con respecto a la relación  $x/L$  para un frente de llama con una altura de 5 m se representa en la Figura 6.3.10. Puede observarse como la relación para el mismo valor de referencia ( $4,7 \text{ kW/m}^2$ ) se reduce, de manera que los valores para  $x/L$  son de 4,6 (para el caso 1) y 5,4 (para el caso 2) respectivamente (nótese que tales valores de la relación representan distancias entre frente de llama y elemento receptor de 23 y 27 m).

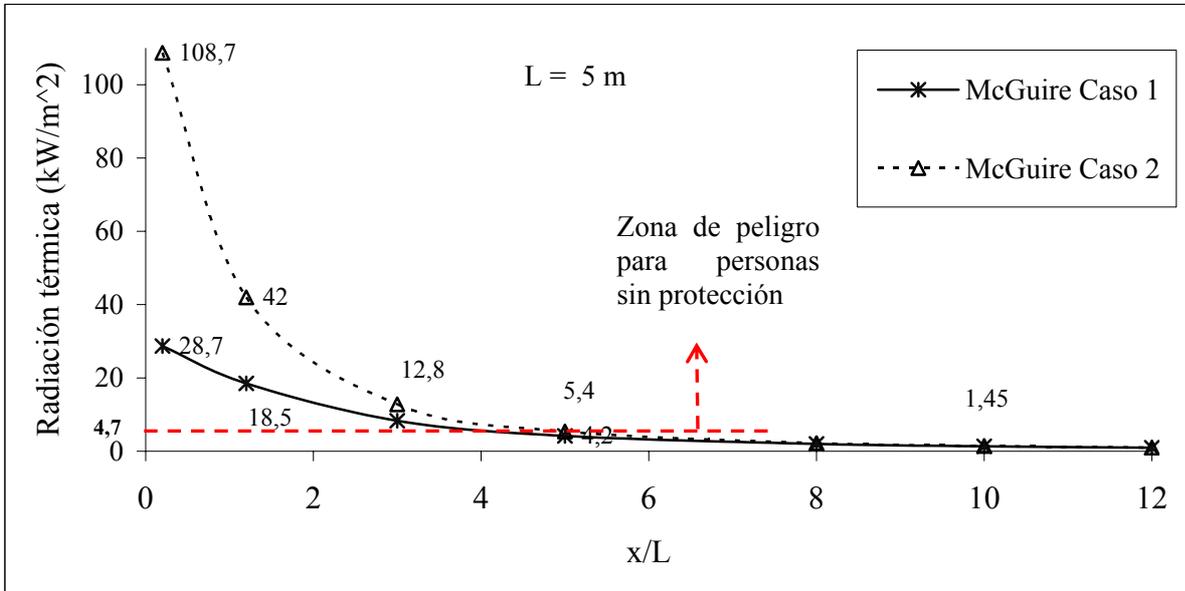


Figura 6.3.10. Flujo de radiación térmica para un frente de llama de forma rectangular con dimensiones de 20 m de ancho por 5 m de alto.

En la Figura 6.3.11 se muestra el mismo estudio realizado anteriormente pero con una altura del frente de 15 m. La relación  $x/L$  para  $4,7 \text{ kW/m}^2$  en el caso 1, toma ahora el valor de 2,9; mientras que para el caso 2 es de 3,2.

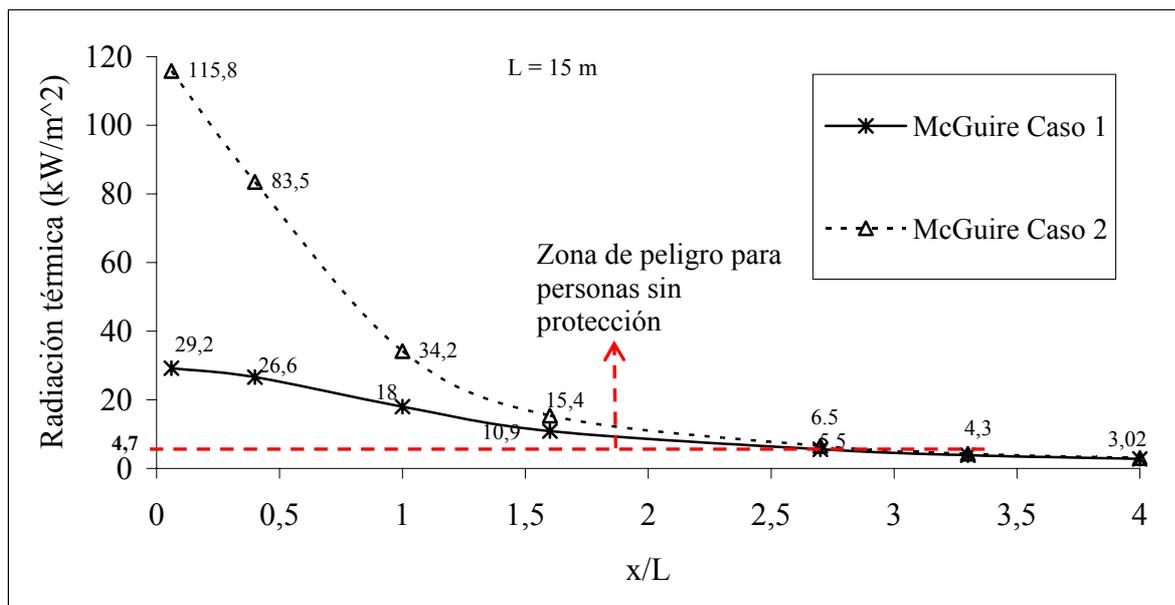


Figura 6.3.11. Flujo de radiación térmica para un frente de llama de forma rectangular con dimensiones de 20 m de ancho por 15 m de alto.

En la Figura 6.3.12 se realiza el mismo estudio con una altura de 25 m. El valor de  $x/L$  para el flujo de radiación de referencia es de 2,3, para la configuración del caso 1, y de 2,5 cuando se considera la configuración del caso 2. Mientras que la diferencia en la relación  $x/L$  de estas dos configuraciones es de sólo 2 décimas (nótese que con la altura de 1 m en el frente de llama, Figura 6.3.8, la diferencia en la relación de las dos configuraciones consideradas, es igual a 4).

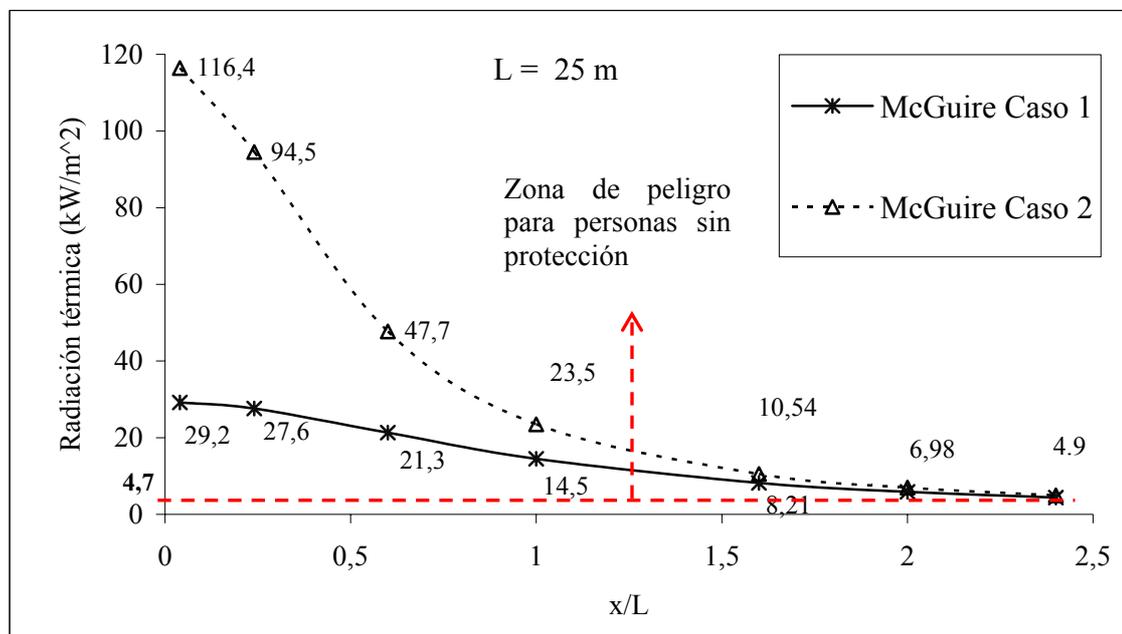


Figura 6.3.12 Flujo de radiación térmica para un frente de llama de forma rectangular con dimensiones de 20 m de ancho por 25 m de alto.

Finalmente, el máximo tamaño de frente de llama considerado ha sido de 40 m de altura. La descripción del flujo de radiación térmica en función de la relación  $x/L$  para este caso puede verse en la Figura 6.3.13. El valor observado para el flujo de referencia ( $4,7 \text{ kW/m}^2$ ) es de 1,7 y 1,9 para los casos 1 y 2, respectivamente.

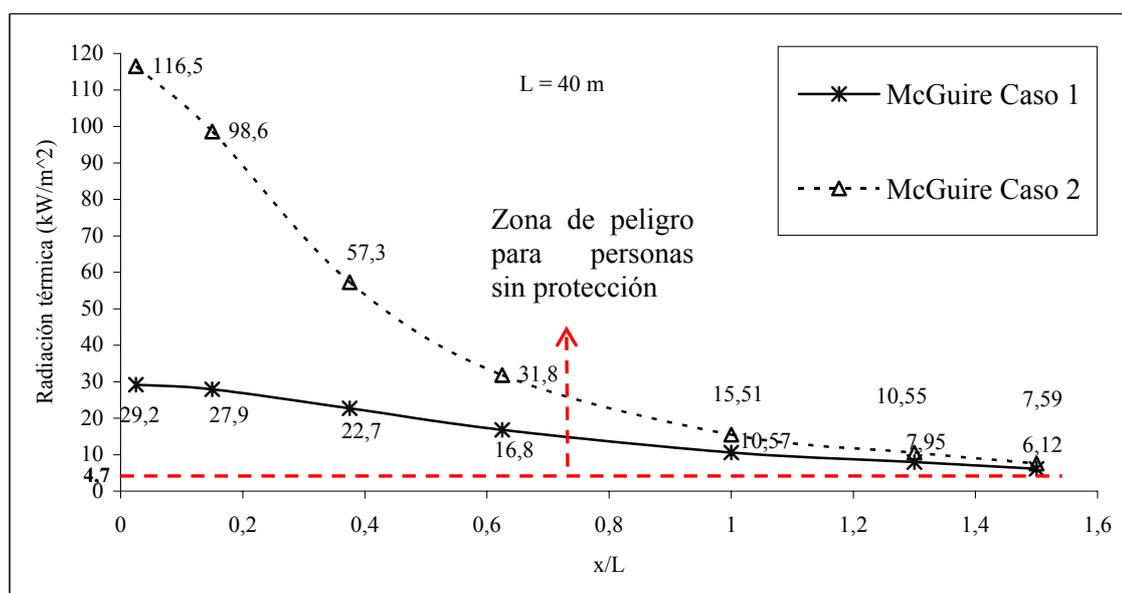


Figura 6.3.13. Flujo de radiación térmica para un frente de llama de forma rectangular con dimensiones de 20 m de ancho por 40 m de alto.

De los resultados anteriores pueden destacarse algunas tendencias generales: El valor para la relación  $x/L$  para una determinada intensidad de radiación sobre el receptor disminuye conforme el tamaño del frente de llama aumenta; lo cual significa, también, que la distancia aumenta aunque no en la misma proporción con que aumentan las dimensiones del frente. El flujo de calor de radiación tampoco se incrementa de manera lineal. En incendios grandes (frentes de llama grandes) la diferencia en los valores de la relación ( $x/L$ ) entre las dos configuraciones consideradas no es tan grande como en frentes de llama pequeños. Se observa, por ejemplo, que mientras en un frente de llama de 20 x 1 m la diferencia en la relación entre las dos configuraciones es de 4, para un frente de llama de 20 x 40 m es tan sólo de 0,2.

También se han obtenido los valores del flujo de radiación térmica en función de la relación  $x/L$ , para una llama supuesta de forma cilíndrica; los resultados se muestran en el anexo II desde la TablaA.II.9 a la TablaA.II.12. Los resultados de radiación térmica se han determinado para distancias entre fuente emisora y elemento receptor de 1, 6, 15 y 25 m. Las dimensiones del cilindro consideradas han sido: alturas entre 1 y 40 m, y radios de 1 y 2 m. Las ecuaciones utilizadas para la determinación del factor de vista han sido las propuestas por Kay para los casos 1 y 2 (ecuación 5.33). Las configuraciones respectivas han sido: elemento receptor paralelo a la base del cilindro y elemento diferencial paralelo a la mitad de la altura del cilindro.

Las diferencias numéricas de los resultados entre una configuración rectangular y otra cilíndrica son significativas; sin embargo, se observa que el comportamiento del flujo de calor de radiación es el mismo. La importancia de la distancia entre elementos emisor y receptor es mayor para distancias cortas siendo poco importante para distancias grandes (véase Figura 6.3.7). La aplicación a configuraciones cilíndricas es aplicable a situaciones muy concretas. Por lo tanto, como los flujos de calor de radiación son de mayor intensidad para la configuración rectangular, será ésta la que es recomendable utilizar para la determinación de las zonas de seguridad, ya que supone mayor riesgo y es más representativa de un incendio forestal real.

#### **6.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

Con la finalidad de establecer las alturas de llama que sean representativas en caso de ocurrencia de un incendio de superficie en diferentes escenarios, se ha efectuado un análisis de sensibilidad, utilizando como herramienta el programa informático Nexus (Scott, 1999).

Nexus es un sistema que utilizando el programa Excel de Microsoft, simula el comportamiento de los incendios, considerando los 13 modelos de combustible de Rothermel (descritos en la sección 2.3.1).

Nexus basa la predicción del comportamiento de los incendios de superficie en el modelo matemático de Rothermel (1972). Mientras que para estimar el comportamiento de los incendios de copas, dicho modelo se complementa con correlaciones propuestas por el mismo autor en un trabajo posterior (Rothermel, 1991). Este programa, también predice el estado transitorio entre estos dos tipos de incendios y para ello se basa en los datos publicados por Van Wagner (1977). Los fundamentos teóricos de este sistema son los mismos que utilizan el sistema BEHAVE y el simulador FARSITE. En su conjunto, tales sistemas constituyen las

herramientas de trabajo en el servicio forestal de los Estado Unidos (Rothermel, 1983; Andrews 1986).

Para el mencionado análisis de sensibilidad, se han supuesto valores considerados de alto riesgo para la propagación y generación de llamas de gran tamaño (condiciones de un verano severo: temperatura ambiental alta, corrientes de viento, bajos contenidos de humedad del aire y del combustible).

Las condiciones supuestas y los resultados obtenidos de longitud de llama, altura de llama e intensidad lineal, se muestran en la Tabla 6.3. Puede observarse, como era de esperar, que los valores de la longitud de la llama son superiores a medida que la velocidad del viento aumenta, presentándose los incrementos más grandes en la longitud de llama (es decir, que la pendiente de la curva es mayor) cuando las corrientes del viento alcanzan una velocidad de hasta 30 km/h, e incrementos más suaves se presentan después de este valor.

Tabla 6.3. Valores de la intensidad lineal<sup>1</sup>, longitud<sup>2</sup> y altura<sup>3</sup> de la llama, para los 13 modelos de combustible de Rothermel (suponiendo condiciones de alto riesgo).

1-h humedad 3 % 10--h humedad 4 % 100-h humedad 5 % Humedad del combustible vivo 100 % <span style="float: right;">Humedad del follaje 70 %</span>									
$u_a$ :	0 km/h 0 m/s <sup>(4)</sup>			10 km/h 3 m/s			20 km/hr 6 m/s		
Tipo de combustible	$I_B \cdot 10^3$ (W/m)	$L_f$ (m)	$H$ (m)	$I_B \cdot 10^3$ (W/m)	$L_f$ (m)	$H$ (m)	$I_B \cdot 10^3$ (W/m)	$L_f$ (m)	$H$ (m)
1	34,8	0,4	0,4	167,8	0,8	0,1	2283,4	3,4	1,1
2	96,6	0,6	0,6	561,8	1,6	0,5	3411,6	4,0	1,6
3	349,0	1,1	1,1	3269,3	3,5	2,8	6279,8	5,1	2,9
4	902,4	1,8	1,8	5734,2	4,5	5,0	13360,6	6,9	6,2
5	60,7	0,5	0,5	731,3	1,8	0,6	4042,7	4,3	1,9
6	84,0	0,6	0,6	881,6	2,0	0,8	3731,1	4,2	1,7
7	59,0	0,5	0,5	707,0	1,8	0,6	3651,1	4,1	1,7
8	4,5	0,2	0,2	14,5	0,3	0,01	32,4	0,4	0,02
9	32,3	0,4	0,4	105,1	0,7	0,1	1747,5	2,9	0,8
10	86,3	0,6	0,6	783,0	1,8	0,7	5981,7	5,0	2,8
11	40,9	0,4	0,4	195,1	0,9	0,2	3952,6	4,2	1,8
12	307,0	1,1	1,1	2775,4	3,4	2,4	10576,4	6,3	4,9
13	611,0	1,5	1,5	4367,5	4,1	3,8	14955,7	7,2	7,0

Continuación de la Tabla 6.3

$u_a$ :	30 km/hr 8 m/s			40 km/hr 11 m/s			50 km/hr 14 m/s		
Tipo de combustible	$I_B \cdot 10^3$ (W/m)	$L_f$ (m)	$H$ (m)	$I_B \cdot 10^3$ (W/m)	$L_f$ (m)	$H$ (m)	$I_B \cdot 10^3$ (W/m)	$L_f$ (m)	$H$ (m)
1	4519,3	4,6	1,5	6694,9	5,4	1,6	9120,1	6,1	1,7
2	7322,9	5,6	2,4	10848,1	6,5	2,5	14777,8	7,3	2,7
3	9556,7	6,2	3,1	14157,3	7,2	3,3	19285,8	8,2	3,6
4	22604,7	8,7	7,3	33486,8	10,3	7,8	45617,2	11,7	8,5
5	8513,0	5,9	2,8	12611,1	6,9	2,9	17179,5	7,8	3,2
6	7455,4	5,6	2,4	11044,4	6,5	2,6	15045,2	7,4	2,8
7	7599,6	5,6	2,5	11258,1	6,6	2,6	15336,28	7,4	2,8
8	55,4	0,5	0,02	82,5	0,6	0,02	113,07	0,7	0,02
9	6702,4	5,4	2,2	9929,0	6,3	2,3	13525,72	7,1	2,5
10	13073,5	7,0	4,2	19367,2	8,2	4,5	26382,88	9,3	4,9
11	9436,4	6,1	3,1	13979,2	7,2	3,3	19043,11	8,1	3,5
12	20543,9	8,4	6,7	30433,9	9,9	7,1	41458,4	11,2	7,7
13	28487,0	9,6	9,2	42200,7	11,3	9,9	57487,78	12,9	10,7

<sup>1,2</sup> Para la determinación de estas variables se emplea el programa Nexus.

<sup>3</sup> La altura de llama se determina mediante la ecuación 2.10 (Nelson y Adkins, 1986).

<sup>4</sup> En condiciones de ausencia de viento (y sin pendiente) se ha considerado que la longitud de llama es igual a la altura de llama.

A pesar de suponer condiciones que favorecen a un incendio, si se compara con un incendio de copas, las dimensiones de la llama son relativamente pequeñas. Nótese como la longitud más alta es de 13 m, mientras que el valor más bajo se observa con el modelo de combustible 8 (1 m con velocidades del viento de 50 km/hr). No se contradice este último valor, y sirva de referencia, con el valor reportado por Anderson (1982), quien asigna una altura de llama de 0,3 m para este modelo de combustible (en presencia de viento de 8 km/h y contenidos de humedad del 8 % para el combustible muerto y 100 % para el combustible vivo).

La altura de la llama, obviamente, presenta la misma tendencia que la longitud de llama, aunque los valores que se obtienen son menores (con respecto a la longitud de la llama), lo cual se explica por la inclinación de la llama ocasionada por el viento.

Considerando que no existe pendiente, que la velocidad del viento es variable (con posibles turbulencias) y las características fluctuantes de la geometría del frente de un incendio, es sumamente complejo determinar la altura de la llamas para cualquier instante; sin embargo, es

de esperar que las dimensiones de las mismas fluctúen entre los valores estimados para la altura y longitud de llama (sin considerar los posibles picos).

Otro parámetro que se ve influenciado por la inclinación de la llama es el factor de vista. No obstante, como se ha visto en el capítulo anterior, un frente de llama rectangular y en posición vertical (la geometría descrita por las ecuaciones de McGuire y que ha sido seleccionada en el capítulo anterior), representa la situación de mayor riesgo, lo cual es reflejado al presentar los más altos valores del factor de vista (si se compara con una geometría rectangular inclinada). Por lo anterior, se ha considerado para la determinación de zonas de seguridad las condiciones de mayor riesgo, es decir, las mayores dimensiones posibles de la altura de la llama. En la siguiente sección se determinan las distancias de seguridad.

## 6.5. ESTABLECIMIENTO DE ZONAS DE SEGURIDAD

De la Tabla 6.1 se han seleccionado los límites máximos tolerables por personas, bomberos, construcciones y viviendas. Para estas últimas, se ha considerado la posibilidad de material plástico que suele emplearse en la construcción (espumas de poliuretanos, espumas de poliestireno, PVC, polietileno). Dichos valores se resumen en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Límites de radiación térmica tolerables

Elemento receptor	Flujo térmico (kW/m <sup>2</sup> )	Referencia
Personas (sin protección especial)	4,7	Casal <i>et al.</i> (1999); Crocker y Napier (1986)
Bomberos (con traje de protección especial)	7,0	Butler y Cohen (1998)
Construcciones y viviendas con elementos o accesorios de plástico <sup>1</sup>	10	Lilley (2000)
Construcciones y viviendas (con elementos de madera).	12,6	Casal <i>et al.</i> (1999); Crocker y Napier (1986)

<sup>1</sup> Los polímeros poseen una gama muy amplia de valores (10 -30 kW/m<sup>2</sup>), por lo que se ha elegido la más baja.

### 6.5.1 Distancias de seguridad para posibles incendios en los modelos de combustible de Rothermel

Considerando los valores de la Tabla 6.4, así como las estimaciones de la intensidad de radiación en función de la distancia para los diversos tipos de combustible de la clasificación de Rothermel, ha sido posible estimar las distancias de seguridad para los distintos casos contemplados. En la Tabla 6.5 se muestran distancias de seguridad para personas sin protección, con ropa de protección especial y para construcciones y viviendas (urbanizaciones).

Tabla 6.5 Distancias de seguridad para la protección de personas y viviendas de posibles incendios en los modelos de combustible de Rothermel.

Tipos de combustible	Distancias de seguridad (m)			
	Personas		Urbanizaciones	
	Sin protección	Con protección	Madera	Plástico
1	30	24	17	19
2	32	26	18	21
3	35	28	20	23
4	43	34	25	28
5	35	28	20	23
6	32	26	18	21
7	32	26	18	21
8	10	7	4	6
9	32	26	18	21
10	37	30	21	24
11	35	28	20	23
12	41	33	24	27
13	44	36	26	30

### 6.5.2 Distancias de seguridad para la protección en posibles incendios de copas considerando diversas especies forestales típicas de la zona Mediterránea

Las ecuaciones semiempíricas existentes para la predicción de las características geométricas de la llama en un incendio de copas, son válidas para un estrecho margen de aplicación, habiéndose obtenido, cuando se ha estudiado la posibilidad de su utilización, resultados contradictorios (Arnaldos *et al.*, 2001). En consecuencia, ante la falta de datos de este tipo de incendios y en base a la experiencia, se ha optado por el establecimiento de una altura arbitraria de tres veces la altura media de las especies vegetales consideradas; en diversos encuentros con bomberos con experiencia en incendios forestales, se realizó una encuesta, habiéndose obtenido como resultado, que dicho personal estima para un incendio de copas alturas de llama comprendidas entre 2,5 y 3,5 veces la altura de los árboles. Y es de esta forma como se han estimado las alturas de la llama mostradas para las diversas especies forestales de la Tabla 6.6.

Considerando los valores de la Tabla 6.4 como valores límite de radiación tolerable, se han obtenido las distancias de seguridad para la protección de personas y viviendas en caso de un supuesto incendio de copas en especies forestales típicas de la zona Mediterránea; estas distancias se muestran en la Tabla 6.7.

Tabla 6.6. Estimación empírica de las alturas de la llama en un incendio de copas para especies vegetales típicas de la zona Mediterránea.

Espece forestal	Altura dominante (m)	Altura de la llama (m)
Pino albar ( <i>Pinus sylvestris</i> )	13	39
Pino negral ( <i>Pinus nigra</i> )	12	36
Pino carrasco ( <i>Pinus halepensis</i> )	11	33
Encina ( <i>Quercus ilex</i> )	8	24
Abeto ( <i>Abies alba</i> )	22	66

Fuente: CREAM (2000, 2002). Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña. Región Forestal I, V y VII.

Tabla 6.7. Distancias de seguridad para la protección de personas y viviendas en posibles incendios de copas considerando diversos tipos de bosque.

Espece forestal	Distancias de seguridad (m)			
	Personas		Urbanizaciones	
	Sin protección	Con protección	Plástico	Madera
Pino albar ( <i>Pinus sylvestris</i> )	77	62	51	45
Pino negral ( <i>Pinus nigra</i> )	74	60	49	43
Pino carrasco ( <i>Pinus halepensis</i> )	71	57	47	41
Encina ( <i>Quercus ilex</i> )	60	49	40	35
Abeto ( <i>Abies alba</i> )	98	79	65	56

Como era de esperar, en todos los casos el valor máximo de la distancia de seguridad para cada tipo de combustible (tanto los de la clasificación de Rothermel, como los de las especies forestales típicas de Cataluña) es el correspondiente a las personas sin protección, siendo poco menos que el doble del correspondiente a las instalaciones (viviendas) de madera. Las distancias de seguridad para personas sin protección son de interés para la eventual planificación de vías de evacuación. En cambio, en el caso de viviendas, el valor a tener en cuenta debería ser básicamente el correspondiente a la propia instalación, ya que presumiblemente las personas habrán sido evacuadas en caso de incendio. Dada la imprecisión inherente a este tipo de cálculos, así como la no consideración del calor

convectivo, se considera que, para su aplicación, las distancias de seguridad deberán incrementarse aproximadamente en un 20 %.

## 6.6. CONSIDERACIONES FINALES

Las posibilidades y condiciones en un incendio son infinitas; dentro de esta amplia gama, se han seleccionado condiciones de alto riesgo de manera que en caso de ocurrencia de un incendio las distancias de seguridad establecidas sean efectivas para los casos considerados. Lo anterior es una práctica que suele realizarse en los cálculos ingenieriles relacionados con seguridad. Sin embargo, no deben perderse de vista algunos aspectos importantes como:

- Suposiciones y restricciones que deben cumplirse para que las distancias sugeridas sean válidas. Una que no se ha mencionado pero que se da por hecho es que el método empleado supone que en los alrededores (la zona intermedia entre la llama y elemento receptor) no existe material inflamable.
- A pesar de considerar la posibilidad de los incendios de copas para un cierto tipo de combustible, este tipo de incendios involucra fenómenos de muy difícil predicción (incendios secundarios, regímenes de turbulencia, etc.). Con la metodología utilizada en esta tesis, para situaciones como las anteriormente seleccionadas, se prevé como posible solución el establecimiento de grandes distancias de seguridad; para el flujo de energía térmica determinado puede ser suficiente distancias de hasta 100 m, aunque para el caso de las pavesas, la experiencia indica que pueden ser necesarias distancias del orden de kilómetros. Magnitudes de este orden no son una solución práctica (porque además, para su aplicación, deberán contar con la aceptación de los numerosos sectores involucrados: gobierno y sociedad en su conjunto). Por lo anterior, para la salvaguarda de los bienes en este tipo de incendios se recomienda el desarrollo de otro tipo de soluciones (aplicación y desarrollo de materiales ignífugos en la construcción, ataque con retardantes, educación, etc.).
- La trascendencia económica (ampliar o disminuir algunos metros las distancias de seguridad tiene una traducción económica importante).
- No ha sido posible efectuar un trabajo experimental que permita validar los resultados. A este respecto, una forma de verificar los resultados es mediante el contraste con los resultados existentes en la bibliografía. Por ello se ha incluido en el anexo A II.4 una sección con esta finalidad.
- No existe un método fiable, ni tampoco datos experimentales, para la determinación de las alturas de las llamas en los incendios de copas, por lo que en este trabajo se ha optado por adoptar un criterio basado en la experiencia; sin embargo los valores para dichas alturas son una aproximación genérica y, por tanto, hay que ser conscientes que en realidad se están introduciendo en el modelo valores aproximados, válidos desde un punto de vista general pero que pueden apartarse del valor preciso en un caso concreto.
- Finalmente, se debe señalar que el método aquí empleado sólo ha considerado el mecanismo de radiación. Sería posible mejorar las estimaciones de flujo de calor y, en consecuencia, proporcionar distancias de seguridad más fiables, si se tuviera en

cuenta, asimismo, el mecanismo de convección (los incendios de mayor riesgo suelen estar acompañados de elevadas velocidades de viento donde el mecanismo de convección es importante).

### 6.7. NOMENCLATURA

$I_B$	Intensidad lineal, W/m
$L$	Longitud, m
$L_f$	Longitud de la llama, m
$H$	Altura de la llama, m
$u_a$	Velocidad del viento, m/s

